

Stroitel'nye Materialy [Construction Materials]

ISSN 0585-430X

Scotti

# СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ<sup>®</sup> №6



НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ ИЗДАЕТСЯ С 1955 г. [WWW.RIFSM.RU](http://WWW.RIFSM.RU) [WWW.JOURNAL-CM.RU](http://WWW.JOURNAL-CM.RU) ИЮНЬ 2018 г. (760)

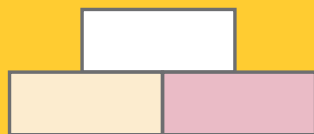
## БЕЗ ПРОБЛЕМ



Печи Мерц для обжига извести чрезвычайно эффективны при любом климате. На протяжении многих десятилетий. Там где Вы находитесь немного сыро? Без проблем: [maerz.com](http://maerz.com)



**СИЛИКАТЭКС**



## XII Международная конференция «Развитие производства силикатного кирпича»

**10–11 октября 2018**

**Владимирская обл., г. Суздаль  
ГТК «Суздаль»**



### **Программа работы:**

**10 октября – пленарное заседание**

**11 октября – посещение ЗАО «Ковровский завод силикатного кирпича»**



**Спонсор конференции:**



**Организатор конференции – журнал**



### **Оргкомитет:**

**Руководитель проекта – Юмашев Алексей Борисович    Менеджер проекта – Горегляд Светлана Юрьевна**

**Телефон/факс: (499) 976-22-08, 976-20-36, (916) 123-98-29**

**silikatex@bk.ru    mail@rifsm.ru    www.silikatex.ru    www.rifsm.ru**

**Адрес для корреспонденции: 127434, Москва, Дмитровское ш., д. 9, стр. 3,  
редакция журнала «Строительные материалы»®**

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

# СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ®

№6

Основан в 1955 г.

(760) июнь 2018 г.

**Учредитель журнала:**  
ООО Рекламно-издательская  
фирма «СТРОЙМАТЕРИАЛЫ»  
Свидетельство о регистрации  
ПИ №77-1989  
**Входит в Перечень ВАК,**  
государственный проект **РИНЦ,**  
Russian Science Citation Index  
на платформе Web of Science

**Главный редактор:**

**ЮМАШЕВА Е.И.,**  
инженер-химик-технолог,  
почетный строитель России

**Редакционный совет:**

**РЕСИН В.И.,**  
председатель, д-р экон. наук,  
профессор, академик РААСН (Москва)

**АСКАДСКИЙ А.А.,**  
д-р хим. наук, профессор (Москва)

**БУРЬЯНОВ А.Ф.,**  
д-р техн. наук, директор Российской  
гипсовой ассоциации (Москва)

**БУТКЕВИЧ Г.Р.,**  
канд. техн. наук, член правления  
Ассоциации «Недра» (Москва)

**ВАЙСБЕРГ Л.А.,**  
д-р техн. наук, профессор,  
академик РАН  
(Санкт-Петербург)

**ВЕРЕЩАГИН В.И.,**  
д-р техн. наук, профессор (Томск)

**ГОРИН В.М.,**  
канд. техн. наук, президент Союза  
производителей керамзита и  
керамзитобетона (Самара)

**ЖУРАВЛЕВ А.А.,**  
Президент Ассоциации «Недра» (Москва)

**КОРОЛЕВ Е.В.,**  
д-р техн. наук, профессор (Москва)

**КРИВЕНКО П.В.,**  
д-р техн. наук, профессор (Украина)

**ЛЕОНИЧ С.Н.,**  
д-р техн. наук, профессор (Беларусь)

**ЛЕСОВИК В.С.,**  
д-р техн. наук, профессор,  
член-корреспондент РААСН (Белгород)

**ОРЕШКИН Д.В.,**  
д-р техн. наук, профессор (Москва)

**ПИЧУГИН А.П.,**  
д-р техн. наук, профессор  
(Новосибирск)

**ПУХАРЕНКО Ю.В.,**  
д-р техн. наук, профессор,  
член-корреспондент РААСН  
(Санкт-Петербург)

**ФЕДОСОВ С.В.,**  
д-р техн. наук, профессор,  
академик РААСН (Иваново)

**ФИШЕР Х.-Б.,**  
доктор-инженер (Германия)

**ХОЗИН В.Г.,**  
д-р техн. наук, профессор (Казань)

**ЧЕРНЫШОВ Е.М.,**  
д-р техн. наук, профессор,  
академик РААСН (Воронеж)

**ШЛЕГЕЛЬ И.Ф.,**  
канд. техн. наук (Омск)

**ШТАКЕЛЬБЕРГ Д.И.,**  
д-р техн. наук, профессор (Израиль)

**ЯКОВЛЕВ Г.И.,**  
д-р техн. наук, профессор (Ижевск)

**Доклады IX Академических чтений РААСН  
«Актуальные вопросы строительной физики»**

Н.П. УМНЯКОВА

**Методика определения скорости движения частиц пыли  
в воздушном потоке в конструкции вентфасада ..... 4**

В.Г. ГАГАРИН, С.В. ГУВЕРНЮК

**Проблемы определения динамических нагрузок на облицовочный слой  
навесных фасадных систем при ветровых порывах ..... 8**

Н.И. КАРПЕНКО, В.Н. ЯРМАКОВСКИЙ, С.Н. КАРПЕНКО, Д.З. КАДИЕВ

**К диаграммам деформирования бетона под нагрузкой  
при действии температуры до -70°C в зависимости  
от его структурно-технологических характеристик ..... 13**

Н.В. КУЗНЕЦОВА, А.И. ДУБРОВИН, В.А. ЕЗЕРСКИЙ

**Исследование влияния водоцементного отношения  
на прочность мелкозернистых бетонов с заполнителем  
из гранулированного доменного шлака ..... 20**

А.Л. КРИШАН, В.И. РИМШИН, М.А. АСТАФЬЕВА

**Прочность усовершенствованных трубобетонных элементов  
квадратного поперечного сечения ..... 24**

Д.Ю. ЖЕЛДАКОВ

**Химическая коррозия кирпичной кладки. Постановка задачи ..... 29**

Д.О. НЕВЕЛЬСКИЙ

**Определение фактического износа дорожных покрытий  
шипованными шинами ..... 33**

В.А. СМИРНОВ, М.Ю. СМОЛЯКОВ

**Сравнительный анализ динамических характеристик эластичных пластмасс  
и резиновых вибродемпфирующих материалов ..... 36**

В.С. ЛЕСОВИК, С.В. АЛЕКСЕЕВ, И.В. БЕССОНОВ, С.С. ВАЙСЕРА

**Управление структурой и свойствами акустических материалов  
на основе пеностеклокомполитов ..... 41**

**Материалы и технологии**

А.А. АСКАДСКИЙ, К.С. ПИМИНОВА, А.В. МАЦЕЕВИЧ

**Релаксационные свойства террасных досок, изготовленных  
из древесно-полимерных композитов (ДПК) ..... 45**

Ю.Г. БОРИСЕНКО, С.В. РУДАК, О.А. БОРИСЕНКО

**Влияние содержания и зернового состава легких пористых заполнителей  
на физико-механические свойства битумоминеральных композиций ..... 53**

**Проект Terex-Lime: три новых печи для получения жестко-,  
средне- и мягкообожженной высококачественной извести  
для ООО «Центр-Известняк» – предприятие ГК «TEREX» (Информация) ..... 57**

© ООО РИФ «СТРОЙМАТЕРИАЛЫ»,  
журнал «Строительные материалы»®, 2018

**Адрес редакции:** Россия, 127434, Москва,  
Дмитровское ш., д. 9, стр. 3  
**Тел./факс:** (499) 976-22-08, (499) 976-20-36  
mail@rifsm.ru; www.rifsm.ru; www.journal-cm.ru

Авторы опубликованных материалов несут ответственность за достоверность приведенных сведений, точность данных по цитируемой литературе и за использование в статьях данных, не подлежащих открытой публикации. Редакция может опубликовать статьи в порядке обсуждения, не разделяя точку зрения автора. Перепечатка и воспроизведение статей, рекламных и иллюстративных материалов возможны лишь с письменного разрешения главного редактора. Редакция не несет ответственности за содержание рекламы и объявлений.

**Founder of the journal:**  
 «STROYMATERIALY»  
 Advertising-Publishing Firm, OOO  
 Registration certificate  
 PI № 77–1989  
 Included in the list of journals of  
 the Higher Attestation Commission  
 (Russia), Project Russian Science  
 Citation Index (Russia), Russian  
 Science Citation Index on the  
 platform Web of Science

Monthly scientific-technical and industrial journal

# STROITEL'NYE MATERIALY®

№6  
 Founded in 1955 (760) June 2018

**Editor-in-chief**

**YUMASHEVA E.**,  
 engineer-chemist-technologist,  
 Honorary Builder of Russia

**Editorial Board**

**RESIN V.**,  
 Chairman, Doctor of Sciences (Economy),  
 Professor (Moscow)

**ASKADSKIY A.**,  
 Doctor of Sciences (Chemistry),  
 Professor (Moscow)

**BUR'YANOV A.**,  
 Doctor of Sciences (Engineering), Director  
 of the Russian Association of gypsum  
 (Moscow)

**BUTKEVICH G.**,  
 Candidate of Sciences (Engineering),  
 member of the Board of Association  
 «Nedra» (Moscow)

**VAYSBERG L.**,  
 Doctor of Sciences (Engineering),  
 Academician of RAS  
 (St. Petersburg)

**VERESHCHAGIN V.**,  
 Doctor of Sciences (Engineering),  
 Professor (Tomsk)

**GORIN V.**,  
 Candidate of Sciences (Engineering),  
 President of the Union of Haydite and  
 Haydite Concrete Producers (Samara)

**ZHURAVLEV A.**,  
 President of the Association «Nedra»  
 (Moscow);

**KOROLEV E.**,  
 Doctor of Sciences (Engineering),  
 Professor (Moscow)

**KRIVENKO P.**,  
 Doctor of Sciences (Engineering),  
 Professor (Ukraine)

**LEONOVICH S.**,  
 Doctor of Sciences (Engineering),  
 Professor (Belarus, Minsk)

**LESOVIK V.**,  
 Doctor of Sciences (Engineering),  
 Corresponding Member of RAACS  
 (Belgorod)

**ORESHKIN D.**,  
 Doctor of Sciences (Engineering),  
 Professor (Moscow)

**PICHUGIN A.**,  
 Doctor of Sciences (Engineering),  
 Professor, Member of the Russian Academy  
 of Natural Sciences (Novosibirsk),

**PUKHARENKO Yu.**,  
 Doctor of Sciences (Engineering),  
 Professor (St. Petersburg)

**FEDOSOV S.**,  
 Doctor of Sciences (Engineering),  
 Professor, Academician of RAACS (Ivanovo)

**FISHER H.-B.**,  
 Doctor-Engineer (Germany, Weimar)

**KHOZIN V.**,  
 Doctor of Sciences (Engineering),  
 Professor (Kazan)

**CHERNYSHOV E.**,  
 Doctor of Sciences (Engineering),  
 Professor, Academician of RAACS  
 (Voronezh)

**SHLEGEL I.**,  
 Candidate of Sciences (Engineering),  
 OOO «INTA-Stroy» (Omsk)

**SHTACKELBERG D.**,  
 Doctor of Sciences (Engineering),  
 Professor (Israel)

**YAKOVLEV G.**,  
 Doctor of Sciences (Engineering),  
 Professor (Izhevsk)

**Reports of the IX Academic reading RAACS  
 «Actual issues of building physics»**

N.P. UMNIAKOVA

**Method for Determining the Velocity of Dust Particles in the Air Flow  
 in the Ventilated Facade Design** ..... 4

V.G. GAGARIN, S.V. GUVERNYUK

**Problems of Dynamic Load Determination on a Facing Layer  
 of Hinged Facade Systems in Wind Runs** ..... 8

N.I. KARPENKO, V.N. YARMAKOVSKY, S.N. KARPENKO, D.Z. KADIEV

**To Diagrams of Concrete Deformation under Simultaneous Action  
 of Loading and Low Temperatures up to Minus 70°C, Depending  
 on Structural and Technological Characteristics of Concrete** ..... 13

N.V. KUZNETSOVA, A.I. DUBROVIN, V.A. EZERSKIY

**Research in the Effect of Water-Cement Ratio on Strength of Fine Concretes  
 with a Filler of Granulated Blast Furnace Slag** ..... 20

A.L. KRISHAN, V.I. RIMSHIN, M.A. ASTAFIEVA

**Strength of Improved Pipe-Concrete Elements of Square Cross-Section** ..... 24

D.Yu. ZHELDAKOV

**Chemical Corrosion of a Bricklaying. Problem Definition** ..... 29

D.O. NEVELSKY

**The Determination of the Actual Wear of Road Surfaces by Studded Tyres** ..... 33

V.A. SMIRNOV, M.Yu. SMOLYAKOV

**Comparative Analysis of Dynamic Characteristics of Elastic Plastics  
 and Rubber Vibro-Damping Materials** ..... 36

V.S. LESOVIK, S.V. ALEKSEEV, I.V. BESSONOV, S.S. VAISERA

**Control of the Structure and Properties of Acoustic Materials  
 on the Basis of Foam Glass Composites** ..... 41

**Materials and technologies**

A.A. ASKADSKII, K.S. PIMINOVA, A.V. MATSEEVICH

**The Relaxation Properties of Decking Boards Made  
 from Wood-Polymer Composites (WPC)** ..... 45

Yu.G. BORISENKO, S.V. RUDAK, O.A. BORISENKO

**Influence of the Content and Grain Composition of Light Porous Fillers  
 on Physical and Mechanical Properties of Bitumen-Mineral Compositions** ..... 53

**Terex-Lime Project: Three New Kilns for Producing Hard-, Medium-,  
 and Soft Burnt High Quality Lime for OOO "Center-Izvestnyak -  
 enterprise of GK "TEREX" (Information)** ..... 57

# Строительные материалы № 6

Нанотехнологии в строительстве

X юбилейная международная конференция «Нанотехнологии в строительстве: NTC-2018» ..... 58

G.A. SAVCHENKOVA, T.A. ARTAMONOVA, O.V. SHASHUNKINA

Исследование свойств наномодифицированного материала серии Абрис ..... 63

S.A. ZHDANOK, E.N. POLONINA, S.N. LEONOVICH, B.M. KHRUSTALEV, E.A. KOLEDA

Повышение прочности бетона пластифицирующей добавкой на основе наноструктурированного углерода ..... 67

# Stroitel'nyye Materialy No. 6

Nanotechnologies in construction

10<sup>th</sup> Jubilee International Conference on "Nano-Technology in Construction: NTC 2018" ..... 58

G.A. SAVCHENKOVA, T.A. ARTAMONOVA, O.V. SHASHUNKINA

Research in Properties of a Nano-Modified Material of Abris Series ..... 63

S.A. ZHDANOK, E.N. POLONINA, S.N. LEONOVICH, B.M. KHRUSTALEV, E.A. KOLEDA

Strength Enhancement of Concrete with a Plasticizer on the Basis of Nano-Structured Carbon ..... 67

## Конкурс научных статей ГИПС — результаты научных исследований, технологии производства, применение в строительстве



Научно-технический и производственный журнал «Строительные материалы»<sup>®</sup>  
совместно с Российской гипсовой ассоциацией  
объявляют конкурс научных и научно-технических статей по гипсовой тематике.

**В конкурсе принимают участие статьи, опубликованные в журнале  
«Строительные материалы»<sup>®</sup> в 2018 г. по теме:**

1. Результаты научных исследований в области создания новых и оптимизации составов существующих гипсовых материалов в строительстве;
2. Технологии производства гипсовых материалов;
3. Техногенные гипсовые отходы и возможности их вовлечения в производство;
4. Применение гипсовых материалов в строительстве.

**К участию в конкурсе приглашаются**

магистранты, аспиранты, докторанты, соискатели ученой степени кандидата и доктора наук.

Заявки на участие в конкурсе и рукописи статей необходимо представлять в редакцию журнала «Строительные материалы»<sup>®</sup> в соответствии с требованиями редакции (см. [www.rifsm.ru](http://www.rifsm.ru) в разделе «Авторам») в срок до 20 июля 2018 г.

**В результате рассмотрения представленных рукописей статей и публикации их  
в журнале «Строительные материалы»<sup>®</sup> №8-2018 комиссия:**

- определяет лучшие статьи и объявляет победителей конкурса;
- награждает победителей конкурса дипломами лауреата;
- награждает победителей годовой подпиской на журнал «Строительные материалы»<sup>®</sup> 2019 г.



Дополнительная информация доступна на сайтах [www.rifsm.ru](http://www.rifsm.ru), [www.rosgips.ru](http://www.rosgips.ru)

Справки по тел.: **(499) 976-22-08, 976-20-36.**

Н.П. УМНЯКОВА, канд. техн. наук (n.umniakova@mail.ru)

Научно-исследовательский институт строительной физики РААСН (127238, Россия, г. Москва, Локомотивный пр., 21)

## Методика определения скорости движения частиц пыли в воздушном потоке в конструкции вентфасада

Рассмотрено движение загрязняющих частиц и частиц пыли в вентилируемой воздушной прослойке вентфасада. Приведено полученное автором уравнение для вычисления скорости движения частиц пыли в воздушной прослойке вентфасада в зависимости от скорости воздушного потока, размеров частиц пыли и их плотности. Установлено, что при числе Рейнольдса  $\leq 1$  скорость движения частиц пыли совпадает со скоростью движения воздушного потока; частицы пыли и загрязняющих веществ проникают в поверхностный слой утеплителя из минеральной ваты из базальтового волокна, в результате чего сорбционные свойства утеплителя у поверхности, обращенной в воздушную прослойку, и в толще теплоизоляционного слоя отличаются друг от друга. Однако при этом коэффициент теплопроводности утеплителя остается ниже расчетного значения.

**Ключевые слова:** скорость, частицы пыли, число Рейнольдса, вентфасад, воздушный поток, циркуляция воздуха.

**Для цитирования:** Умнякова Н.П. Методика определения скорости движения частиц пыли в воздушном потоке в конструкции вентфасада // *Строительные материалы*. 2018. № 6. С. 4–7.

N.P. UMNYAKOVA, Candidate of Sciences (Engineering) (n.umniakova@mail.ru)  
Scientific-Research Institute of Building Physics of the Russian Academy architecture and construction sciences  
(21, Lokomotivnyy Driveway, Moscow, 127238, Russian Federation)

### Method for Determining the Velocity of Dust Particles in the Air Flow in the Ventilated Facade Design

The motion of polluting particles and dust particles in ventilated air cavities of the ventilated facade is considered. The equation, derived by the author, for calculating the speed of movement of dust and polluting particles into the air gap of ventilated facade depending on the speed of air flow in the interlayer, dimensions of dust particles and their density, is given. It is established that at a Reynolds number  $\leq 1$  the velocity of dust particles coincides with the speed of the air flow; particles of dust and contaminants penetrate into the surface layer of the mineral wool insulation of basalt fibers as a result of which the sorption properties of the insulation near the surface, facing the air layer, and in the thickness of the thermal insulation layer differ from each other. However, the thermal conductivity of the heater remains below the design value.

**Keywords:** speed, dust particles, Reynolds number, cladding facade system, air flow, air circulation.

**For citation:** Umnyakova N.P. Method for determining the velocity of dust particles in the air flow in the ventilated facade design. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2018. No. 6, pp. 4–7. (In Russian).

Современные конструкции вентфасада имеют с наружной стороны различные облицовочные плиты – из керамогранита, натурального и искусственного камня, а также остекленные поверхности. Примем, что на уровне междуэтажных перекрытий в конструкции облицовки в нижней части вентилируемой прослойки расположены приточные отверстия и в верхней части – вытяжные отверстия. Из условий пожарной безопасности в конструкции вентфасада устанавливают противопожарные рассечки на уровне междуэтажного перекрытия. Известно, что в вентфасадах возникает естественная циркуляция воздуха в воздушной прослойке под действием ветрового  $\Delta p_{\text{ветер}}$  и гравитационного  $\Delta p_{\text{грав}}$  давлений. В.Н. Богословский [1] считает, что суммарное давление  $\Delta p$  следует определять по формуле:

$$\Delta p = \Delta p_{\text{ветер}} + \Delta p_{\text{грав}} \quad (1)$$

Ветровое давление  $\Delta p_{\text{ветер}}$  на наветренную поверхность равно разности давлений, возникающих от ветрового потока на входе в приточное отверстие и на выходе из вытяжного отверстия:

$$\Delta p_{\text{ветер}} = (n_1 - n_2) \frac{\rho v_n^2}{2}, \quad (2)$$

где  $n_1$  и  $n_2$  – аэродинамические коэффициенты на входе и выходе из вытяжного отверстия;  $v_n$  – скорость ветрового потока, м/с.

Гравитационное давление  $\Delta p_{\text{грав}}$  образуется вследствие разности плотностей наружного воздуха  $\rho_n$  и воздуха  $\rho_{\text{воз,пр}}^{\text{сп}}$  в вентилируемой воздушной прослойке:

$$\Delta p_{\text{грав}} = (\rho_n - \rho_{\text{воз,пр}}^{\text{сп}})gh, \quad (3)$$

где  $g$  – ускорение силы тяжести, м/с<sup>2</sup>;  $h$  – разность высоты между приточными и вытяжными отверстиями, м.

Надо отметить, что вместе с наружным воздухом в вентилируемую воздушную прослойку вентфасада попадают частицы пыли и загрязняющих веществ [2–5]. При этом будем считать, что плотность азота равняется 1,25 кг/м<sup>3</sup>; аргона 1,782 кг/м<sup>3</sup>; бутана 1,976 кг/м<sup>3</sup>; диоксида серы 2,927 кг/м<sup>3</sup>; диоксида углерода 1,976 кг/м<sup>3</sup>; метана 0,717 кг/м<sup>3</sup>; окиси углерода 1,25 кг/м<sup>3</sup>; пропана 2,02 кг/м<sup>3</sup>; пропилена 1,914 кг/м<sup>3</sup>; сероводорода 1,539 кг/м<sup>3</sup>; хлора 3,217 кг/м<sup>3</sup>; этилена 1,261 кг/м<sup>3</sup>, а также учтем плотность частиц пыли тяжелых металлов – свинца от 57 до 100 мг/м<sup>3</sup>; цинка от 132 до 180 мг/м<sup>3</sup>; меди от 22 до 53 мг/м<sup>3</sup>; никеля от 14 до 23 мг/м<sup>3</sup>; кобальта от 6 до 10 мг/м<sup>3</sup>.

Для нашей поставленной задачи требуется найти скорость движения частицы пыли вверх в воздушном потоке вентилируемой воздушной прослойки. Решение этой задачи начнем с определения критерия Рейнольдса  $Re$  в зависимости от скорости движения воздушного потока  $v_{\text{воз,пот}}$  и диаметра частиц пылинок  $d_{\text{ч.п}}$ .

Известно, что жидкие капли (туман и облака), антропогенные, и природной пыли (пыльца растений, порошкообразные материалы) имеют различные формы в виде шара, цилиндра, пластины и т. д. В работе В. Л. Истомина и К.П. Куценогова [6] приведены результаты определения диаметра аэрозольных частиц сложной формы. Установлено, что они имеют сферические форму и диаметр от 38 до 130 мкм (рис. 1)[6].

Рассмотрим движение частицы пыли в вентилируемой воздушной прослойке вентфасада и определим

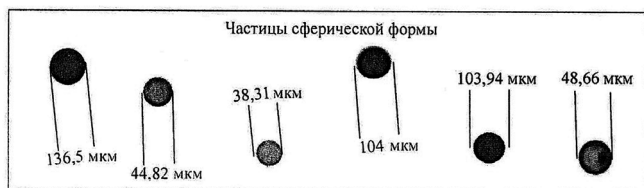


Рис. 1. Форма частиц пыли и их размеры, увеличенные в десятки раз.

критерий Рейнольдса для различных ее диаметров. Критерий Рейнольдса для движущейся частицы пыли диаметром от 10 до 50 мкм в воздушном вертикальном потоке определим по выражению:

$$Re = d_{ч.п} v_{воз.пот} / \nu_{воз.пот} \quad (4)$$

где  $d_{ч.п}$  — диаметр частицы пыли, мкм;  $v_{воз.пот}$  — скорость воздушного потока, м/с;  $\nu_{воз.пот}$  — кинематическая вязкость воздуха, м<sup>2</sup>/с.

Как показали выполненные расчеты для скорости частиц от 0,1 до 0,8 м/с и диаметра частиц пыли от 10 до 50 мкм критерий Рейнольдса находится в пределах  $0 < Re \leq 1$ . Начиная с  $d_{ч.п} = 45$  мкм и  $v_{ч.п} = 0,7-0,8$  м/с при температуре воздуха  $t_{в} = -20^{\circ}\text{C}$  и  $t_{г} = 0^{\circ}\text{C}$  наблюдается незначительное превышение  $Re$ . Только для  $d_{ч.п} = 50$  мкм и температуры воздуха  $t_{в} = -20^{\circ}\text{C}$ ,  $t_{г} = 0^{\circ}\text{C}$  и  $t_{в} = 20^{\circ}\text{C}$  при  $v_{ч.п} = 0,5$  м/с критерий  $Re = 1$ .

Определим скорость движения частиц пыли вверх с воздушным потоком вентилируемой воздушной прослойки. Для этого рассмотрим частицы пыли размером  $d_{ч.п}$  от 10 до 50 мкм и остановимся на скоростях воздушного потока  $v_{ч.п}$  0,1 до 0,8 м/с [7]. В расчетах базируясь на данных авторов [6, 8–10] примем шарообразную форму частицы пыли. Критерий Рейнольдса для принятых частиц пыли условий находится в пределах  $0 < Re \leq 1$ . Перемещение частиц пыли в воздушном потоке будет происходить в зависимости от плотности частиц пыли  $\rho_{ч.п}$  и плотности воздуха  $\rho_{воз.пот}$ , а также скоростей  $v_{ч.п}$  и  $v_{воз.пот}$ , которое обусловлено действием лобовой силы  $R_x$ . Эту зависимость при  $v_{воз.пот} > v_{ч.п}$  можно записать в следующем виде:

$$R_x = C' \times \frac{\pi d_{ч.п}^2}{4} \times \rho_{воз.пот} \frac{(v_{воз.пот} - v_{ч.п})^2}{2}, \quad (5)$$

где  $C'$  — коэффициент аэродинамического сопротивления характеризуется числом  $Re = \frac{(v_{воз.пот} - v_{ч.п}) d_{ч.п}}{\nu}$ .

Для рассматриваемых частиц пыли при числе Рейнольдса  $0 < Re \leq 1$  величина  $C'$  определяется по формуле Стокса:

$$C' = \frac{24}{Re} = \frac{24 \nu}{(v_{воз.пр} - v_{ч.п}) d_{ч.п}} \quad (6)$$

При решении задачи движения частиц пыли вверх для вертикального воздушного потока остановимся на предложенной Н.С. Сорокиным и В.Н. Талиевым [10] формуле, когда частица пыли весом  $mg$  поднимается вверх воздушным потоком со скоростью  $v_{воз.пот}$ :

$$R_x - mg = m \frac{dv_{ч.п}}{dt}, \quad (7)$$

где  $g$  — ускорение силы тяжести, м/с<sup>2</sup>;  $\theta$  — время, с.

Однако решение уравнения (7) для определения скорости движения частицы пыли вверх с воздушным потоком в работах [10] не приводится. В уравнении (7) не учитывается и плотность воздушного потока  $\rho_{воз.пот}$ .

В связи с этим, окончательное его решение для определения скорости движения вверх воздушного потока с частицами пыли автором получено в следующем виде:

$$v_{ч.п} = v_{воз.пр} - \frac{g d_{ч.п}^2 \rho_{ч.п}}{18 \nu \rho_{воз.пр}}, \quad (8)$$

где  $v_{воз.пр}$  — скорость воздуха в вентилируемой воздушной прослойке, м/с;  $g$  — ускорение силы тяжести, м/с<sup>2</sup>;  $d_{ч.п}$  — диаметр частицы пыли, мкм;  $\nu$  — кинематическая вязкость воздуха, м<sup>2</sup>/с;  $\rho_{ч.п}$  — плотность частицы пыли, кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_{воз.пот}$  — плотность воздушного потока, кг/м<sup>3</sup>.

Проведенный анализ результатов расчета согласно уравнению (8) для условий  $0 < Re \leq 1$  позволил получить следующую закономерность. Попавшие вместе с наружным воздухом частицы пыли через приточное отверстие в вентилируемую воздушную прослойку под действием ветрового и гравитационного напора поднимаются вверх. В ней вместе с воздушным потоком при скорости от 0,1 до 0,8 м/с происходит движение частиц пыли диаметром от 10 до 50 мкм. Установлено, что скорость воздушного потока  $v_{воз.пот}$  и скорость частиц пыли  $v_{ч.п}$  в рассматриваемых пределах практически одинаковы. Такая закономерность просматривается при температуре воздуха в вентилируемой воздушной прослойке  $t_{воз.пр} = -20^{\circ}\text{C}$ ;  $t_{воз.пр} = 0^{\circ}\text{C}$  и  $t_{воз.пр} = 20^{\circ}\text{C}$ .

Надо отметить, что при движении воздушного потока вверх какое-то количество частиц пылинок через вытяжные отверстия вентфасада вместе с потоком воздуха выходит наружу, а другое их количество будет оседать на поверхностях конструкции вентилируемой воздушной прослойки. На неровной и шероховатой поверхности минераловатной плиты из каменного волокна будет больше «прилипших» частиц пыли, чем на гладкой поверхности керамогранита. При изменении ветрового потока скорость частиц пыли может оказаться выше скорости воздушного потока, и они будут «сдуваться» с поверхности минплиты. Кроме того, какая-то часть пыли проникнет в незамкнутые поры минераловатной плиты из каменного волокна плотностью 100 кг/м<sup>3</sup>. В отношении этих процессов Н.А. Фукс [11] считает, что этот процесс сложен и мало изучен. Поэтому механизм столкновения и вероятность при-



Рис. 2. Поверхность минераловатного утеплителя из каменной ваты, обращенная в воздушную прослойку вентфасада

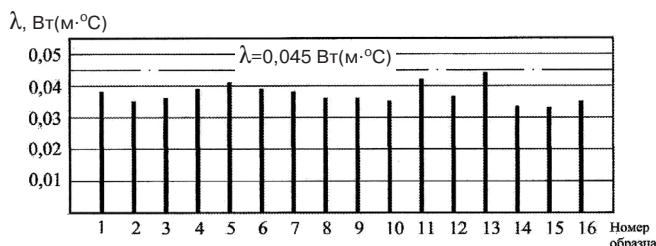


Рис. 3. Коэффициенты теплопроводности образцов минераловатного утеплителя из каменной ваты, взятые при вскрытии вентфасада, находящегося 14 лет в эксплуатации. Темная поверхность справа — запыленная поверхность утеплителя через 14 лет эксплуатации; светлая поверхность слева — новый утеплитель, установленный вместо взятого на исследования утеплителя

**Экспериментальные данные  
максимальной сорбционной влажности утеплителя  
из минеральной ваты на основе каменного волокна  
из поверхности, обращенной в воздушную прослойку,  
и в его толще по данным Н.П. Умняковой [12]**

Название материала	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Время эксплуатации, лет	Максимальная сорбционная влажность, %	
			у наружной поверхности	в толще утеплителя
Утеплитель из минеральной ваты на основе каменного волокна	70	14	4,02	2,83
Утеплитель из минеральной ваты на основе каменного волокна	70	12	3,71	2,58
Утеплитель из минеральной ваты на основе каменного волокна	100	5	1,92	1,4

липания не представляется возможным рассчитать даже в первом приближении. Его возможно определить лишь из условий эксперимента.

В связи с этим автором были проведены вскрытия конструкции вентфасадов, находящихся в эксплуатации более 14 лет, проведены их визуальные обследования (рис. 2), взяты пробы минераловатного утеплителя из каменной ваты для определения теплозащит-

ных (рис.2, 3) [12] и сорбционных свойств (рис. 4) [13], а также получены материалы по содержанию в порах минераловатных плит химических соединений [14–15].

Комплексные лабораторные исследования образцов плит из минеральной ваты на основе базальтового волокна показали, что коэффициент теплопроводности всех образцов меньше расчетного значения (рис.3)

Анализ результатов измерений относительной влажности образцов утеплителей показал, что влажность всех образцов, взятых в октябре, декабре и в конце февраля–начале марта, колеблется от 0,26 до 0,65%, т. е. составляет менее 1%, что значительно ниже расчетной влажности, рекомендуемой для условий эксплуатации Б (условия г. Москвы). Сорбционные свойства минераловатного утеплителя на основе каменного волокна у поверхности, обращенной в воздушную прослойку вентфасада, и в толще теплоизоляционного слоя несколько отличаются друг от друга (таблица).

Таким образом, на основе анализа результатов теоретических и экспериментальных исследований установлено, что частицы загрязняющих веществ и пыли, попадающие в вентилируемую воздушную прослойку вентфасада, оседают не только на поверхности, но и проникают в толщу утеплителя из минеральной ваты на основе каменного волокна. В результате сорбционные свойства утеплителя, находящегося у поверхности, обращенной в воздушную прослойку вентфасада, отличаются от сорбционных свойств в толще плит утеплителя. Однако, движение воздуха в вентилируемой воздушной прослойке оказывает благоприятное воздействие на влажностное состояние утеплителя, способствует удалению влаги из него, благодаря чему его теплозащитные свойства не меняются в течение нескольких лет эксплуатации.

**Список литературы**

1. Богословский В.Н. Строительная теплофизика (теплофизические основы отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха). М.: АВОК, 2013. 416 с.
2. Ветошкин А.Г. Основы инженерной защиты окружающей среды. М.: Инфа-Инженерия, 2016. 456 с.
3. Азаров В.Н., Маринин Н.А., Жоголева Д.А. Об оценке мелкодисперсной пыли (PM2,5 и PM10) в атмосфере городов // *Известия Юго-Западного государственного университета*. 2011. № 5 (38). Ч. 2. С. 144–149.
4. Чмыхалова С.В. Ресурсно-экологические проблемы больших городов и пути их решения. М.: Горная книга, 2012. 328 с.
5. Соболев А.А., Мельников Н.А., Тютюнник Л.О. Движение частиц пыли в воздушном потоке. *Вектор науки Тольяттинского государственного университета*. 2011. № 3 (17). С. 82–86.
6. Истомин В.Л., Куценогий К.П. Методика определения аэродинамического диаметра аэрозольных частиц сложной геометрической формы в диапазоне числе Рейнольдса от 0,1 до 6,0. *Теплофизика и аэродинамика*. 2010. Т. 17. № 1. С. 77–83.
7. Архипов В.А., Усанина А.С. Движение частиц дисперсной фазы в несущей среде. Томск: Издательский Дом Томского государственного университета, 2014. 252 с.
8. Пирумов А.И. Обеспыливание воздуха. М.: Стройиздат, 1974. 296 с.
9. Грин Х., Лейн Н. Аэрозоли – пыли, дыма и тумана. М.: Химия, 1972. 482 с.

**References**

1. Bogoslovsky V.N. Stroitel'naya teplofizika (teplofizicheskie osnovy otopleniya, ventilyacii i kondicionirovaniya vozduha) [Building Thermophysics (thermophysical fundamentals of heating, ventilation and air conditioning)]. Moscow: AVOK. 2013. 416 p.
2. Vetoshkin A.G. Osnovy inzhenernoj zashchity okruzhayushchej sredy [Fundamentals of engineering environmental protection]. Moscow: Infa-Engineerya. 2016. 456 p.
3. Azarov V.N., Marinin N.A., Zhogoleva D.A. On the evaluation of fine dust (PM2.5 and PM10) in the atmosphere of cities. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo State University*. 2011. No. 5 (38). Part 2, pp.144–149. (In Russian).
4. Chmykhalova S.V. Resursno-ekologicheskie problemy bol'shikh gorodov i puti ih resheniya [Resource-ecological problems of large cities and ways to solve them]. Moscow: Gornaya kniga, 2012. 328 p.
5. Soboлев A.A., Melnikov N.A., Tyutyunnik L.O. Movement of dust particles in the air stream. *Vektor nauki Tol'yatinskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2011. No. 3 (17), pp. 82–86. (In Russian).
6. Istomin V.L., Kutsenogiy K.P. A technique for determining the aerodynamic diameter of aerosol particles of a complex geometric shape in the Reynolds number range from 0.1 to 6.0. *Teplofizika i aehrodinamika*. 2010. Vol. 17. No. 1, pp 77–83. (In Russian).
7. Arkhipov V.A., Usanina A.S. Dvizhenie chastic dispersnoj fazy v nesushchej srede [Movement of dispersed phase particles in a carrier medium]. Tomsk: Izdatel'skij Dom Tomskogo gosudarstvennogo universiteta, 2014. 252 p.
8. Pirumov A.I. Obespylevanie vozduha [Debris from the air]. Moscow: Stroizdat, 1974. 296 p.



10. Сорокин Н.С., Талиев В.Н. Аспирация машин и пневмотранспорта в текстильной промышленности. М.: Легкая индустрия, 1978. 215 с.
11. Фукс Н.А. Успехи механики аэрозолей. М.: АН СССР, 1961. 161 с.
12. Умнякова Н.П. Теплозащитные свойства навесных эксплуатируемых фасадных конструкций // *Жилищное строительство*. 2011. № 2. С. 2–6.
13. Умнякова Н.П. Сорбция водяного пара минераловатного утеплителя в эксплуатируемых вентфасадах // *Жилищное строительство*. 2013. № 3. С. 50–52.
14. Умнякова Н.П. Особенности эксплуатации конструкции вентфасадов в крупных мегаполисах // *ACADEMIA. Архитектура и строительство*. 2010. № 3. С. 315–323.
15. Умнякова Н.П. Элементы навесных вентилируемых фасадов, определяющие их теплозащитные качества // *ACADEMIA. Архитектура и строительство*. 2009. № 5. С. 372–380.
9. Gri H., Lane N. Aehrozoli – pyli, dyma i tumana [Aerosols – dust, smoke and fog]. Moscow: Himiya, 1972. 482 p.
10. Sorokin N.S., Taliev V.N. Aspiraciya mashin i pnevмотранспорта v tekstil'noj promyshlennosti [Aspiration of machines and pneumatic transport in the textile industry]. Moscow: Legkaya industriya, 1978. 215 p.
11. Fuks N.A. Uspekhi mekhaniki aehrozolej [Advances in the mechanics of aerosols]. Moscow: AN SSSR, 1961. 161 p.
12. Umnyakova N.P. Thermal protective properties of hinged operated facade structures. *Zhilishchnoe Stroitel'stvo* [Housing Construction]. 2011. No. 2, pp. 2–6. (In Russian).
13. Umnyakova N.P. Sorption of water vapor mineral wool insulation in operated ventilated facades. *Zhilishchnoe Stroitel'stvo* [Housing Construction]. 2013. No. 3, pp. 50–52. (In Russian).
14. Umnyakova N.P. Features of the exploitation of the design of ventilated facades in large metropolitan areas. *ACADEMIA. Arhitektura i stroitel'stvo*. 2010. No. 3, pp. 315–323.
15. Umnyakova N.P. Elements of hinged ventilated facades, determining their heat-shielding qualities. *ACADEMIA. Arhitektura i stroitel'stvo*. 2009. No. 5, pp. 372–380

## СПЕЦИАЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

### В издательстве «Стройматериалы» вы можете приобрести специальную литературу

#### Монография «Защита деревянных конструкций»

Автор – Ломакин А.Д.

Приведены результаты исследований и рекомендации по конструкционной и химической защите деревянных конструкций. Особое внимание уделено защите несущих клееных деревянных конструкций и конструкций из ЛВЛ от эксплуатационных воздействий и возгорания. Описаны традиционные и разработанные автором методы оценки защитных свойств покрытий для древесины, методика и результаты натуральных климатических испытаний покрытий на образцах и фрагментах конструкций. Представлены результаты мониторинга влажностного состояния несущих ДКК в таких крупных объектах, как ЦВЗ «Манеж», крытый конькобежный центр в Крылатском в Москве и др., при проведении которого использована разработанная автором методика оценки древесины с использованием модельных образцов.



#### Книга «Химическая технология керамики»

Авторы – коллектив ученых РХТУ им. Д.И. Менделеева, под редакцией И.Я. Гузмана.

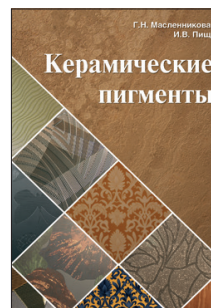
В пособии освещены вопросы современного состояния технологии основных видов керамических изделий строительного, хозяйственно-бытового и технического назначения, а также различных видов огнеупоров. Книга соответствует программе общего курса химической технологии керамики и огнеупоров при наличии также курсов соответствующих специализаций. Подробно изложены характеристика сырья, проблемы подготовки керамических масс и их формование, особенности механизмов спекания, а также дополнительные виды обработки керамики: металлизация, глазурование, декорирование, механическая обработка. Описаны механические, деформационные, теплофизические, электрофизические свойства керамических изделий, в том числе при высокой температуре.



#### Книга «Керамические пигменты»

Авторы – Масленникова Г.Н., Пищ И.В.

В монографии рассмотрены физико-химические основы синтеза пигментов, в том числе термодинамическое обоснование реакций, теория цветности, современные методы синтеза пигментов и их классификация, методы оценки качества. Приведены сведения по технологии пигментов и красок различных цветов и кристаллических структур. Описаны современные методы декорирования керамическими красками изделий из сортового стекла, фарфора, фаянса и майолики. Книга предназначена для научных сотрудников, студентов, специализирующихся в области технологии керамики и стекла, а также для инженерно-технических работников, занятых в производстве керамических изделий и красок.



**Заказать литературу можно через редакцию, направив заявку произвольной формы по факсу: (499) 976-22-08, 976-20-36; e-mail: mail@rifsm.ru, или оформить заявку на сайте www.rifsm.ru**

В.Г. ГАГАРИН<sup>1,2</sup>, д-р техн. наук, чл.-кор. РААСН (gagarinv@yandex.ru);  
С.В. ГУВЕРНЮК<sup>1,3</sup>, канд. физ.-мат. наук

<sup>1</sup> Научно-исследовательский институт строительной физики РААСН (127238, г. Москва, Локомотивный проезд, 21)

<sup>2</sup> Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (129337, г. Москва, Ярославское ш., 26)

<sup>3</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова (119991, г. Москва, Ленинские горы, 1)

## Проблемы определения динамических нагрузок на облицовочный слой навесных фасадных систем при ветровых порывах

Разработаны требования к методике определения динамических нагрузок на облицовочный слой ограждающих конструкций зданий с навесными фасадными системами (НФС) при ветровых порывах. Распределение *внешнего* ветрового давления на облицовочном слое фасадов с НФС не зависит от процессов перетекания внутри воздушных зазоров НФС. Это обусловлено малостью степени проницаемости облицовочного слоя во всех практически значимых случаях. Поэтому задача определения внешнего ветрового давления – это независимо решаемая задача известными общепринятыми способами. Однако знание местного ветрового давления на *внешней* стороне облицовочного слоя НФС еще ничего не говорит о величине ветровой нагрузки на собственно облицовочный слой, поскольку *внутреннее* давление в вентилируемом зазоре НФС определяется интегральным балансом втекания и вытекания воздуха во всех сообщающихся подоблицовочных объемах. Это означает, что любые попытки назначать величину местного внутреннего давления по известной величине внешнего давления – некорректны. Внутреннее давление – не локальный, а интегральный параметр. Для его определения необходимо применять математический подход подсчета балансов втекающего и вытекающего воздуха в нестационарных условиях и в зависимости от условий загромождения проточных объемов в подоблицовочном слое НФС. Постановка задачи должна включать возможность учета эффекта запаздывания при релаксации внутреннего давления в подоблицовочном слое НФС под действием резко изменяющегося во времени внешнего давления на фасадах объекта при ветровых порывах.

**Ключевые слова:** строительная аэродинамика, приземный пограничный слой, вихревой след, ветровой порыв, навесные фасадные системы, воздухопроницаемость, нестационарные аэродинамические нагрузки, аэрофизическое моделирование.

**Для цитирования:** Гагарин В.Г., Гувернюк С.В. Проблемы определения динамических нагрузок на облицовочный слой навесных фасадных систем при ветровых порывах // *Строительные материалы*. 2018. № 6. С. 8–12.

V.G. GAGARIN<sup>1,2</sup>, Doctor of Sciences (Engineering), Corresponding member of RAACS (gagarinv@yandex.ru);  
S.V. GUVERNYUK<sup>1,3</sup>, Candidate of Sciences (Physics and Mathematics)

<sup>1</sup> Scientific-Research Institute of Building Physics of the Russian Academy architecture and construction sciences (21, Lokomotivniy Driveway, Moscow, 127238, Russian Federation)

<sup>2</sup> National Research Moscow State University of Civil Engineering (26, Yaroslavl Highway, Moscow, 129337, Russian Federation)

<sup>3</sup> Lomonosov Moscow State University (GSP-1, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russian Federation)

### Problems of Dynamic Load Determination on a Facing Layer of Hinged Facade Systems in Wind Runs

The requirements to the method of determining the dynamic loads on the facing layer of enclosing structures of the building with suspended facade systems (SFS) under wind gusts are developed. The distribution of the *external* wind pressure on the facing layer of the facades with SFS does not depend on the processes of flowing inside the air gaps of SFS. This is due to the low degree of permeability of the facing layer in all practically significant cases. Therefore, the problem of determining the external wind pressure is a problem independently solved by known conventional methods. However, the knowledge of local wind pressure on the *outer* side of the SFS facing layer does not yet indicate the value of the wind load on the facing layer itself, since the *internal* pressure in the ventilated gap of the SFS is determined by the integral balance of the air flows in and out in all communicating sub-facing volumes. This means that any attempt to set a value of local internal pressure by the known value of external pressure is incorrect. Internal pressure is not a local, but an integral parameter. To determine it, it is necessary to apply a mathematical approach to calculating the balances of the inflowing and outflowing air under non-stationary conditions and depending on the conditions of the congestion of flow volumes in the sub-facing layer of the SFS. The formulation of the problem should include the possibility of taking into account the effect of delay when relaxing the internal pressure in the sub-facing layer of the SFS under the influence of sharply changing in time external pressure on the facades of the object with wind gusts.

**Keywords:** building aerodynamics, surface boundary layer, vortex wake, wind gust, suspended facade systems, air permeability, non-stationary aerodynamic loads, aero-physical simulation.

**For citation:** Gagarin V.G., Guvernuyuk, S.V. Problems of dynamic load determination on a facing layer of hinged facade systems in wind runs. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2018. No. 6, pp. 8–12. (In Russian).

В строительной практике в качестве ограждающих конструкций активно применяются навесные вентилируемые фасады. В нашей стране навесные вентилируемые фасадные системы (НФС) применяются сравнительно недавно, однако уже накоплен значительный опыт их практического использования. Проведены исследования теплофизических процессов, протекающих в НФС, предложены методы инженерного расчета влажностного состояния. Навесные вентилируемые фасадные системы способны обеспечить требуемый отечественными нормами уровень теплозащиты. Помимо

этого ограждающие конструкции с вентилируемой воздушной прослойкой выполняют следующие функции:

- предотвращение перегрева конструкций солнечной радиацией;
- обеспечение шумоизоляции помещений здания;
- защита конструкций от увлажнения атмосферной влагой;
- представление внешнего облика строительного сооружения.

Важной также является задача определения силового воздействия ветра на облицовочный слой НФС. На

практике наблюдаются многочисленные случаи выпадения плиток облицовки высотных зданий, что представляет большую угрозу безопасности эксплуатации НФС. Ветровая нагрузка зависит от перепада давления на внешней и внутренней поверхностях НФС. Внешнее давление традиционно определяется с помощью приближенных нормативных инженерных методик (СП 20.13330.2011) с привлечением данных аэрофизического эксперимента (в аэродинамической трубе) или, в последнее время – компьютерного моделирования (ГОСТ Р 56728–2015 «Здания и сооружения. Методика определения ветровых нагрузок на ограждающие конструкции»). В НИИСФ РААСН совместно с НИИ механики МГУ разработаны теоретические подходы и получены экспериментальные данные для определения динамических эффектов при воздействии воздушных ветровых порывов на облицовочный слой навесных фасадных систем. На этой основе предложены методики расчета параметров, определяющих безопасность функционирования ограждающих конструкций зданий с НФС при ветровых порывах различной природы (естественные атмосферные вихревые включения в настиляющем ветре или вторичные вихревые структуры при аэродинамической интерференции расположенных рядом объектов).

Следует отметить, что в настоящее время строительные нормы и стандарты не определяют почти никаких правил для расчета нагрузки на проницаемые фасады. Ветровые нагрузки на проницаемые ограждения фасадов задают как разность между внешним давлением и условным ориентировочным давлением внутри полости. При этом, если способы определения внешнего давления содержатся в строительных нормах для широкого круга строительных конструкций, то для определения внутреннего давления в полости под проницаемой облицовкой и, соответственно, для разности давления имеются лишь общие предположения. Конструкции панелей и креплений рассчитываются путем простого применения коэффициентов внешнего давления.

#### **Особенности функционирования ограждающих конструкций зданий с навесными фасадными системами (НФС)**

Вентилируемый фасад представляет собой конструкцию, состоящую из материалов облицовки (плит или листовых материалов) и подоблицовочной конструкции, которая крепится к стене таким образом, чтобы между облицовкой и стеной образовалась вентилируемая воздушная прослойка. Для дополнительного утепления ограждающей конструкции между стеной и облицовкой размещается теплоизоляционный слой – в этом случае воздушная прослойка образуется между облицовкой и теплоизоляцией. Такая схема является оптимальной, так как слои различных материалов до воздушной прослойки располагаются по мере уменьшения коэффициентов теплопроводности и увеличения коэффициентов паропроницаемости.

Облицовочные материалы в конструкции вентилируемого фасада выполняют защитно-декоративную функцию. Они защищают утеплитель, подоблицовочную конструкцию и стену здания от повреждений и атмосферных воздействий. В то же время облицовочные панели являются внешней оболочкой здания, формируют его эстетический облик. В настоящее время существует большой выбор фасадных панелей для облицовки стен здания. Кроме внешнего вида они различаются по материалу, размеру, типу крепления и т. д. Материалы, применяемые для изготовления панелей, могут быть разные, причем этот список постоянно пополняется: металлы, композитные материалы, бетоны, фиброце-

менты (цементно-волокнистые материалы), керамический гранит, а также стекла со специальным покрытием, ламинаты высокого давления и т. д.

С точки зрения аэродинамики основными характеристиками облицовочного слоя являются размеры щелевых отверстий между облицовочными элементами, общая площадь щелевых отверстий по отношению к общей площади фасада, жесткость облицовочных элементов. В работах [1, 2] представлены результаты методических исследований на экспериментальной установке и натурном объекте влияния перечисленных параметров на характер изменения перепада давления в воздушном зазоре вентилируемого фасада в условиях квазистационарного обтекания постоянным ветровым потоком.

Большое значение для правильного функционирования навесных фасадных систем, помимо многих свойств строительных материалов, имеют аэродинамические характеристики строительного объекта. В результате ветровых воздействий формируется переменное распределение внешнего давления по облицовке фасадов. В свою очередь, под действием градиентов внешнего давления возникает внутреннее течение в воздушном зазоре навесных конструкций и вырабатывается отличное от внешнего внутреннее распределение давления.

Перепад внешнего и внутреннего давления определяет нагрузку, прижимающую или отрывающую облицовочные плиты навесных фасадов. Важным методическим моментом при расчете нагрузок на облицовку является возможность определять внешнее давление независимо от внутреннего течения в зазорах. Это обусловлено относительной малой площадью просветов между плитами облицовки – менее 2%. Столь малая проницаемость не оказывает заметного влияния на распределение внешнего давления. В этом смысле задачи внешней аэродинамики здания со сплошным или проницаемым фасадом тождественны.

Внешнее давление определяется геометрической конфигурацией строительного сооружения и параметрами набегающего ветрового потока. Внутреннее давление существенно зависит от распределения по периметру фасадов внешнего давления и от массообменных процессов, происходящих между внешней средой и внутренней прослойкой. Наименьшие ветровые нагрузки элементы облицовки будут испытывать только в том случае, если выравнивание давления внутри воздушной прослойки будет происходить локально, в области размещения рассматриваемого элемента, а не по всей прослойке в целом. Т. е. необходимо избегать перетекания воздушных масс в областях высокого градиента внешнего давления. Это главный принцип работы системы выравнивания внешнего и внутреннего давления, позволяющий в некоторых случаях значительно уменьшить нагрузку на облицовочный слой, а, следовательно, и на подконструкцию вентилируемого НФС.

Загромождения воздушной прослойки элементами подоблицовочной конструкции могут оказывать существенное влияние на характеристики течения воздуха внутри прослойки и продольную фильтрацию воздуха в подконструкциях НФС.

#### **Проблемы определения динамических нагрузок при ветровых порывах**

Государственный стандарт ГОСТ Р 53613–2009 определяет понятие порыв ветра следующим образом. Ветер в приземном слое атмосферы зависит от возможного местного нагрева вследствие солнечного излучения и неровностей на поверхности земли, включая всевозможные строения и другие препятствия. Итогом этих местных условий является возникновение тепловых и механических вихрей в результате трения и сдвига

ветра. В дневное время движение воздуха в приземном слое атмосферы является результатом воздействия тепловых и механических вихрей, в ночное время, как правило, — только механических. Влияние этих вихрей на ветер в приземном слое атмосферы приводит к образованию порывов ветра. Продолжительность этих порывов распределяется по случайному закону, но в основном находится в пределах нескольких секунд. Сила, с которой ветер действует на конструкцию, является функцией средней скорости ветра, а также размеров и конфигурации объекта. Порывы ветра вызывают короткие импульсы силы, которые в некоторых случаях могут быть периодическими и создавать вибрацию с большой амплитудой в случае наступления резонанса.

В стандарте ГОСТ 21964—76 количественная характеристика порывов ветра представляется как средняя квадратическая скорость порывов ветра и измеряется в м/с.

В стандартах разных стран интенсивность пульсирующей составляющей рассматривается с разной степенью подробности. Помимо скорости ветра во время порыва предлагается рассматривать и частоту следования порывов в натуральных условиях. Частота следования вихрей определяет возможность возникновения резонансных колебаний здания или элементов конструкции здания. Так в Еврокоде EN 1991-1-4 (2005) скорость ветра в порыве зависит от высоты над уровнем земли. Частота следования порывов согласуется с характером турбулентности ветра в реальных условиях в заданной местности. Сравнение национальных строительных норм с точки зрения интенсивности пульсаций ветра представлено в работе [3]. В основном, при рассмотрении периодичности ветровых порывов изучается возможность возникновения резонансных колебаний. Порыв ветра рассматривается как статистическая характеристика турбулентности, а ветровая нагрузка усреднена по всей обдуваемой площади.

Известны результаты исследования навесных фасадов на зданиях, находящихся в эксплуатации несколько лет. В работе [4] принято, что основная причина разрушения навесных фасадов — возникновение колебаний на резонансной частоте. Кроме того обнаружено, что основные разрушения происходят вблизи от углов здания. Локализация интенсивных разрушений вблизи этой зоны вызвана характером конструкции навесных фасадов.

Характеристику ветровых порывов наиболее тщательно исследуют авиационные специалисты. В авиации необходимо контролировать скорость увеличения нагрузки на летательный аппарат при ветровых порывах для обеспечения конструктивной прочности изделий. Метеорологические наблюдения за погодой не могут предоставить достоверной информации о скорости изменения ветра, поскольку стандартным прибором служит инструмент с нормой отклика по времени более 1 с (лопастные анемометры). Порывами называются потоки с быстро нарастающей скоростью, то есть имеющие большой градиент  $W/L$ , где  $W$  — максимальная скорость порыва,  $L$  — длина зоны нарастания порыва [5]. Обычно существует конечный участок нарастания интенсивности, на котором происходит быстрое изменение интенсивности порыва. Чаще всего это изменение характеризуется постоянным градиентом, что позволяет описать участок изменения интенсивности порыва простой линейной зависимостью. В ряде измерений структуры натуральных вихревых порывов получено, что на графике скорости наиболее резким является передний фронт. Для учета этого свойства в лабораторных условиях применяются разнообразные конструкции вихрегенераторов. Одним из распространённых вариантов служит стандартный профиль крыла, в следе за которым возникает периодическая цепочка интенсивных вихрей.

Отличие навесных фасадов состоит в том, что воздух извне постоянно циркулирует через находящийся между облицовкой и слоем теплоизоляции воздушный зазор [6]. Если при проведении расчетов учитывать усредненные распределения внешнего и внутреннего давления, то существенной разницы давления между воздухом извне и воздухом, циркулирующим в воздушном зазоре, практически не возникает (принцип сообщающихся сосудов), в результате получается, что облицовка НФС не подвергается существенному воздействию ветровых нагрузок. Но необходимо учитывать, что соотношение показателей давления и потока ветра — величины непостоянные, находящиеся при этом в зависимости от распределения давления на внешние стены, которое, в свою очередь, зависит, от силы ветра. Таким образом, разница давления на облицовке возникает неизбежно.

При определении ветровой нагрузки на конструкцию вентилируемого фасада важно учитывать процесс выравнивания давления между внешней стороной облицовки и внутренней полостью. В работе [7], посвященной исследованию формирования перепада давления в конструкции навесного фасада, утверждается, что для пиковых давлений, самый большой перепад возникает вблизи передней кромки, но для ветровых нагрузок на проницаемые фасады имеет значение градиент давления в зонах отрыва на боковых гранях здания. Причина возникновения движения воздуха во внутренних пространствах навесных фасадов и характер этого движения рассматривается также в работе [8].

В большинстве представленных работ исследование проводилось в квазистационарном (постоянном или градиентном) потоке в аэродинамических трубах. При этом в ряде случаев отмечалось, что импульсные нагрузки от порывов ветра могут вызывать существенно большие перепады давления. Известны экспериментальные данные [9], показывающие, что основным механизмом формирования больших пиковых перепадов давления на облицовке НФС является запаздывание подстройки внутреннего давления в подконструкции НФС к резким изменениям распределения внешнего давления, вызванным воздействием ветрового порыва. Однако это обстоятельство еще никак не отражено в существующих нормативах для оценки нагрузок на навесные фасадные системы с проницаемыми элементами.

Применяемые в настоящее время в строительной аэродинамике современные компьютерные технологии моделирования турбулентных течений около зданий и комплексов [10—17] основаны на использовании модели вязкой (редко — идеальной) несжимаемой жидкости постоянной плотности. Это вполне оправдано при решении задач внешнего обтекания (ввиду того, что скорость моделируемых ветровых потоков не превышает уровня 50 м/с), а также при описании установившихся внутренних течений в условиях стационарных распределений внешнего давления (скорость внутри воздушной прослойки НФС, как правило, намного меньше скорости внешнего обтекания фасадов здания). Однако принципиально не позволяет учесть отмеченный выше эффект запаздывания при формировании внутренних распределений давления в конструктивном слое НФС при нестационарном внешнем давлении. Данный парадокс объясняется тем, что внутреннее движение происходит в стесненных объемах, давление в которых управляется балансом втекающего и вытекающего воздуха через узкие щели облицовочного слоя НФС (и, частично, перетеканием между соседними участками внутри конструктивного слоя НФС). А расход через проницаемый облицовочный слой, в свою очередь, зависит от нестационарного перепада внутреннего и внешнего давления. Учет данный механизм в рамках модели несжимаемой жидкости невозможно. Поэтому требуется

учитывать эффекты сжимаемости воздушной среды внутри конструктивного слоя НФС, в то время, как внешнее обтекание, по-прежнему, можно описывать в рамках модели несжимаемой жидкости.

Разработаны математические подходы и математическая модель в виде системы уравнений и граничных условий, описывающих формирование нестационарных пиковых нагрузок под действием внешнего воздушного порыва на облицовочный слой НФС. Постановка задачи включает обоснование необходимости учета сжимаемости воздуха для учета эффекта запаздывания при релаксации внутреннего давления в подоблицовочном слое НФС под действием изменяющегося во времени внешнего давления на фасадах объекта. Даны формулировка и метод решения системы определяющих уравнений. Для экспериментального выявления эффектов нестационарности проводятся аэрофизические исследования с помощью специальных генераторов импульсных струй [17]. При этом реализуется воздействие парных импульсно-периодических струй на модель двухслойной проницаемой конструкции НФС. Математическая модель воспроизводит эффекты сдвига фаз колебаний внешнего и внутреннего давления, выявленные в ходе экспериментальных исследований и позволяет адекватно моделировать высокочастотные (или однократные с большим градиентом нарастания или убывания скорости ветра) воздействия на проницаемый облицовочный слой навесной фасадной системы.

Полученные результаты создают основу для разработки нормативных и методических документов для расчета параметров, определяющих безопасность функционирования ограждающих конструкций зданий с НФС при ветровых порывах различной природы спо-

собных нарушить целостность НФС и вызвать выпадение облицовочных плиток.

Принципиально, что внешние распределения как стационарной так и пульсационной составляющих внешнего ветрового давления на облицовочном слое фасадов с НФС не зависят от процессов перетекания внутри воздушных зазоров НФС, а также от расходов местных «вдувов» и «выдувов» воздуха через щели в облицовочном слое. Поэтому задача определения внешнего ветрового давления – это независимо решаемая задача известными общепринятыми способами и/или на основании существующих нормативов. Однако знание внешнего распределения ветрового давления на внешней стороне облицовочного слоя НФС еще ничего не говорит о возможной величине ветровой нагрузки на сам облицовочный слой, поскольку внутреннее давление в вентилируемом зазоре НФС определяется интегральным балансом втекания и вытекания воздуха во всех сообщающихся подоблицовочных объемах. Это означает, что любые попытки назначать величину местного внутреннего давления по известной величине внешнего давления – некорректны. Внутреннее давление – это не локальный, а интегральный параметр. Для его определения необходимо применять разработанный математический подход подсчета балансов втекающего и вытекающего воздуха в стационарных и нестационарных условиях. Существующие нормативные рекомендации по назначению внутреннего давления в НФС должны быть пересмотрены и уточнены. Разработанные методики позволяют вносить уточнения и дополнения к СП 20.13330.2011, СП 50.13330.2012 и ГОСТ Р 56728–2015 при нормировании параметров НФС для учета воздействий ветровых порывов различной природы.

#### Список литературы

- Gerhardt H.J., Janser. F Wind loads on wind permeable facades // *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 1994. Vol. 53, pp. 37–48.
- Kumar K.S., Strathopoulos T., Wisse J.A. Field measurement data of wind loads on rainscreen walls // *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2003. Vol. 91, pp. 1401–1417.
- Kijewski T. Kareem A. Dynamic wind effect: a comparative study of provision in codes and standards with wind tunnel data. // *Wind and Structures*. 1998. Vol. 1, No. 1, pp. 77–109.
- Молотков Г.С., Подтелков В.В. Основные причины разрушения конструкций навесных вентилируемых фасадов «СИЛ КМ» и рекомендации по их устранению // *Научный журнал КубГАУ*. 2015. № 107 (03). С. 1–22.
- Борисов А.В., Иванов Р.К., Карпов А.С., Сихарулидзе Ю.Г. Анализ возмущений на участке вертикального маневра // *Известия АН. Теория и системы управления*. 2006. № 3. С. 192–202.
- Галямичев А.В. Специфика определения нагрузок на ограждающие конструкции и ее влияние на результаты их статического расчета // *Интернет-журнал Наукоедение*. 2015. Т. 7. № 2 (27). С. 96.
- Geurts C., van Bentum C. Wind Loading on Buildings: Eurocode and Experimental Approach. In: Stathopoulos T., Baniotopoulos C.C. (eds) *Wind Effects on Buildings and Design of Wind-Sensitive Structures*. CISM International Centre for Mechanical Sciences, 2007. Vol. 493. Springer, Vienna.
- Cheol-Soo Park, Godfried Augenbroe, Tahar Messadi, Mate Thitisawat, Nader Sadegh, Calibration of a lumped simulation model for double-skin facade systems // *Energy and Buildings*. 2004. No. 36, pp. 1117–1130.
- Baskaran A. Review of Design Guidelines for Pressure Equalized Rainscreen Walls – National Research Council

#### References

- Gerhardt H.J., Janser. F Wind loads on wind permeable facades. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 1994. Vol. 53, pp. 37–48.
- Kumar K.S., Strathopoulos T., Wisse J.A. Field measurement data of wind loads on rainscreen walls. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2003. Vol. 91, pp. 1401–1417.
- Kijewski T. Kareem A. Dynamic wind effect: a comparative study of provision in codes and standards with wind tunnel data. *Wind and Structures*. 1998. Vol. 1, No. 1, pp. 77–109.
- Molotkov G.S., Podtyolkov V.V. The main reasons for the destruction of structures of hinged ventilated facades of “SIAL KM” and recommendations for their elimination. *Nauchnyj zhurnal KubGAU*. 2015. No. 107 (03), pp. 1–22. (In Russian).
- Borisov A.V., Ivanov R.K., Karpov A.S., Siharulidze Yu.G. Analysis of disturbances in the vertical maneuver area. *Izvestiya AN. Teoriya i sistemy upravleniya*. 2006. No. 3, pp. 192–202. (In Russian).
- Galyamichev A.V. Specificity of determination of loads on enclosing structures and its influence on the results of their static calculation. *Internet-journal Naukovedenie*. 2015. Vol. 7. No. 2 (27), p. 96. (In Russian).
- Geurts C., van Bentum C. Wind Loading on Buildings: Eurocode and Experimental Approach. In: Stathopoulos T., Baniotopoulos C.C. (eds) *Wind Effects on Buildings and Design of Wind-Sensitive Structures*. CISM International Centre for Mechanical Sciences, 2007. Vol. 493. Springer, Vienna.
- Cheol-Soo Park, Godfried Augenbroe, Tahar Messadi, Mate Thitisawat, Nader Sadegh, Calibration of a lumped simulation model for double-skin facade systems. *Energy and Buildings*. 2004. No. 36, pp. 1117–1130.
- Baskaran A. Review of Design Guidelines for Pressure Equalized Rainscreen Walls – National Research Council



- Canada, Institute for Research in Construction, Internal Report №629, 1992. 93p. <http://doi.org/10.4224/20374052>
10. Xing Shi, Effect of membrane ballooning on screen pressure equalization: A short literature review // *Journal of Building Physics*. 2013. No. 37 (2), pp. 185–199.
  11. Гагарин В.Г., Гувернюк С.В., Кубенин А.С., Пастушков П.П., Козлов В.В. К методике расчета влияния ветровых воздействий на воздушный режим зданий // *Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности*. 2016. № 4. С. 234–240.
  12. Гагарин В.Г., Гувернюк С.В., Леденев П.В. Ветровые нагрузки на облицовку навесных фасадных систем с вентилируемой прослойкой. // *Academia. Архитектура и строительство*. 2010. № 3. С. 124–129.
  13. Исаев С.А., Судаков А.Г., Жукова Ю.В., Усачов А.Е. Моделирование снижения лобового сопротивления и снятия знакопеременной нагрузки на круговой цилиндр за счет дросселирующего эффекта // *Инженерно-физический журнал*. 2014. № 87 (4). С. 904–907.
  14. Исаев С.А., Баранов П.А., Жукова Ю.В., Терешкин А.А., Усачов А.Е. Моделирование ветрового воздействия на ансамбль высотных зданий с помощью многоблочных вычислительных технологий // *Инженерно-физический журнал*. 2014. Т. 87. № 1. С. 107–118.
  15. Гагарин В.Г., Гувернюк С.В., Леденев П.В. Аэродинамические характеристики зданий для расчета ветрового воздействия на ограждающие конструкции // *Жилищное строительство*. 2010. № 1. С. 7–11.
  16. Ramponi R. Blocken B. CFD simulation of cross-ventilation for a generic isolated building: Impact of computational parameters. // *Building and Environment*. 2012. Vol. 53, pp. 34–48.
  17. Blocken B. 50 years of Computational Wind Engineering: Past, present and future. *Building and Environment*. 2014. Vol. 129, pp. 69–102.
  18. Гагарин В.Г., Гувернюк С.В., Кубенин А.С. О достоверности компьютерных прогнозов при определении ветровых воздействий на здания и комплексы // *Жилищное строительство*. 2014. № 7. С. 3–8.
  19. Гувернюк С.В., Дынников Я.А., Дынникова Г.Я., Зубков А.Ф. Гидродинамика интенсивных автоколебаний обратного флюгера в плоском диффузоре // *Доклады Академии наук*. 2018. 480(1). С. 29–33.
  - Canada, Institute for Research in Construction, Internal Report №629, 1992. 93p. <http://doi.org/10.4224/20374052>
  10. Xing Shi, Effect of membrane ballooning on screen pressure equalization: A short literature review. *Journal of Building Physics*. 2013. No. 37 (2), pp. 185–199.
  11. Gagarin V.G., Guvernyuk S.V., Kubenin A.S., Pastushkov P.P., Kozlov V.V. To the methodology for calculating the effect of wind influences on the air behavior of buildings. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Tekhnologiya tekstil'noj promyshlennosti*. 2016. No. 4, pp. 234–240. (In Russian).
  12. Gagarin V.G., Guvernyuk S.V., Ledenev P.V. Wind loads on the facings of hinged facade systems with a ventilated layer. *Academia. Arhitektura i stroitel'stvo*. 2010. No. 3, pp. 124–129. (In Russian).
  13. Isaev S.A., Sudakov A.G., Zhukova YU.V., Usachov A.E. Modeling the reduction of drag and remove the alternating load on the circular cylinder due to the throttling effect. *Inzhenerno-fizicheskij zhurnal*. 2014. No. 87 (4), pp. 904–907. (In Russian).
  14. Isaev S.A., Baranov P.A., Zhukova Yu.V., Tereshkin A.A., Usachov A.E. Simulation of wind impact on the ensemble of high-rise buildings using multi-block computing technologies. *Inzhenerno-fizicheskij zhurnal*. 2014. Vol. 87. No. 1, pp. 107–118. (In Russian).
  15. Gagarin V.G., Guvernyuk S.V., Ledenev P.V. Aerodynamic characteristics of buildings for calculating wind impact on enclosing structures. *Zhilishchnoe Stroitel'stvo* [Housing Construction]. 2010. No. 1, pp. 7–11. (In Russian).
  16. Ramponi R. Blocken B. CFD simulation of cross-ventilation for a generic isolated building: Impact of computational parameters. *Building and Environment*. 2012. Vol. 53, pp. 34–48.
  17. Blocken B. 50 years of Computational Wind Engineering: Past, present and future. *Building and Environment*. 2014. Vol. 129, pp. 69–102.
  18. Gagarin V.G., Guvernyuk S.V., Kubenin A.S. On the reliability of computer predictions in determining wind impacts on buildings and complexes. // *Zhilishchnoe Stroitel'stvo* [Housing Construction]. 2014. No. 7, pp. 3–8. (In Russian).
  19. Guvernyuk S.V., Dynn timer G.Ya., Dynn timer G.Ya., Zubkov A.F. Hydrodynamics of intense auto-oscillations of the reverse weathervane in a flat diffuser. *Doklady Physics*. 2018. Vol. 63. No. 5, pp. 189–192. DOI: 10.1134/S1028335818050014.

**СПЕЦИАЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА**



**«Теоретические основы белизны и окрашивания керамики и портландцемента»**

**Зубехин А.П., Яценко Н.Д., Голованова С.П.**

В книге представлены теоретические основы белизны и окрашивания керамических строительных материалов и белого портландцемента (БПЦ) с позиции теории цветности силикатных материалов в зависимости от их фазово-минерального состава, структуры, содержания хромофоров Fe, Mn и Ti, условий обжига и охлаждения (окислительных или восстановительных).

Установлены закономерности зависимости белизны, цвета и особенности окрашивания как пигментов, так и твердых растворов бесцветных фаз ионами-хромофорами от структуры, изовалентного или гетеровалентного изоморфизма, образования окрашивающих кластеров. Разработаны эффективные способы управления белизной и декоративными свойствами строительных керамических материалов (фарфора, фаянса, облицовочной плитки, кирпича) и белого портландцемента.

**Заказать литературу можно через редакцию, направив заявку по e-mail: [mail@rifsm.ru](mailto:mail@rifsm.ru), или оформить заказ на сайте [www.rifsm.ru](http://www.rifsm.ru)**

Н.И. КАРПЕНКО, д-р техн. наук, академик РААСН, В.Н. ЯРМАКОВСКИЙ, канд. техн. наук, почетный член РААСН, С.Н. КАРПЕНКО, д-р техн. наук, Д.З. КАДИЕВ, инженер

Научно-исследовательский институт строительной физики РААСН (127238, Россия, г. Москва, Локомотивный пр., 21)

## К диаграммам деформирования бетона под нагрузкой при действии температуры до $-70^{\circ}\text{C}$ в зависимости от его структурно-технологических характеристик

Начальную основу физических соотношений, используемых для расчета прочности и деформативности железобетонных конструкций, эксплуатируемых в условиях действия низкой температуры, составляют диаграммы, связывающие напряжения осевого сжатия и растяжения с относительными деформациями бетона, определенными в обычных условиях положительной температуры. На основании обобщения и анализа имеющихся экспериментальных данных выполнена корректировка диаграмм деформирования тяжелого бетона с учетом действия низкой отрицательной температуры (до  $-70^{\circ}\text{C}$ ). При этом определено влияние такой температуры на повышение призматической прочности, начального модуля упругости бетона и его относительной деформации в вершинах диаграмм, построенных при испытании под нагрузками осевого сжатия в замороженном состоянии до температуры  $-70^{\circ}\text{C}$ . Показано, что увеличение прочности, начального модуля упругости и относительных деформаций в вершинах диаграмм в значительной степени зависит от водоцементного отношения бетона и его исходной влажности  $W$  в момент замораживания, а именно когда последняя не превышает предельной величины  $W_{\text{пр}}$ , определяемой критической степенью водонасыщения бетона  $\xi_{\text{кр}} > 90\%$ . На основе обработки результатов экспериментальных исследований установлено, что повышение прочности, модуля упругости и предельной деформативности бетона, испытанного под нагрузкой в замороженном состоянии при температуре ниже  $-70^{\circ}\text{C}$  при различной влажности цементного камня и бетона в диапазоне до  $W_{\text{пр}}$ , фактически прекращается. Такая закономерность подтверждена результатами выполненных специальных исследований с помощью dilatометрического и ультразвукового методов изучения процесса фазового перехода воды в лед в порах-капиллярах и порах геля цементного камня бетона, а также результатами изменения в ходе этого процесса такого показателя, как льдистость последних в зависимости от дифференциальной пористости ЦК.

**Ключевые слова:** диаграммы деформирования, бетон, низкие отрицательные температуры, водоцементное отношение, дифференциальная пористость, влажность, степень водонасыщения, льдистость, деформации, прочность, модуль упругости, диаграммный метод.

**Для цитирования:** Карпенко Н.И., Ярмаковский В.Н., Карпенко С.Н., Кадиев Д.З. К диаграммам деформирования бетона под нагрузкой при действии температуры до  $-70^{\circ}\text{C}$  в зависимости от его структурно-технологических характеристик // *Строительные материалы*. 2018. № 6. С. 13–19.

N.I. KARPENKO, Doctor of Science (Engineering), Professor, Academician of RAACS, V.N. YARMAKOVSKY, Candidate of Sciences (Engineering), Honorary Member of RAACS, Chief Researcher, S.N. KARPENKO, Doctor of Sciences (Engineering), Counselor of RAACS, Leading Researcher, D.Z. KADIEV, Engineer Scientific-Research Institute of Building Physics of the Russian Academy architecture and construction sciences (21, Lokomotivnyy Driveway, Moscow, 127238, Russian Federation)

### To diagrams of concrete deformation under simultaneous action of loading and low temperatures up to minus $70^{\circ}\text{C}$ , depending on structural and technological characteristics of concrete

The initial basis of the physical ratios used to calculate the strength and deformability of reinforced concrete structures operated at low temperatures are diagrams relating the stress of axial compression and tension with relative deformations of heavy concrete, defined under normal conditions of positive temperature. On the basis of generalization and analysis of available experimental data, the correction of these deformation diagrams of heavy concrete with due regard for the effect of low negative temperature (up to  $-70^{\circ}\text{C}$ ) is performed. Herewith, the influence of such temperatures on increasing the prismatic strength, the initial modulus of concrete elasticity and its relative deformations at the vertices of diagrams built when testing the axial compression under the loads in a frozen state of up to  $-70^{\circ}\text{C}$  is determined. It is shown that the specified increase in strength, initial modulus of elasticity and relative deformations at the vertices of the diagrams largely depends on the water-cement ratio of concrete and its initial moisture content  $W$  at the time of freezing, particularly when the latter does not exceed the limit value of  $W_{\text{lim}}$ , determined by the critical degree of water saturation of concrete  $\xi_{\text{cr}} > 90\%$ . On the basis of processing of experimental research data it is established that the increase in durability, modulus of elasticity and ultimate deformability of the concrete tested under loading in the frozen state at temperature lower  $-70^{\circ}\text{C}$  at various humidity of a cement stone (CS) and concrete in the range up to  $W_{\text{lim}}$ , actually stops. This pattern is confirmed by the results of special studies performed using dilatometric and ultrasonic methods of the process of phase transition of water to ice in the pores of the capillaries and pores of the gel of the CS of concrete, changes in the process of such an indicator as the "ice content" of the latter in dependence on the CS differential porosity.

**Keywords:** deformation diagrams, concrete, low negative temperatures, water-cement ratio, differential porosity, humidity, degree of water saturation, iciness, deformations, strength, modulus of elasticity, diagram method.

**For citation:** Karpenko N.I., Yarmakovskiy V.N., Karpenko S.N., Kadiev D.Z. To diagrams of deformation of concrete under load by the action of temperature up to  $-70^{\circ}\text{C}$  depending on its structural-technological characteristics. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2018. No. 6, pp. 13–19. (In Russian).

#### Введение и задачи исследования

В настоящее время в связи с планами расширения добычи нефти и газа в северных регионах России, в том числе Арктического побережья, и построения соответствующих терминалов, резервуаров для сжиженных природных газов и других инженерных сооружений [1–3] вместе с проблемой обеспечения требований по долговечности железобетонных конструкций при эксплуатации в суровых климатических условиях становится актуальной проблема разработки новых методов

расчета последних [4], эксплуатируемых в условиях одновременного воздействия силовых нагрузок и значительных по величине низких отрицательных температур.

Известно, что стойкость бетона в условиях воздействия отрицательных температур (морозостойкость бетона) характеризуется определенным количеством циклов попеременного замораживания и оттаивания, после которых прочность бетона снижается (ГОСТ 10060–2012 «Бетоны. Методы определения морозостойкости», пер-

вый базовый метод). Однако этой характеристики недостаточно для реальной оценки долговечности железобетонных конструкций. Для этого требуется оценка влияния низкой отрицательной температуры, прежде всего климатической (вплоть до  $-70^{\circ}\text{C}$ ), на основные нормативные прочностные и деформативные характеристики бетона, необходимые для расчета и проектирования бетонных и железобетонных конструкций, эксплуатируемых в таких условиях. Результаты соответствующих экспериментальных исследований приведены в [5–8]. Этот тезис подтверждают результаты исследований по влиянию напряженного состояния бетона на его морозостойкость, приведенные в монографии [7]. С учетом этих результатов в работе [8] впервые был предложен метод расчета железобетонных конструкций по новому предельному состоянию (а именно по долговечности), отражающему существенное влияние на морозостойкость бетона уровня его напряженного состояния.

Результаты вышеуказанных экспериментальных исследований [5–8] прочностных и деформативных свойств бетона при низкой отрицательной температуре (в частности, в замороженном, вплоть до  $-70^{\circ}\text{C}$ , состоянии) обобщены в работе [4] с позиций решения проблемы долговечности железобетонных конструкций, эксплуатируемых в суровых климатических условиях. Методики испытаний бетонных образцов в таких исследованиях, в том числе разработанные принципиально новые авторские методики, достаточно детально приведены в [5, 6].

В работах [9–11] было показано, что деградация свойств такого материала (конгломератного типа), как бетон, наиболее полно отражается в диаграммной методике расчета и ее развитии. Однако влияние низкой отрицательной температуры в этих работах не учитывалось. Ранее было установлено, что начальную основу физических соотношений, используемых для расчета прочности и деформативности железобетонных конструкций, эксплуатируемых в условиях действия низкой температуры, составляют диаграммы, связывающие напряжения осевого сжатия и растяжения с относительными деформациями тяжелого бетона, определенными в обычных условиях положительных температур. Впервые обоснование актуальности построения диаграммного метода расчета стержневых железобетонных конструкций, эксплуатируемых в условиях воздействия отрицательной температуры, было представлено в работе [11, 12].

**В настоящей работе** на основании анализа имеющихся экспериментальных данных [5–8] и их обобщения [4, 6, 7] **поставлены задачи:**

- выполнить корректировку диаграмм деформирования бетона в условиях действия низкой отрицательной температуры (до  $-70^{\circ}\text{C}$ );
- определить характер влияния такой температуры на изменение прочности, начального модуля упругости, относительных деформаций бетона в вершинах диаграмм, построенных при испытании под нагрузками осевого сжатия в диапазоне температуры от  $+20^{\circ}\text{C}$  до  $-70^{\circ}\text{C}$ ;
- определить влияние на характеристики построенных диаграмм таких структурно-технологических показателей бетона, как его водоцементное отношение (В/Ц) и исходная влажность (массовое отношение влаги в %/%), а также дифференциальная пористость и льдистость цементного камня бетона.

**Результаты математической обработки данных экспериментальных исследований прочностных и деформативных характеристик бетона при действии низких отрицательных температур**

В процессе выполнения математической обработки экспериментальных данных [5–8] связи между относительными линейными деформациями и напряжениями

бетона при осевом сжатии бетонных образцов-призм из тяжелого бетона класса по прочности В35 и В40 в замороженном в интервале температуры от  $-30^{\circ}\text{C}$  до  $-70^{\circ}\text{C}$  состоянии записываются в виде:

$$\varepsilon_b = \frac{\sigma_b}{E_{bT} \nu_b}, \quad (1)$$

где  $\varepsilon_b, \sigma_b, E_{bT}$  – соответственно относительные линейные деформации, напряжения осевого сжатия и начальный модуль упругости бетона в замороженном состоянии

$$E_{bT} = E_b \cdot \beta_E, \quad (2)$$

где  $E_b$  – начальный модуль упругости бетона в исходных условиях испытания образцов (при  $t = 20^{\circ}\text{C}$  и соответствующей влажности  $W\%$ );  $\beta_E$  – коэффициент изменения начального модуля упругости бетона в замороженном состоянии;  $\nu_b$  – коэффициент изменения секущего модуля ( $\nu_b E_{bT}$  – секущий модуль бетона в замороженном состоянии).

Обработка данных экспериментальных исследований бетона с различной естественной влажностью и различным водоцементным отношением (В/Ц) при нагрузках осевого сжатия показала, что:

– при В/Ц=0,4 и изменении влажности в диапазоне  $W=3,1\% - 5,1\%$  можно принять:

$$\beta_E = 1 + \left[ 0,03 + 0,12 \left( \frac{W\% - 3\%}{1\%} \right) \right] \left( \frac{20^{\circ}\text{C} - t^{\circ}\text{C}}{90^{\circ}\text{C}} \right); \quad (3)$$

– при В/Ц=0,5 и изменении влажности в пределах  $W=3,1\% - 5,1\%$ :

$$\beta_E = 1 + \left[ 0,015 + 0,12 \left( \frac{W\% - 3\%}{1\%} \right) \right] \left( \frac{20^{\circ}\text{C} - t^{\circ}\text{C}}{90^{\circ}\text{C}} \right). \quad (4)$$

Сопоставление данных, полученных в экспериментах и теоретических величин  $\beta_E$ , полученных по формулам (3) и (4), в зависимости от исходной влажности бетона с различным В/Ц при температуре  $-70^{\circ}\text{C}$  проиллюстрировано на рис. 1.

Призменная прочность бетона  $R_b$ , которая равна напряжениям  $\sigma_{bT}$  в вершине диаграммы замороженного бетона, определяется по зависимости:

$$\hat{\sigma}_{bT} = \hat{\sigma}_b \beta_R, \quad (5)$$

где  $\hat{\sigma}_b$  – напряжения в вершине диаграммы бетона в начальных условиях испытаний (при  $t^{\circ} = +20^{\circ}\text{C}$  и исходной влажности  $W$ );  $\beta_R$  – коэффициент влияния низких температур на увеличение напряжений в вершине диаграммы – по существу призменной прочности.

Анализ экспериментальных данных показал следующее:

– при В/Ц=0,4:

$$\beta_R = 1 + \left[ 0,13 + 0,45 \left( \frac{W\% - 3\%}{1\%} \right) \right] \left( \frac{20^{\circ}\text{C} - t^{\circ}\text{C}}{90^{\circ}\text{C}} \right); \quad (6)$$

– при В/Ц=0,5:

$$\beta_R = 1 + \left[ 0,06 + 0,45 \left( \frac{W\% - 3\%}{1\%} \right) \right] \left( \frac{20^{\circ}\text{C} - t^{\circ}\text{C}}{90^{\circ}\text{C}} \right). \quad (7)$$

Графики изменения величин  $\beta_R$  в зависимости от исходной влажности  $W\%$  бетона, замороженного до  $-70^{\circ}\text{C}$ , определенные по формулам (6) и (7), и данные экспериментальных исследований приведены на рис. 2.

Напряжениями  $\hat{\sigma}_{bT}$  соответствуют увеличенные линейные деформации  $\hat{\varepsilon}_{bT}$  в вершине соответствующей диаграммы:



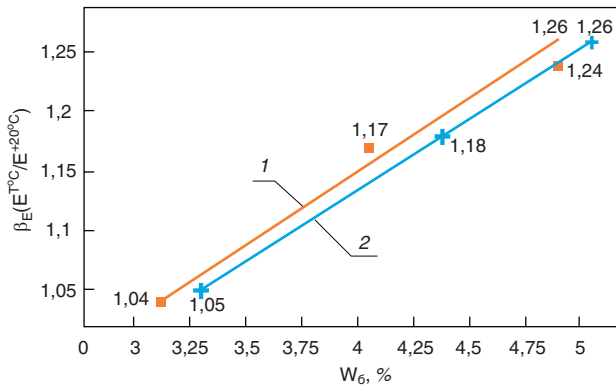


Рис. 1. Зависимость коэффициента изменения начального модуля упругости  $\beta_E$  тяжелого бетона с  $V/C=0,4$  (1) и  $V/C=0,5$  (2) в замороженном до  $-70^\circ\text{C}$  состоянии от его исходной влажности  $W_6$

$$\hat{\epsilon}_{bT} = \hat{\epsilon}_b \cdot \beta_\epsilon, \quad (8)$$

где  $\hat{\epsilon}_b$  – относительные линейные деформации в вершине диаграммы бетона в условиях испытаний при положительных температурах. По данным [9] для тяжелого бетона:

$$\hat{\epsilon}_b = 200 \cdot 10^{-5} \cdot \sqrt{R_b/R_0}, \quad (9)$$

где  $R_0$  – условно принятая призматическая прочность бетона, равная 20 МПа;  $R_b$  – фактическая призматическая прочность бетона.

Результаты обработки экспериментальных исследований [5–8] показывают:

– при  $V/C=0,4$ :

$$\beta_\epsilon = 1 + \left[ 0,05 \left( \frac{W\% - 3\%}{1\%} \right) + 0,085 \left( \frac{W\% - 3\%}{1\%} \right)^2 \right] \left[ \frac{20^\circ\text{C} - t^\circ\text{C}}{90^\circ\text{C}} \right]; \quad (10)$$

– при  $V/C=0,5$ :

$$\beta_\epsilon = 1 + \left[ 0,06 \left( \frac{W\% - 3\%}{1\%} \right) + 0,075 \left( \frac{W\% - 3\%}{1\%} \right)^2 \right] \left[ \frac{20^\circ\text{C} - t^\circ\text{C}}{90^\circ\text{C}} \right]. \quad (11)$$

Определив  $\hat{\sigma}_{bT}$ ,  $\hat{\epsilon}_{bT}$  и  $E_{bT}$ , можно вычислить коэффициент секущего модуля  $\hat{\nu}_{bT}$ , соответствующий вершине диаграммы деформирования бетона в замороженном состоянии:

$$\hat{\nu}_{bT} = \frac{\hat{\sigma}_{bT}}{\hat{\epsilon}_{bT} E_{bT}}. \quad (12)$$

Секущий модуль бетона для промежуточных уровней нагружения:

$$\eta = \frac{\sigma_b}{\hat{\sigma}_{bT}} \quad (13)$$

определяется по ранее полученной зависимости в [9] с учетом замены  $\hat{\nu}_b$  на  $\hat{\nu}_{bT}$ :

$$\nu_b = \hat{\nu}_{bT} + (1 - \hat{\nu}_{bT}) \sqrt{1 - \omega_1 \eta - (1 - \omega_1) \eta^2}, \quad (14)$$

где  $\omega_1$  – параметр кривизны диаграммы:

$$\omega_1 = 2 - 2,5 \hat{\nu}_{bT}. \quad (15)$$

Вычисляя  $\nu_b$  для различных величин напряжений  $\sigma_b$ , можно по формуле (1) определить соответствующие значения деформации  $\epsilon_b$ .

Диаграммы деформирования бетона при осевом сжатии в диапазоне температуры от  $+20$  до  $-70^\circ\text{C}$  для  $V/C=0,5$  приведены на рис. 3.

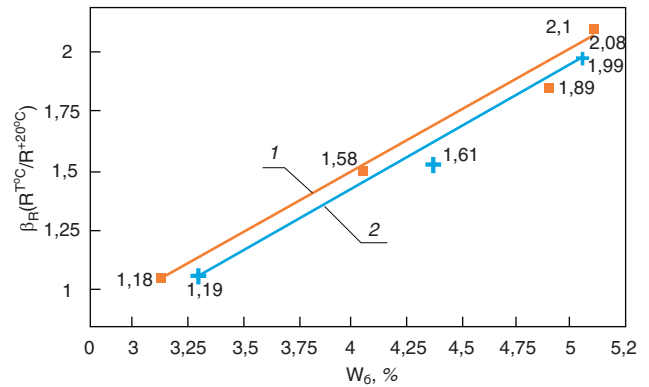


Рис. 2. Зависимость коэффициента изменения призматической прочности  $\beta_R$  тяжелого бетона с  $V/C=0,4$  (1) и  $V/C=0,5$  (2) в замороженном до  $-70^\circ\text{C}$  состоянии от его исходной влажности  $W_6$

Диаграмма деформирования тяжелого бетона класса по прочности на сжатие В40 при одноосном растяжении корректируется следующим образом. В зависимостях (1), (13), (14), (15)  $\sigma_b$  заменяется на  $\hat{\sigma}_{bT}$ ;  $\nu_b$  – на  $\hat{\nu}_{bT}$ ;  $\hat{\nu}_{bT}$  – на  $\hat{\nu}_{bT}$ ;  $R_b$  – на  $R_{bT}$ . При этом:

$$\hat{\sigma}_{bT} = R_{bT} \cdot \beta_{Rt} \quad (16)$$

$$\hat{\nu}_{bT} = (0,6 + 0,15 R_{bT} / R_{b0}) / \gamma_{bT}, \quad (17)$$

где согласно данным экспериментальных исследований МГСУ [13] можно принять:

$$\beta_{Rt} = 1 + \left[ 0,15 + 0,5 \left( \frac{W\% - 3\%}{1\%} \right) \right] \left[ \frac{20^\circ\text{C} - t^\circ\text{C}}{90^\circ\text{C}} \right]; \quad (18)$$

$$\gamma_{bT} = 1 + 0,1 \left( \frac{W\% - 3\%}{1\%} \right) \left[ \frac{20^\circ\text{C} - t^\circ\text{C}}{90^\circ\text{C}} \right]. \quad (19)$$

Параметры  $\nu_{bT}$ ,  $\omega_1$  при растяжении вычисляются по зависимостям (14), (15) при замене  $\hat{\nu}_{bT}$  на  $\hat{\nu}_{bT}$ ,  $\nu_b$  на  $\nu_{bT}$ .

Представленные выше зависимости между напряжениями и деформациями бетона, а также коэффициенты температурных деформаций служат основой для построения расчетных физических соотношений применительно к расчету различных железобетонных конструкций, эксплуатируемых в условиях действия отрицательной температуры [11–14].

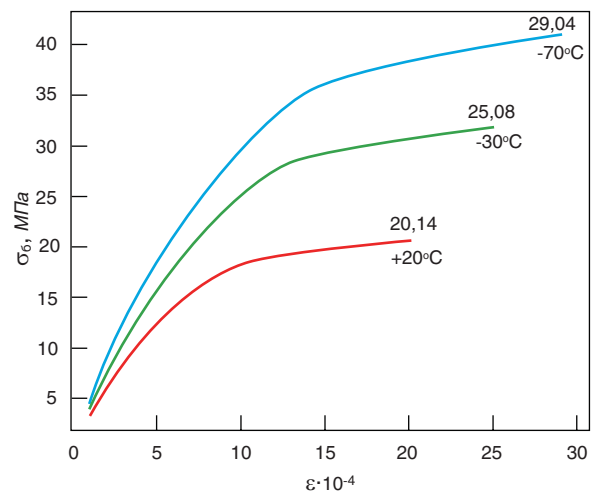


Рис. 3. Диаграммы деформирования при осевом сжатии бетона класса В35 при  $V/C=0,5$  и исходной влажности  $W_6=5,06\%$  в диапазоне температуры от  $+20$  до  $-70^\circ\text{C}$ ;  $\epsilon$  и  $\sigma_b$  – соответственно линейные деформации и напряжения при осевом сжатии бетона

Таблица 1

Соотношение воды и льда в цементном камне, растворе, бетоне в связи с их структурными характеристиками

Исследуемый материал	В/Ц	Суммарная пористость, см <sup>3</sup> /г	Распределение пор по радиусам, %			Соотношение воды и льда в мас. % при температуре			
			I	II	III	-10°C	-40°C	-60°C	-70°C
			менее 50 Å	50–103 Å	более 103 Å				
Цементный камень	0,3	0,068	61,6	27	21,4	9,5 / 4,5	7 / 7	4,9 / 9,1	2,1 / 11,9
	0,4	0,12	8	40	52	12,7 / 13,3	5,2 / 21,8	2,6 / 23,4	1,08/24,92
	0,5	0,152	5	10	85	8,25 / 24,75	3,3 / 29,7	0,99 / 32,01	0
Раствор 1:2	0,3	0,06	16	30	45	4,95 / 6,05	1,65/9,35	0,55 / 10,45	0
Бетон	0,4	–	–	–	–	1,4	0,5	0,15	0

**Примечание.** В числителе – массовое процентное содержание воды; в знаменателе – то же, льда.

Дальнейшее развитие этих соотношений может быть выполнено на основе проведения экспериментальных исследований с различными новыми видами бетонов, а также обобщения подобных изложенным выше экспериментальных [5–8] и теоретических исследований отечественных [13–19] и зарубежных авторов [20–22].

**Трактовка диаграмм деформирования бетона в замороженном до -70°C состоянии с позиций физических характеристик процесса фазового перехода воды пор и капилляров бетона в лед**

Ниже представлено физическое обоснование влияния замораживания бетона на его физико-механические характеристики и соответственно на диаграммы деформирования бетона, замороженного до температуры -70°C.

Данные, полученные в работах [5, 6] с помощью разработанного во Всероссийском научно-исследовательском институте физико-технических и радиотехнических измерений (ВНИФТРИ) проф. И.И. Лифановым делатометрического метода исследований, показывают, что понижение температуры замораживания водонасыщенного цементного камня растворной части бетона и самого бетона приводит к увеличению показателя его льдистости. Последний определяется как соотношение объемов воды и льда в порах и капиллярах цементного камня при его замораживании до различных температур.

Взаимосвязь льдистости со структурными характеристиками цементного камня раствора и бетона приведена в табл. 1. Из анализа данных таблицы следует, что с увеличением показателя водоцементного отношения цементного камня с 0,3 до 0,5 происходит увеличение суммарной пористости цементного камня с 0,068 до 0,152 см<sup>3</sup>/г с соответствующим перераспределением пор по радиусам в сторону больших размеров.

Так, в частности, при В/Ц = 0,4 относительный объем пор радиусом менее 50 Å составляет 61,6%, пор с существенно большим радиусом (более 10<sup>3</sup> Å) – 21,4%. При увеличении В/Ц до 0,5 дифференциальная пористость цементного камня существенно изменяется: относительный объем пор радиусом менее 50 Å составляет уже только 5%, а пор радиусом более 10<sup>3</sup> Å увеличивается до 85%. Соответственно, соотношение воды и льда для цементного камня с В/Ц = 0,3 при -40°C составляет 7/7%, а при -70°C – 2,1/11,9% (в числителе – массовое процентное содержание воды, в знаменателе – то же льда). Для цементного камня с В/Ц = 0,5 такое соотношение при -40°C составляет 3,3/29,7, т. е. льдистость увеличивается. Казалось бы, следует ожидать для бетона с В/Ц = 0,5 и большую степень увеличения коэффициентов изменения прочности и модуля упругости.

Однако нужно учитывать следующее: в порах и капиллярах цементного камня бетона с В/Ц = 0,5, характеризующихся большим количеством первых с большим размером, можно ожидать, как следует из результатов экспериментов работ [5, 6], и большую степень влияния развития гидравлического давления при фазовом переходе воды в лед в сравнении с цементным камнем с В/Ц = 0,3, а следовательно, как негатив – более интенсивного развития гидравлического давления на стенки пор и капилляров с опасностью возможного образования в них микротрещин, особенно при высокой степени водонасыщения цементного камня\*.

Результаты экспериментов, приведенные в табл. 2, по скорости прохождения продольных ультразвуковых волн через ненагруженные бетонные образцы (бетон с В/Ц = 0,4), замороженные до различной температуры, показывают, что в большей степени, чем значение В/Ц (в сравнении с данными табл. 1), на увеличение льдистости бетона влияет его исходная влажность.

Так, можно видеть, что понижение температуры замораживаемого бетона и увеличение его влажности при условии  $W < W_{пр}$  (где  $W_{пр}$  – предельная исходная для описываемых испытаний замороженного бетона величина его влажности – 5,2%, достигаемая при увеличении степени его активного водонасыщения под вакуумом более 90%) приводит к увеличению скорости прохождения через него ультразвуковых волн  $V_y$ , следовательно, к увеличению льдистости бетона. Увеличение влажности бетона выше предельной величины приводит при его замораживании к уменьшению величины  $V_y$  относительно бетона, замороженного до той же температуры с влажностью меньше предельной. Но отсюда вовсе не следует вывод об уменьшении при этом льдистости бетона. Наблюдаемое же относительное снижение скорости прохождения ульт-

**Таблица 2**  
Скорость прохождения продольных ультразвуковых волн  $V_y$  в бетоне с В/Ц=0,4 в зависимости от его температуры и влажности при напряжениях сжатия  $\sigma_6 = 0$

Весовая влажность бетона, %	Величина $V_y$ , км/с при температуре бетона, °C			
	+20°C	-25°C	-45°C	-70°C
3,12	3,64	3,93	3,98	4,01
4,05	3,82	4,27	4,39	4,45
4,9	3,92	–	–	4,61
5,11	3,96	–	–	4,6
5,2	3,96	–	–	4,23

\* Как известно из главы III § 5 работы [6] «Результаты исследований в связи с современными представлениями о механизме воздействия мороза на бетон», при степени водонасыщения пор и капилляров цементного камня в бетоне более 90% развивающееся в процессе фазового перехода воды в лед гидравлическое давление при увеличении относительного объема льда (показатель льдистости), заполняющего эти поры-капилляры, может разрушать их стенки.

тразвуковых волн объясняется, очевидно, развитием деструктивных процессов в замораживаемом бетоне, обусловленным повышением гидравлического давления в порах и капиллярах цементного камня (см. выше).

Таким образом, чем ниже температура замораживания бетона и больше его влажность, тем большая часть пор и микротрещин заполняется льдом. Следовательно, тем в большей степени при условии  $W < W_{np}$  несплошное капиллярно-пористое тело бетона приближается к сплошному твердому телу.

Подтверждением этого предположения может служить изменение характера зависимости линейных деформаций бетона от уровней напряжений сжатия. Так, если замораживание бетона с влажностью  $W < W_{np}$  приводит к тому, что графики указанных зависимостей в области напряжений до  $\sigma \approx R_t^y$  [5, 6, 15–22] приобретают более прямолинейный характер, то увеличение влажности бетона до величины  $W \geq W_{np}$  приводит при этом к частичной или полной потере этой прямолинейности.

Таким образом, изменение характера зависимостей линейных деформаций сжатия бетона от уровней его нагружения вместе с рассмотренным выше изменением начального модуля упругости свидетельствует о том, что замораживание бетона с влажностью меньше предельной приводит к приобретению им дополнительных упругих свойств, причем тем более явно выраженных, чем больше «льдистость» этого бетона; замораживание же бетона с влажностью больше «предельной» приводит к частичной или полной потере этих свойств за счет развития гидравлического давления при фазовом переходе воды в лед.

Следует к вышеизложенному отметить, что анализируемые выше данные экспериментальных исследований по влиянию воздействия низких отрицательных температур на основные прочностные характеристики бетона и диаграммы его деформирования, соответственно, результаты их математической обработки правомерно рассматривать для выбранного вида конструкционного тяжелого бетона классов по прочности В35 и В40 с марками по морозостойкости от F400 до F600, наиболее часто используемых в железобетонных конструкциях инженерных сооружений. В связи с необходимостью расширения области применения железобетонных конструкций в инженерных сооружениях, строящихся в районах Арктического побережья, авторы рассматривают возможность продолжения подобных проведенным исследованиям на высокопрочных и высокоморозостойких бетонах: тяжелых классов по прочности на сжатие до В60–В100, марок по морозостойкости до F500–F1000, а также на легких конструкционных бетонах классов В60–В70 марок по морозостойкости F700–F1500. Обеспечение таких высоких показателей эксплуатационного качества тяжелых бетонов и особенно легких бетонов возможно при модификации их структуры за счет использования принципиально новых высокоэффективных их компонентов. Последние характеризуются вместе с высокой гидратационной ак-

тивностью при требуемой низкой сорбции и соответственно, низкой усадки, низкой энергоемкостью производства при рациональном использовании химически взаимосочетаемых продуктов переработки техногенных образований. В качестве примеров последних могут служить разработанные с участием авторов:

– модификатор бетона, изготавливаемый совместным помолом в аппарате ударного действия (при скорости движения частиц 100–400 м/с) бокситового шлама – отхода глиноземного производства и органической добавки в виде модифицированного лигносульфоната или поликарбоксилата [23];

– высокоактивное ( $A=60-80$  МПа) композиционное вяжущее пониженной водопотребности (нормальная густота цементного теста не выше 18–19%), получаемое высокоэнергонагруженным помолом доменных или электротермофосфорных граншлаков с низким расходом цементного клинкера (не более 30–40%) в присутствии активного микрокремнезема и органической добавки – суперпластификатора [24].

### Заключение

Низкая отрицательная температура оказывает значительное влияние на напряжения, деформации и прочность железобетонных конструкций. Это влияние следует учитывать при расчете конструкций по диаграммному методу, основу которого составляют диаграммы деформирования бетона в условиях действия низкой отрицательной температуры. На основании данных экспериментальных и теоретических исследований предложена соответствующая корректировка диаграмм осевого сжатия и растяжения бетона, построенных при испытаниях его образцов в условиях обычных положительных температур. В соответствии с этой корректировкой учтено влияние низкой отрицательной температуры на изменение прочности, начального модуля упругости бетона и его относительных деформаций в вершинах диаграмм, построенных при испытании под нагрузками осевого сжатия и растяжения бетонных образцов в замороженном состоянии до температуры, примерно равной. При этом установлено определяющее влияние таких структурно-технологических характеристик бетона, как его водоцементное отношение, дифференциальная пористость и исходная (до начала замораживания) влажность бетона.

Показано, что повышение прочности и предельной деформативности бетона, испытанного под нагрузкой в замороженном состоянии при температуре ниже  $-70^\circ\text{C}$  при различной исходной влажности цементного камня и бетона, фактически прекращается. Такая закономерность подтверждена результатами выполненных авторами специальных исследований процесса фазового перехода воды в лед в порах-капиллярах и порах геля цементного камня бетона, а также изменения в ходе этого процесса такого показателя, как «льдистость» последних.

### Список литературы

1. Свиридов В.Н., Малюк В.Д. Оценка долговечности бетона в конструкциях морских сооружений по опыту строительства на Дальнем Востоке. *Труды III Всероссийской (II международной) конференции по бетону и железобетону «Бетон и железобетон – взгляд в будущее»*. М: МГСУ, 2014. Т. 3. С. 388–398.
2. Панталеенко В.Н., Ерохина Л.А. О повышении долговечности конструкций нефтегазопромысловых сооружений. *Труды III Всероссийской (II международной) конференции по бетону и железобетону «Бетон и железобетон – взгляд в будущее»*. М: МГСУ, 2014. Т. 3. С. 348–355.

### References

1. Sviridov V.N., Malyuk V.D. Evaluation of durability of concrete in offshore constructions on the experience of construction in the far East. *Proceedings of the III Russian (II international) conference on concrete and reinforced concrete «Concrete and reinforced concrete – a look into the future»*. Moscow: MGSU, 2014. Vol. 3, pp. 388–398. (In Russian).
2. Pantileenko V.N., Erokhina L.A. On improving the durability of structures oil and gas structures. *Proceedings of the III Russian (II international) conference on concrete and reinforced concrete «Concrete and reinforced concrete – a look into the future»*. Moscow: MGSU, 2014. Vol. 3, pp. 348–355. (In Russian).

3. Попов В.М., Черных И.В. Изменение конструктивных свойств бетона при его периодическом замораживании. *Проектирование и строительство транспортных объектов в условиях Республики Саха (Якутия): Материалы научно-технической конференции*. Якутск, 2–5 апреля 2004.
4. Карпенко Н.И., Карпенко С.Н., Ярмаковский В.Н., Ерофеев В.Т. О современных методах обеспечения долговечности железобетонных конструкций // *ACADEMIA. Архитектура и строительство*. 2015. № 1. С. 93–103.
5. Ярмаковский В.Н. Прочностные и деформативные характеристики бетона при низких отрицательных температурах // *Бетон и железобетон*. 1971. № 10.
6. Москвин В.М., Капкин М.М., Савицкий А.Н., Ярмаковский В.Н. Бетон для строительства в суровых климатических условиях. Ленинград: Ленинградское отделение Стройиздата. 1973. 168 с.
7. Москвин В.М., Саввина Ю.А., Алексеев С.Н., Иванов Ф.М., Подвальный А.М., Ярмаковский В.Н. Повышение стойкости бетона и железобетона при воздействии агрессивных сред / Под ред. Москвина В.М. М.: Стройиздат. 1975. 240 с.
8. Ярмаковский В.Н. О методе расчета железобетонных конструкций повышенной морозостойкости. В кн.: *Повышение стойкости бетона и железобетона при воздействии агрессивных сред*. М.: Стройиздат, 1975. С. 34–39.
9. Карпенко Н.И. Общие модели механики железобетона. М.: Стройиздат, 1996. С. 92–126.
10. Карпенко С.Н. Построение общей методики расчета железобетонных стержневых конструкций в форме конечных приращений // *Бетон и железобетон*. 2005. № 1. С. 13–18.
11. Карпенко Н.И., Карпенко С.Н. О диаграммной методике расчета деформаций стержневых элементов и ее частных случаях // *Бетон и железобетон*. 2012. № 6. С. 20–27.
12. Карпенко С.Н., Карпенко Н.И., Ярмаковский В.Н. О построении диаграммного метода расчета стержневых железобетонных конструкций при отрицательных температурах. *Сборник докладов на III международной научной конференции «Полярная механика»*, Владивосток: Дальневосточный федеральный университет, 2016. С. 181–191.
13. Истомин А.Д. Работа центрально-растянутых железобетонных элементов при отрицательной температуре // *Известия вузов. Технология текстильной промышленности*. 2017. № 2. С. 141–144.
14. Зайцев Ю.В., Леонович С.Н. Прочность и долговечность конструктивных материалов с трещиной. Минск: БНТУ, 2010. С. 224–245.
15. Леонович С.Н. Прочность конструктивных бетонов при циклическом замораживании – оттаивании с позиции механики разрушения. Брест: БрГТУ, 2006. 379 с.
16. Leonovich S.N., Guzeev E.A. Prediction of concrete structures durability. Proc. of XII-th FIP Congress on challenges for concrete in the next millennium, Amsterdam, Netherlands, 1998. Vol. 2, pp. 983–987.
17. Guzeev E.A., Leonovich S.N., Piradov K.A. Механика разрушения бетона: вопросы теории и практики. Брест: БрГТУ 1999. 216 с.
18. Shubin I.L., Zaitsev Y.V., Rimshin V.I., Kurbatov V., Sulygova P. Fracture of high performance materials under multiaxial compression and thermal effect // *Engineering Solid Mechanics*. 2017, pp. 139–144.
19. Леонович С.Н., Зайцев Ю.В., Доркин В.В., Литвиновский Д.А. Прочность, трещиностойкость и
3. Popov V.M., Chernykh I.V. Change of structural properties of concrete at its periodic freezing. *Design and construction of transport objects in the conditions of the Republic of Sakha (Yakutia): Materials of scientific and technical conference*. Yakutsk, April 2–5, 2004. (In Russian).
4. Karpenko N.I., Karpenko S.N., Yarmakovskiy V.N., Erofeev V.T. Modern methods for ensure the durability of reinforced concrete structures. *ACADEMIA. Arhitektura i stroitel'stvo*. 2015. No. 1, pp. 93–103. (In Russian).
5. Yarmakovskiy V.N. Strength and deformation characteristics of concrete at low temperatures // *Beton i zhelezobeton*. 1971. No. 10. (In Russian).
6. Moskvina V.M., Kapkin M.M., Savitskiy, A.N., Yarmakovskiy V.N. Beton dlya stroitel'stva v surovyykh klimaticheskikh usloviyakh. [Concrete for construction in harsh climatic conditions]. Leningrad. Leningrad Department of Stroyizdat. 1973. 168 p. (In Russian).
7. Moskvina V.M., Savina, Y.A., Alekseev S.N., Ivanov F.M., Podvalny A.M., Yarmakovskiy V.N. Povysheniye stoykosti betona i zhelezobetona pri vozdeystvii agressivnykh sred. [Increase durability of concrete and reinforced concrete when exposed to aggressive environments]. Under the editorship of Moskvina V.M. Moscow, Stroiizdat. 1975. 240 p. (In Russian).
8. Yarmakovskiy V.N. On the method of calculation of concrete structures of high frost resistance. V kn.: *Povysheniye stoykosti betona i zhelezobetona pri vozdeystvii agressivnykh sred* [Increase durability of concrete and reinforced concrete when exposed to aggressive environments]. Moscow: Stroiizdat, 1975, pp. 34–39. (In Russian).
9. Karpenko N.I. Obshchie modeli mekhaniki zhelezobetona [General models of reinforced concrete mechanics]. Moscow: Stroiizdat. 1996, pp. 92–126. (In Russian).
10. Karpenko S.N. Construction of the General method of calculation of reinforced concrete core structures in the form of finite increments. *Beton i zhelezobeton*. 2005. No. 1, pp. 13–18. (In Russian).
11. Karpenko N.I. and Karpenko S.N. On the diagram method of calculating the deformation of rod elements and its particular cases. *Beton i zhelezobeton*. 2012. No. 6, pp. 20–27. (In Russian).
12. Karpenko S.N., Karpenko N.I., Yarmakovskiy V.N. About the construction of the chart method of calculation of rod reinforced concrete structures at low temperatures. *Proceedings of the III International scientific conference «Polar Mechanics»*. Vladivostok: Dal'nevostochnyy federal'nyy universitet. 2016, pp. 181–191. (In Russian).
13. Istomin A.D. The work of central-stretched reinforced concrete elements at negative temperature. *Izvestiya vuzov. Tekhnologiya tekstilnoy promyshlennosti*. 2017. No. 2, pp. 141–144.
14. Zaitsev U.V., Leonovich S.N. Prochnost' i dolgovechnost' konstruktivnykh materialov s treshchinoy [The strength and durability of structural materials with crack]. Minsk: BNTU. 2010, pp. 224–245. (In Russian).
15. Leonovich S.N. Prochnost' konstruktivnykh betonov pri tsiklicheskom zamorazhivaniy – ottaivaniy s pozitsii mekhaniki razrusheniya [Strength of structural concrete during cyclic freezing-thawing from the position of fracture mechanics]. Brest: BrGTU, 2006. 379 p. (In Russian).
16. Leonovich S.N., Guzeev E.A. Prediction of concrete structures durability. Proceedings of XII-th FIP Congress on challenges for concrete in the next millennium. Amsterdam, Netherlands, 1998. Vol. 2, pp. 983–987.
17. Guzeev E. A., Leonovich S.N., Piradov K.F. Механика разрушения бетона: вопросы теории и практики. Брест: БрГТУ, 1999. 216 с.
18. Shubin I., Zaitsev Y., Rimshin V., Kurbatov V., Sulygova P. Fracture of high performance materials under multiaxial compression and thermal effect. *Engineering Solid Mechanics*. (2017), pp. 139–144.

- долговечность конструкционного бетона при температурных и влажностных воздействиях. М.: ИНФРА, 2018. 280 с.
20. Jia-Bao Yan, Jian Xie. Behaviours of reinforced concrete beams under low temperatures // *Construction and Building Materials* (China), 141. ELSEVIER. 2017, pp. 410–425.
  21. Rostasy F.S., Wiedemann G. Stress-strain-behaviour of concrete at extremely low temperature // *Cement and Concrete Research* (USA). 1980. Vol. 10, pp. 565–572.
  22. Naaman A.E. Prestressed concrete analysis and design. Fundamentals, 2nd Edition. 2000. «Techno Press 3000», Michigan. USA, 1072 p.
  23. Патент РФ №2421421. *Модификатор бетона и способ его получения* / Ярмаковский В.Н., Торпищев Ш.К., Торпищев Ф.Ш. Заявл. 27.10.2009. Опубл.: 20.06.2011. Бюл. № 17.
  24. Yarmakovskiy V.N., Pustovgar A.P. The scientific basis for the creation of a composite binders class, characterized of the low heat conductivity and low sorption activity of cement stone. Proceeding of XXIV R-S-P seminar. Theoretical Foundation of Civil Engineering (24RSP) // *Procedia Engineering*. 2015. No. 111, pp. 864–870.
  19. Leonovich S.N., Zaytsev Yu.V., Dorkin V.V., Litvinovskiy D.A. Prochnost', treshchinostojkost' i dolgovechnost' konstrukcionnogo betona pri temperaturnyh i vlazhnostnyh vozdeystviyah [Strength, crack resistance and durability of structural concrete under temperature and humidity influences]. Moscow: INFRA-M, 2018.
  20. Jia-Bao Yan, Jian Xie. Behaviours of reinforced concrete beams under low temperatures. *Construction and Building Materials* (China). 2017. 141, pp. 410-425.
  21. Rostasy F.S., Wiedemann G. Stress-strain-behaviour of concrete at extremely low temperature. *Cement and Concrete Research* (USA). 1980. Vol. 10, pp. 565–572.
  22. Naaman A.E. Prestressed concrete analysis and design. Fundamentals, 2nd Edition. 2000. «Techno Press 3000», Michigan. USA, 1072 P.
  23. Patent RF 2421421. *Modifikator betona i sposob ego polucheniya* [Concrete modifier and method of its production]. Yarmakovskiy V.N., Torpischev S.K., Torpischev F.S. Declared: 27.10.2009. Published: 20.06.2011. Bul. No. 17
  24. Yarmakovskiy V.N., Pustovgar A.P. The scientific basis for the creation of a composite binders class, characterized with the low heat conductivity and low sorption activity of cement stone. Proceeding of XXIV R-S-P seminar. Theoretical Foundation of Civil Engineering (24RSP). *Procedia Engineering*. 2015. 111, pp. 864–870.

Научно-практическая конференция

# «Технологии и материалы для строительства цементнобетонных дорог»

4–5 октября 2018 г.

г. Геленджик, отель «Приморье»

В настоящее время перед дорожниками стоят цели по увеличению объемов строительства и межремонтных сроков службы дорожных покрытий, достижению высокого уровня содержания дорог и повышению безопасности дорожного движения. Решение данных задач невозможно без увеличения доли применения вяжущих материалов в строительстве новых дорожных покрытий и стабилизации грунтов в основании дорожных одежд.

## Тематика конференции

- Практический опыт строительства и эксплуатации цементобетонных дорог в России и за рубежом.
- Рынки цемента, бетона, щебня, строительной арматуры, химических добавок для бетона, перспективы и общие тенденции. Качество строительных материалов для строительства дорог с цементобетонным покрытием.
- Рынок спецтехники и оборудования для строительства дорог с цементобетонным покрытием.
- Научные разработки и опыт их применения в дорожном строительстве.
- Перспективы и преимущества применения цементобетонов в дорожном строительстве.
- Кооперация на рынке дорожного строительства – объединение возможностей производителей цемента и строительных материалов, дорожников, финансовых институтов и госструктур.

На мероприятие приглашены ведущие представители научных учреждений профильной тематики, производители цемента, бетонов, строительной химии, арматуры, нерудных материалов, дорожно-строительной техники и оборудования, дорожные строители, аналитики рынков, представители госучреждений и другие организации, занятые в сфере дорожного строительства и заинтересованные в строительстве дорог с бетонным покрытием.

**К участию в мероприятии приглашаются представители стран Таможенного Союза и зарубежных участников с целью обмена опытом в строительстве бетонных дорог.**

Организатор – интернет-журнал о цементе RUCEM.RU. Заявки на участие принимаются до 15 сентября 2018 г. по эл. почте: info@rucem.ru, тел.: +7(845) 368-33-82.

Сайт мероприятия: <http://www.rucem.ru/seminar/rucem27/>

Информационная поддержка – журнал «Строительные материалы»®

**СТРОИТЕЛЬНЫЕ  
МАТЕРИАЛЫ®**

Н.В. КУЗНЕЦОВА<sup>1</sup>, канд. техн. наук (nata-kus@mail.ru),  
 А.И. ДУБРОВИН<sup>1</sup>, инженер (dubrowin.aleksey-tambov@yandex.ru);  
 В.А. ЕЗЕРСКИЙ<sup>2</sup>, д-р техн. наук (wiz75micz@rambler.ru)

<sup>1</sup> Тамбовский государственный технический университет (392000, г. Тамбов, ул. Советская, 106)

<sup>2</sup> Белостокский технический университет (Республика Польша, 15-351, г. Белосток, ул. Видзжска-Стрит, 45 А)

## Исследование влияния водоцементного отношения на прочность мелкозернистых бетонов с заполнителем из гранулированного доменного шлака

Представлен оригинальный подход к проектированию многокомпонентных цементных смесей с мелкодисперсными заполнителями, обладающими высокой водопотребностью. Для различных составов смесей исследованы прочность при сжатии образцов мелкозернистых бетонов в зависимости от смесевых факторов. В качестве влияющих факторов рассматривались доли компонентов в смеси: гранулированного доменного шлака, песка, воды при постоянном расходе цемента и модифицирующих добавок. На основе данных лабораторного эксперимента построены математические модели и с их помощью установлены зависимости прочности при сжатии мелкозернистого бетона от соотношения шлак/вода, а также оптимальные соотношения в системе заполнитель–вода. Выявлены конкретные значения водотвердого отношения для цементных смесей, при которых прочность образцов увеличивается до 35%, а также оптимальные соотношения компонентов, позволяющие получать мелкозернистый бетон с повышенной прочностью до 30 МПа.

**Ключевые слова:** ресурсосбережение, мелкозернистый бетон, водопотребность смеси, водотвердое отношение, гранулированный доменный шлак.

**Для цитирования:** Кузнецова Н.В., Дубровин А.И., Езерский В.А. Исследование влияния водоцементного отношения на прочность мелкозернистых бетонов с заполнителем из гранулированного доменного шлака // *Строительные материалы*. 2018. № 6. С. 20–23.

N.V. KUZNETSOVA<sup>1</sup>, Candidate of Sciences (Engineering) (nata-kus@mail.ru),  
 A.I. DUBROVIN<sup>1</sup>, Graduate student (dubrowin.aleksey-tambov@yandex.ru);  
 V.A. EZERSKIY<sup>2</sup>, Doctor of Sciences (Engineering) (wiz75micz@rambler.ru)  
<sup>1</sup> Tambov state technical university (106, Sovetskaya Street, Tambov, 392000, Russian Federation)  
<sup>2</sup> Bialystok University of Technology (45A, Wiejska Street, 15-351, Bialystok, Poland)

### Research in the Effect of Water-Cement Ratio on Strength of Fine Concretes with a Filler of Granulated Blast Furnace Slag

An original approach to the design of multi-component cement mixtures with fine aggregates with high water demand is presented. For different compositions of mixtures, the compressive strength of fine concrete samples was studied depending on the mixing factors. The shares of components in the mixture of granulated blast furnace slag, sand, water at a constant consumption of cement and modifying additives were considered as influencing factors: On the basis of the laboratory experiment data, mathematical models are constructed and with their help the dependences of the compressive strength of fine concrete on the slag/water ratio, as well as the optimal ratios in the filler–water system are established. The specific values of water-solid ratio for cement mixtures, at which the strength of the samples increases by up to 35%, as well as the optimal ratio of components making it possible to obtain fine concrete with high strength of up to 30 MPa are revealed.

**Keywords:** resource saving, fine concrete, water-need of mixture, water-solid ratio, granulated blast furnace slag.

**For citation:** Kuznetsova N.V., Dubrovin A.I., Ezerskiy V.A. Research in the effect of water-cement ratio on strength of fine concretes with a filler of granulated blast furnace slag. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2018. No. 6, pp. 20–23. (In Russian).

Основным направлением в развитии строительного производства является оптимизация показателя «качество–стоимость», что особенно актуально для бетонов в связи с высоким энергопотреблением при производстве цемента. Решение задач повышения экономичности и технологичности производства бетонов возможно путем снижения энергоемкости процессов, снижения себестоимости компонентов, повышения качества, энергоэффективности и экологичности продукции [1, 2]. Современная технология предполагает целенаправленное управление процессом формирования структуры бетонов, от которой зависят свойства получаемых материалов. Определяющим показателем качества бетонов является эффективность технологии бетонных материалов и самих материалов по критериям ресурсоемкости в расчете на единицу измерения конструкционного и функционального качества [3].

Известно, что оптимизация составов смесей направлена на решение двух основных вопросов: повышение плотности материала и достижение однородности распределения компонентов. Это возможно только с ис-

пользованием многокомпонентных составов, обеспечивающих высокую реологию смесей, а также повышенные физико-механические свойства цементных бетонов. Задачам ресурсосбережения отвечает введение в состав цементных смесей минеральных добавок в виде производственных отходов различной дисперсности и гидравлической активности. Повышение плотности бетона реализуется посредством оптимизации упаковки твердых частиц смеси, включая частицы заполнителя, мелкодисперсных компонентов, цемента, и снижением тем самым объема порового пространства [4, 5]. Кроме того, условием формирования плотной структуры бетона является снижение водоцементного отношения смесей. На практике это снижение реализуется двумя способами: интенсивным уплотнением смесей с пригрузом с использованием различных виброустановок, прессов и др. [6–8] и введением в смесь химических добавок пластифицирующего действия с высоким водоредуцирующим эффектом [4, 9].

Условием снижения себестоимости продукции способствует применение в производстве бетонов местных

компонентов смесей и снижение расхода цемента [10]. Неиспользуемые отходы металлургических производств региона представляют в основном шлаки различной дисперсности и гидравлической активности. Проведенные авторами экспериментальные исследования физико-механических свойств цементных композиционных материалов показали эффективность использования в качестве заполнителя измельченного гранулированного металлургического шлака. По результатам эксперимента были построены математические модели зависимостей прочности при сжатии, изгибе, плотности образцов от соотношений компонентов смесей. Прочность при сжатии образцов с содержанием шлака до 12% от массы сухой смеси (при соотношениях цемент/заполнитель, равных 1/6–1/2,5) оказалась выше соответствующих показателей образцов без добавок на 25–30%. Положительное влияние на повышение плотности и прочности образцов оказывало введение в смесь помимо шлака наполнителя высокой дисперсности – микрокремнезема в количестве до 10% от массы сухой смеси. С учетом задачи максимальной утилизации шлака выполнялась оптимизация составов смесей по критерию прочности при сжатии, в результате были предложены соотношения компонентов, позволяющие уменьшить расход цемента и получить образцы с высокой прочностью.

Одним из условий, принятых при планировании эксперимента, являлось фиксированное количество воды, принимаемое на каждую смесь компонентов в соответствии с планом. При этом известно, что водопотребность смесей, содержащих высокодисперсные компоненты с развитой поверхностью, повышается в связи с необходимостью смачивания поверхности этих частиц [11]. В таких многокомпонентных смесях требуемое количество воды складывается из воды, необходимой для прохождения реакции клинкерных минералов, и воды для обеспечения смачивания высокодисперсных минеральных частиц. В связи с этим количество воды, вводимой в смесь, может существенно различаться для смесей с различным соотношением компонентов. Следовательно, количество воды является, по сути, фактором, определяющим прочностные показатели цементных композиционных материалов.

Введение в смеси пластифицирующих добавок позволит не только снизить водоцементное отношение, но и повысить однородность распределения компонентов. Диспергирующее действие суперпластификаторов в водно дисперсных минеральных средах основано на создании плотных адсорбционных слоев на поверхности дисперсных частиц, что приводит к высокому эффекту пластифицирования и водоредуцирования [4]. Высокую реологию смесей обеспечивают многокомпонентные системы, включающие частицы микрокремнезема, экранирующие цементные частицы [12].

Учитывая результаты описанного выше эксперимента, была поставлена задача выявить влияние соотношения компонентов в системе вода–заполнитель на физико-механические характеристики цементных композиционных материалов с заполнителем из гранулированного доменного шлака.

Экспериментально исследовался основной механический показатель образцов цементных композитов: прочность на центральное сжатие  $R_{сж}$ , МПа (отклик  $Y_1$ ) в зависимости от трех смесевых факторов, отражающих массовые доли компонентов в смеси: шлака (фактор  $z_1$ ), воды (фактор  $z_2$ ) и песка (фактор  $z_3$ ). Постоянными факторами являлись вид и содержание в смеси цемента и добавок – микрокремнезема и суперпластификатора.

Эксперимент проводился на основании симплекс-решетчатого плана типа состав–свойство (табл. 1). В результате обработки экспериментальных данных предполагалось получить математическую модель зависимости

целевой функции от переменных факторов в виде неполного полинома третьей степени. В каждой точке такого плана должно выполняться условие:  $z_1 + z_2 + z_3 = 1$  [13].

Предполагалось, что каждый из факторов  $z_1, z_2, z_3$  следует рассматривать на следующих уровнях: 0; 0,333; 0,5; 1. Однако выполнить исследование в полном диапазоне изменения факторов невозможно, так как технологически невозможно создать образцы на основе цементных смесей при рекомендуемых соотношениях удельных весов выбранных компонентов (от 0 до 1). Для создания практически применяемых составов смесей были выбраны новые пределы изменения факторов. Поэтому при реализации эксперимента использовано локальное симплексное планирование в условиях ограничения предела изменения всех выбранных факторов [13].

На основе анализа проведенных экспериментов с использованием гранулированного доменного шлака была выделена подобласть, характеризующаяся следующими координатами вершин неправильного симплекса: вершина  $A_1$  ( $x_1=0,29; x_2=0,155; x_3=0,555$ ); вершина  $A_2$  ( $x_1=0,15; x_2=0,179; x_3=0,671$ ); вершина  $A_3$  ( $x_1=0; x_2=0,13; x_3=0,87$ ). В выбранной подобласти фактические значения долей компонентов смеси  $x_i$  изменялись в пределах: шлак ( $x_1$ ) – от 0 до 0,29; вода затворения ( $x_2$ ) – от 0,13 до 0,179; песок ( $x_3$ ) – от 0,555 до 0,87. Количество цемента в смеси принималось из соотношения, принятого при практическом проектировании: отношение цемента к заполнителю, включая шлак, равно 1:3.

С целью обеспечения возможности использования стандартного симплексного плана описанная выше подобласть была трансформирована до полного симплекса. Центрическое планирование в вершинах  $A_j$  псевдофакторов  $z_1, z_2, z_3$ , связанных в каждой точке плана с факторами  $x_1, x_2, x_3$  определенной зависимостью. Уровни изменения кодированных псевдофакторов  $z_1, z_2, z_3$ , и соответствующих им исходных натуральных факторов  $x_1, x_2, x_3$  представлены в табл. 1.

После получения результатов испытаний выполнялось построение модели зависимости исследуемого параметра от псевдофакторов  $z_1, z_2, z_3$ . Для получения математической модели с исходными натуральными факторами  $x_1, x_2, x_3$  названные псевдофакторы можно декодировать, рассчитав соответствующие зависимости, а затем подставить полученные выражения в модель  $Y_i = F(z_1, z_2, z_3)$ . В данном эксперименте с учетом плана (табл. 1) рассчитанные по этой методике формулы связи между псевдофакторами  $z_1, z_2, z_3$  и натуральными факторами  $x_1, x_2, x_3$  имели вид [14]:

$$\begin{aligned} z_1 &= 6,5488 - 19,0249x_2 - 4,6845x_3; \\ z_2 &= -5,9943 + 30,1147x_2 + 2,3901x_3; \\ z_3 &= 0,4455 + 11,0899x_2 - 2,2945x_3. \end{aligned}$$

Используя построенную по результатам измерений модель, предполагалось выполнить поиск оптимальных значений водоцементного отношения с учетом состава

Таблица 1

План эксперимента

№ опыта	$z_1$	$z_2$	$z_3$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$Y_1$
1	1	0	0	0,29	0,155	0,555	
2	0	1	0	0,15	0,179	0,671	
3	0	0	1	0	0,13	0,87	
4	0,5	0,5	0	0,22	0,167	0,613	
5	0,5	0	0,5	0,145	0,143	0,712	
6	0	0,5	0,5	0,075	0,155	0,77	
7	0,3333	0,3333	0,3333	0,147	0,155	0,698	

Таблица 2

Состав изменяемых компонентов смеси

№ опыта	$z_1$	$z_2$	$z_3$	Содержание компонентов в смеси, доля/кг		
				$x_1$ шлак	$x_2$ вода	$x_3$ песок
1	1	0	0	0,290/0,36	0,155/0,193	0,555/0,689
2	0	1	0	0,150/0,186	0,179/0,222	0,671/0,833
3	0	0	1	0/0	0,130/0,161	0,87/1,081
4	0,5	0,5	0	0,220/0,273	0,167/0,207	0,613/0,761
5	0,5	0	0,5	0,145/0,18	0,143/0,178	0,712/0,884
6	0	0,5	0,5	0,075/0,093	0,155/0,193	0,770/0,956
7	0,3333	0,3333	0,3333	0,147/0,183	0,155/0,193	0,698/0,867

ментных смесей, обеспечивающих наивысшую прочность исследуемых образцов.

Цементная смесь для изготовления образцов включала следующие компоненты: портландцемент (постоянной массы для всех опытов плана), мелкий заполнитель в виде кварцевого песка и измельченного гранулированного доменного шлака, добавки – микрокремнезем и суперпластификатор (постоянной массы для всех опытов плана).

Расход портландцемента М500 в смеси принимался постоянным и составлял 0,36 кг на один опыт. В качестве заполнителя использовался кварцевый песок с модулем крупности 2. В качестве техногенного микрозаполнителя использовался измельченный доменный шлак ОАО «Новолипецкий металлургический комбинат». Исходный гранулометрический состав шлака характеризовался крупностью от 0,1 до 2,5 мм с модулем крупности 1,9. Выполнялось дополнительное измельчение шлака в вибровращательной шаровой мельнице в течение 30 мин. Технологический режим и время измельчения шлака подбирались экспериментально для получения средней крупности частиц около  $10^{-4}$  м. Количество песка и шлака принималось в соответствии с планом эксперимента (табл. 2). В качестве высокоактивной добавки использовался микрокремнезем МК-80 с удельной поверхностью до 2000 м<sup>2</sup>/кг, получаемый при переработке природных опок. Микрокремнезем вводился в смесь в количестве 10% от массы цемента, т. е. 0,036 кг на каждый опыт.

В качестве пластифицирующей добавки использовался суперпластификатор Кратасол ПФМ ПАО «Пигмент» (г. Тамбов). Согласно рекомендациям производителя и результатам проведенных экспериментов, а также учитывая наличие в составе смесей высокодисперсных компонентов, принята дозировка добавки – 2% от массы цемента, т. е. 0,007 кг на каждый опыт.

Количество воды затворения принималось по плану эксперимента (табл. 2). При этом водоцементное отношение в опытах изменялось от 0,49 до 0,62, водотвердое (с учетом шлака) – от 0,27 до 0,48.

На основе результатов экспериментального определения прочности при центральном сжатии образцов согласно ГОСТ 10180–2012 рассчитана зависимость  $Y_1 = f(z_1, z_2, z_3)$  [14]:

$$Y = 23,81z_1 + 16,36z_2 + 20,65z_3 + 47,50z_1z_2 - 17,8z_1z_3 - 4,86z_2z_3 - 148,32z_1z_2z_3.$$

Как следует из графического представления полученной модели прочности на сжатие (см. рисунок), при выбранных соотношениях компонентов в системе получена область, ограниченная изолинией 24 МПа, где прочность образцов, содержащих шлак, выше, чем у образцов без шлакового заполнителя (точка 3 –  $R_{сж} = 20$  МПа).

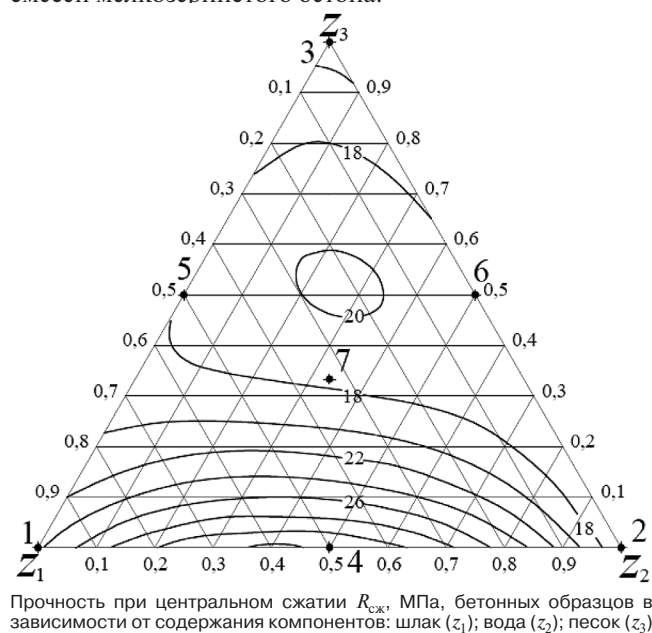
На рисунке видно, что наивысшая прочность при центральном сжатии  $Y_1$  бетонных образцов получена в точке 4 и равна 31,96 МПа при соотношении компонентов шлак:вода:песок = 0,5:0,5:0 или в натуральных значениях – 0,273:0,207:0,761 кг.

Наименьшая прочность при центральном сжатии  $Y_1$  образцов наблюдается в точке 2 ( $x_1=0,115$ ;  $x_2=0,179$ ;  $x_3=0,671$ ;  $Y_1=16,36$  МПа), для которой было характерно наивысшее водотвердое отношение. Из этого следует вывод, что указанное соотношение негативно влияет на прочность образцов при сжатии.

Из диаграммы рисунка также видно, что при движении из точки  $Z_1$  в  $Z_2$ , когда шлак частично замещается на воду, а также из точки  $Z_3$  в  $Z_2$ , когда песок частично замещается на воду, с увеличением доли воды устойчиво понижается прочность образцов при сжатии. В то же время при движении из точки  $Z_3$  в  $Z_1$ , когда шлак частично замещает песок, наблюдается существенное изменение прочности.

Значительное влияние на прочность оказывает соотношение шлак/вода: в области минимальных принятых значений при отсутствии или небольшом количестве шлака наблюдается некоторое повышение прочности образцов (точка 3). При увеличении значений соотношения шлак/вода до 1,3 прочность образцов повышается; при дальнейшем увеличении до 1,86 – падает.

Оптимальные соотношения компонентов для достижения максимальных значений прочности находятся в области между точками 1 и 4. Следовательно, в этой области находятся оптимальные составы компонентов смесей мелкозернистого бетона.



Прочность при центральном сжатии  $R_{сж}$ , МПа, бетонных образцов в зависимости от содержания компонентов: шлак ( $z_1$ ); вода ( $z_2$ ); песок ( $z_3$ )



Следует отметить, что при максимальном соотношении цемент/песок, равном 0,522, прочность ниже, чем при меньших долях вяжущего в смеси, например в точке 4 при соотношении цемент/песок, равном 0,47.

#### Выводы

1. Анализ полученных результатов определения водопотребности цементных смесей с дисперсными компонентами в виде гранулированного доменного шлака позволил выявить оптимальное водотвердое соотношение, равное 0,12–0,15 при количестве шлака в смеси или соотношении цемент/шлак, равном 1–1,32. Увеличение водотвердого соотношения в данной области улучшает прочностные характеристики образцов на 35%.

2. Получена область с соотношениями компонентов, при которых прочность на центральное сжатие образцов мелкозернистого бетона, содержащих шлак, составляет более 24 МПа, что выше, чем у образцов без шлакового заполнителя.

3. Установлены оптимальные соотношения составляющих в смеси (от  $x_1=0,248$ ;  $x_2=0,162$ ;  $x_3=0,613$  до  $x_1=0,206$ ;  $x_2=0,169$ ;  $x_3=0,613$ ), позволяющие максимально утилизировать шлак при пониженном водосодержании и получить образцы мелкозернистого бетона с прочностью при сжатии не ниже 30 МПа.

#### Список литературы

1. Карпенко Н.И., Ярмаковский В.Н. Основные направления ресурсоэнергосбережения при строительстве и эксплуатации зданий. Ч. 1. Ресурсоэнергосбережение на стадии производства строительных материалов, стеновых изделий и ограждающих конструкций // *Строительные материалы*. 2013. № 7. С. 12–18.
2. Майорова Т.В., Пономарева О.С. Методика оценки экономической оценки эффективности экологического менеджмента предприятий металлургической отрасли // *Вестник МГУ*. 2015. № 4. С. 112–116.
3. Баженов Ю.М., Чернышов Е.М., Коротких Д.Н. Конструирование структур современных бетонов: определяющие принципы и технологические платформы // *Строительные материалы*. 2014. № 3. С. 6–14.
4. Баженов Ю.М., Демьянова В.С., Калашников В.И. Модифицированные высококачественные бетоны М.: АСВ, 2006. 368 с.
5. Дворкин Л.И., Житковский В.В., Степасюк Ю.А., Ковальчук Т.В. Проектирование составов фибробетона с использованием экспериментально-статистических моделей // *Технологии бетонов*. 2016. № 11–12. С. 29–35.
6. Батраков В.Г. Модифицированные бетоны. М.: Стройиздат, 1990. 399 с.
7. Краснов А.М., Федосов С.В., Акулова М.В. Влияние высокого наполнения мелкозернистого бетона на структурную прочность // *Строительные материалы*. 2009. № 1. С. 48–50.
8. Гусев Б.В., Зазимко В.Г. Вибрационная технология бетона. Киев: Будівельник, 1991. 158 с.
9. Пшеничный Г.Н. Проблемы, существующие в бетоне // *Технологии бетонов*. 2014. № 12. С. 42–45.
10. Bhaskar Desai V., Chaitanya lakshmi C. An Experimental investigation on strength properties of cement concrete modified with ground granulated blast furnace slag // *International Journal of Scientific Research in Science, Engineering and Technology*. 2015. No. 1, pp. 427–434.
11. Калашников В.И. Через рациональную реологию в будущее бетонов. Ч. 3. От высокопрочных и особо высокопрочных бетонов будущего к суперпластифицированным бетоном общего назначения // *Технологии бетонов*. 2008. № 1. С. 22–26.
12. Калашников В.И., Мороз М.Н., Тараканов О.В., Калашников Д.В., Суздальцев О.В. Новые представ-

ления о механизме действия суперпластификаторов, совместно размолотых с цементом или минеральными породами // *Строительные материалы*. 2014. № 9. С. 70–75.

13. Бродский В.З. и др. Таблицы планов эксперимента: Справочное издание. М.: Металлургия, 1982. 752 с.
14. Зедгинидзе И. Г. Планирование эксперимента для исследования многокомпонентных систем. М.: Наука, 1976. 390 с.

#### References

1. Karpenko N.I., Yarmakovskiy V.N. The main directions of energy saving at construction and operation of buildings. Part 1. Energy saving on a stage of manufacture of structural materials, wall products and the protecting designs. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2013. No. 7, pp. 12–18. (In Russian).
2. Mayorova T.V., Ponomareva O.S. Technique of assessment of economic assessment of effectiveness of ecological management of the enterprises of metallurgical branch. *Vestnik MGU*. 2015. No. 4, pp. 112–116. (In Russian).
3. Bazhenov J.M., Chernyshov E.M., Korotkikh D.N. Designing of modern concrete structures: determining principles and technological platforms. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2014. No. 3, pp. 6–14. (In Russian).
4. Bazhenov Yu.M., Demyanova B.C., Kalashnikov V.I. Modificirovannye vysokokachestvennye betony [The modified high-quality concrete]. Moscow: ASV. 2006. 368 p.
5. Dvorkin L.I., Zhitkovskiy V.V., Stepasyuk Yu.A., Koval'chuk T.V. Projection of compositions of fibrous concrete with use of experimental and statistical models. *Tekhnologii betonov*. 2016. No. 11–12, pp. 29–35. (In Russian).
6. Batrakov V.G. Modificirovannye betony [The modified concrete]. Moscow: Stroizdat. 1990. 399 p.
7. Krasnov A.M., Fedosov S.V., Akulova M.V. Influence of high filling of fine graded concrete on structural strength. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2009. No. 1, pp. 48–50. (In Russian).
8. Gusev B.V., Zazimko V.G. Vibracionnaya texnologiya betona [Vibration technology of concrete]. Kiev: Budivelnik. 1991. 158 p.
9. Pshenichniy G.N. The problems existing in science about concrete. *Tekhnologii betonov*. 2014. No. 12, pp. 42–45. (In Russian).
10. Bhaskar Desai V., Chaitanya lakshmi C. An Experimental investigation on strength properties of cement concrete modified with ground granulated blast furnace slag. *International Journal of Scientific Research in Science, Engineering and Technology*. 2015. No. 1, pp. 427–434.
11. Kalashnikov V.I. Through rational rheology in the future of concrete. Part 3. From high-strength and high-strength concrete of the future to superplasticized concrete of general purpose. *Tekhnologii betonov*. 2008. No. 1, pp. 22–26. (In Russian).
12. Kalashnikov V.I., Moroz M.N., Tarakanov O.V., Kalashnikov D.V., Suzdaltsev O.V. New ideas about action mechanism of superplasticizers grinded jointly with cement or mineral rocks. *Stroitel'nye Materialy*. 2014. No. 9, pp. 70–75. (In Russian).
13. Brodskiy V.Z. and others. Tablicy planov eksperimenta. Spravochnoe izdanie [Tables of plans of an experiment. Reference media]. Moscow: Metallurgiya. 1982. 752 p.
14. Zedginidze I.G. Planirovanie eksperimenta dlya issledovaniya mnogokomponentnykh sistem [Planning an experiment to study multicomponent systems]. Moscow: Nauka. 1976. 390 p.

А.Л. КРИШАН<sup>1</sup>, д-р техн. наук (kris\_al@mail.ru); В.И. РИМШИН<sup>2</sup>, д-р техн. наук, чл.-корр. РААСН (v.rimshin@niisf.ru); М.А. АСТАФЬЕВА<sup>1</sup>, инженер (skymanika@mail.ru)

<sup>1</sup> Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова (455000, г. Магнитогорск, п-т Ленина, 38)

<sup>2</sup> Научно-исследовательский институт строительной физики РААСН (127238, Россия, г. Москва, Локомотивный пр., 21)

## Прочность усовершенствованных трубобетонных элементов квадратного поперечного сечения\*

Целью работы явилось экспериментально-теоретическое исследование силового сопротивления коротких центрально-сжатых трубобетонных элементов (ТБЭ) квадратного сечения для выявления эффективности использования в них спирального армирования. Исследования показали, что использование относительно небольшого количества спиральной арматуры (порядка 1%) позволило примерно в 1,3 раза увеличить эффект обоймы трубобетонных конструкций. Только за счет спирального армирования прочность центрально-сжатых трубобетонных образцов, изготовленных из бетона класса В40, возросла на 25%, а из бетона класса В80 – на 40%. Предложена методика расчета прочности центрально-сжатых ТБЭ квадратного сечения, в том числе имеющих спиральное армирование. Методика учитывает рост прочности и деформативности бетонного ядра за счет одновременного использования двух видов косвенного армирования – в виде внешней стальной оболочки и спиральной арматуры.

**Ключевые слова:** сжатый трубобетонный элемент квадратного сечения, прочность, деформативность, эффект обоймы.

**Для цитирования:** Кришан А.Л., Римшин В.И., Астафьева М.А. Прочность усовершенствованных трубобетонных элементов квадратного поперечного сечения // *Строительные материалы*. 2018. № 6. С. 24–28.

A.L. KRISHAN<sup>1</sup>, Doctor of Sciences (Engineering), (kris\_al@mail.ru); V.I. RIMSHIN<sup>2</sup>, Doctor of Sciences (Engineering), Corresponding Member of RAACS (v.rimshin@niisf.ru); M.A. ASTAFIEVA<sup>1</sup>, Engineer (skymanika@mail.ru)

<sup>1</sup> Nosov Magnitogorsk State Technical University (38, Lenin Avenue, 455000, Magnitogorsk, Chelyabinsk Region, Russian Federation)

<sup>2</sup> Scientific-Research Institute of Building Physics of the Russian Academy architecture and construction sciences (21, Lokomotivny Driveway, Moscow, 127238, Russian Federation)

### Strength of Improved Pipe-Concrete Elements of Square Cross-Section\*

The aim of the work is experimental and theoretical study of the power resistance of short centrally compressed pipe-concrete elements (PCE) of square cross-section to identify the effectiveness of the use of spiral reinforcement in them. Studies have shown that the use of a relatively small amount of spiral reinforcement (about 1%) made it possible to increase the effect of the cage of pipe concrete structures by about 1.3 times. Only due to the spiral reinforcement the strength of centrally compressed pipe-concrete samples, made of concrete of B40 class, increased by 25%, and of B80class concrete– 40%. A method for calculating the strength of centrally compressed PCE of square-section, including those with spiral reinforcement, is proposed. The method takes into account the growth of strength and deformability of the concrete core due to the simultaneous use of two types of indirect reinforcement – in the form of an outer steel shell and spiral reinforcement.

**Keywords:** compressed pipe-concrete element, strength, deformability, effect of casing.

**For citation:** Krishan A.L., Rimshin V.I., Astafieva M.A. Strength of improved pipe-concrete elements of square cross-section. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2018. No. 6, pp. 24–28. (In Russian).

Сжатые трубобетонные элементы (ТБЭ) квадратного и прямоугольного сечений находят все более широкое применение в строительной отрасли [1–5]. Они особенно востребованы при строительстве многоэтажных каркасных зданий с укрупненной сеткой колонн [6]. Такие здания характеризуются относительно высокими нагрузками на вертикальные несущие конструкции. Для них требуются высокопрочные, экономичные, безопасные в эксплуатации колонны. Имеющийся мировой опыт строительства показывает, что вышеперечисленными свойствами обладают трубобетонные колонны [7–10].

На практике чаще применяются ТБЭ круглого поперечного сечения. Основная причина заключается в значительно меньшем эффекте обоймы, который проявляется в подобных конструкциях квадратного или прямоугольного сечения. В расчетах прочности таких элементов эффект обоймы, как правило, вовсе не учитывают из-за недостаточной изученности этого вопроса.

Тем не менее при проектировании следует учитывать, что призматическая поверхность конструкций упрощает их применение в качестве колонн многоэтажных зданий. Здесь не возникает дополнительных сложностей при устройстве стыков колонн с несущими эле-

ментами перекрытий. Другим немаловажным доводом в пользу этих элементов является быстрота возведения каркасов, которую из-за наличия внешней стальной оболочки обеспечивает применение ТБЭ любой формы поперечного сечения [11–13].

Вышеперечисленные обстоятельства доказывают актуальность выполнения разработок, направленных на повышение эффекта обоймы в ТБЭ квадратного сечения. Достигнуть такого повышения можно за счет армирования бетонного ядра спиральной арматурой. Цель данной работы – изучение особенностей силового сопротивления и экспериментальное выявление эффекта обоймы коротких центрально-сжатых ТБЭ квадратного сечения со спиральным армированием бетонного ядра.

Для достижения поставленной цели выполнены экспериментальные исследования прочности центрально-сжатых лабораторных образцов различной конструкции. Всего было изготовлено и испытано пять серий образцов:

- серия Т – стальные образцы, изготовленные из профильной трубы квадратного сечения 140×4 мм;
- серия ТБ.40 – трубобетонные образцы из тяжелого бетона класса В40, заключенного в стальную трубу 140×4 мм;

\* Статья подготовлена по результатам выполнения научного проекта в рамках гранта РААСН № 7.4.11.

\* The article is prepared by results of execution of a scientific project within the frame of RAACS grant № 7.4.11.



Рис. 1. Установка арматурного каркаса в образцы серии ТБС.40



Рис. 2. Лабораторный образец перед испытанием

– серия ТБ.80 – образцы, аналогичные серии ТБ.40, но из бетона класса В80;  
 – серия ТБС.40 – образцы, аналогичные серии ТБ.40, но имеющие спиральное армирование;  
 – серия ТБС.80 – образцы, аналогичные серии ТБС.40, но из бетона класса В80.

Основу каждой серии составляли три образца «близнеца». Длина всех образцов составляла 560 мм. Внешние оболочки выполнялись из стальных гнутых замкнутых профилей квадратного сечения по ГОСТ 30245–2012 с размерами  $140 \times 140 \times 4$  мм. Трубы изготовлены из стали класса С275 с пределом текучести  $\sigma_{yp} = 285$  МПа. Временное сопротивление стали при разрыве составило  $\sigma_{up} = 435$  МПа. Стальные оболочки образцов каждой серии отрезались от одной трубы и торцевались. На торцах лабораторных образцов крепились металлические пластины из стали Ст3 толщиной 10 мм.

В образцах серий ТБС.40 и ТБС.80 перед формованием устанавливался арматурный каркас (рис. 1). В качестве спиральной арматуры каркаса служила проволока  $\varnothing 5$  Вр500 (ГОСТ 6727–80) с шагом навивки 30 мм. Диаметр спирали составлял 120 мм. Продольные стержни каркаса изготавливались из арматуры 4  $\varnothing 6$  А500С (ГОСТ Р 52544–2006). В целях сохранения проектной формы продольная и спиральная арматуры скреплялись вязальной проволокой. Предел текучести

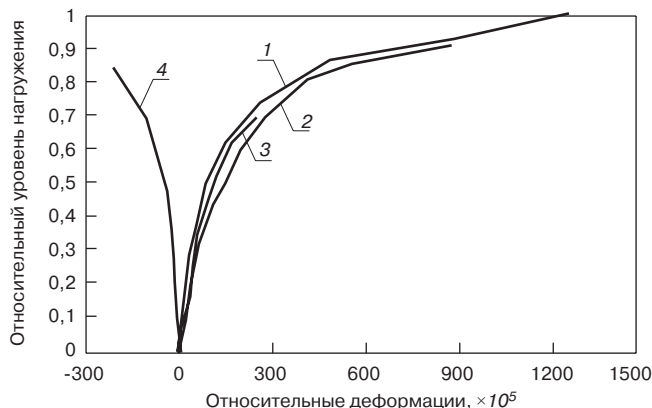


Рис. 3. Зависимости относительных деформаций от уровня нагружения для образца серии ТБС.40-1: 1 – ИЧТ; 2 – тензодатчик Аистова; 3 – тензодатчик продольного направления; 4 – тензодатчик поперечного направления

арматурной проволоки составил  $\sigma_{ys} = 552$  МПа, а стержневой арматуры –  $\sigma_{ys} = 548$  МПа.

Испытания лабораторных образцов проводились в вертикальном положении в возрасте 28 сут на 500-тонном гидравлическом прессе 2ПГ-500 кратковременной сжимающей нагрузкой. Опирали торцов было шарнирным. Передача нагрузки на образцы производилась на все поперечное сечение. Поскольку в приторцевых зонах обычно проявляется концентрация напряжений, перед испытанием здесь закреплялись бандажи, по высоте равные половине от внешнего размера поперечного сечения образца (рис. 2).

Вертикальность образцов при установке на пресс проверялась по геометрической оси с помощью отвеса и строительного уровня. Центрирование вначале осуществлялось по геометрическим осям нижней плиты пресса, а затем по физической оси элемента. С этой целью производилось пробное 2–3-кратное нагружение образца до уровня 20% от ожидаемой разрушающей нагрузки. Нагружение всех образцов проводилось ступенями по 10% от теоретической разрушающей нагрузки  $N_u^{th}$ . После достижения нагрузки значения  $0,7 N_u^{th}$  размер ступени снижали в два раза. Время выдержки на каждой ступени составляло 10 мин. Образцы доводили до разрушения.

Изучение напряженно-деформированного состояния испытуемых армированных образцов проводилось в основном тензометрическим методом. Тензодатчики наклеивались на внешнюю стальную оболочку (в вертикальном и горизонтальном направлениях), а также на продольную и спиральную арматуру каркаса (при наличии). На трубе-оболочке использовались датчики с базой 20 мм, а на арматуре – с базой 5 мм.

Регистрация показаний тензорезисторов осуществлялась при помощи универсального многоканального измерительно-вычислительного комплекса МИС-036. Измерения продольных деформаций стальной оболочки дублировались показаниями механических тензодатчиков Аистова и электронных индикаторов с ценой деления  $0,001$  мм.

Основные результаты испытаний лабораторных образцов представлены в таблице. Здесь же экспериментальные значения прочности  $N_u^{exp}$  и относительных продольных деформаций образцов при достижении максимальной нагрузки  $\varepsilon_u^{exp}$  сопоставлены с их теоретическими величинами  $N_u^{th}$  и  $\varepsilon_u^{th}$ .

Для количественной оценки влияния эффекта косвенного армирования в таблице приведен коэффициент  $m_c$ , подсчитанный по формуле:

$$m_c = N_u^{th} / N_{bs}, \quad (1)$$

где  $N_{bs}$  – усилие, определяемое в виде суммы максимальных усилий в бетонном ядре, стальной оболочке и продольной арматуре (при наличии) в предположении их работы на одноосное сжатие.

Формула для вычисления  $N_{bs}$  имеет следующий вид:

$$N_{bs} = R_{bu} A + \sigma_{yp} A_p + \sigma_{ys} A_s, \quad (2)$$

где  $R_{bu}$  – призмная прочность исходного бетона;  $\sigma_{yp}$  и  $\sigma_{ys}$  – пределы текучести стали внешней оболочки и про-

Серия, образец	$R_{bu}$ , МПа	Разрушающая нагрузка, кН		$\frac{N_u^{exp}}{N_u^{th}}$	$m_c$	Деформации $\times 10^5$		$\frac{\varepsilon_u^{exp}}{\varepsilon_u^{th}}$
		$N_u^{exp}$	$N_u^{th}$			$\varepsilon_u^{exp}$	$\varepsilon_u^{th}$	
Т-1	–	623	608	1,02	–	170	142	1,19
Т-2	–	632	608	1,04	–	160	142	1,13
Т-3	–	650	608	1,07	–	165	142	1,16
ТБ.40-1	40,2	1570	1456	1,08	1,11	530	489	1,08
ТБ.40-2	42,3	1733	1489	1,16	1,1	550	482	1,14
ТБ.40-3	43,5	1683	1506	1,12	1,1	510	479	1,06
ТБ.80-1	84,4	1967	2064	0,95	0,93	415	450	0,92
ТБ.80-2	81,7	1867	2057	0,91	0,94	550	451	1,22
ТБ.80-3	82,7	2083	2060	1,01	0,94	395	450	0,88
ТБС.40-1	40,2	2017	1828	1,1	1,3	1250	1104	1,13
ТБС.40-2	42,3	1900	1861	1,02	1,29	1330	1060	1,25
ТБС.40-3	43,5	1933	1887	1,02	1,29	870	1037	0,84
ТБС.80-1	84,4	2733	2957	0,92	1,27	655	730	0,9
ТБС.80-2	81,7	2967	2812	1,06	1,24	770	740	1,04
ТБС.80-3	82,7	3033	2880	1,05	1,25	880	736	1,19



Рис. 4. Характер разрушения образцов серии ТБС.40

дольной арматуры;  $A$ ,  $A_p$  и  $A_s$  – площади поперечных сечений бетонного ядра, стальной трубы-оболочки и продольной арматуры.

Анализ значений коэффициента  $m_c$  показывает, что в ТБЭ без спирального армирования эффект обоймы проявляется слабо. В образцах серии ТБ.40 коэффициент  $m_c=1,1$ , а в аналогичных образцах из высокопрочного бетона он оказался менее единицы. При этом замеренные деформации укорочения (от 0,00395 до 0,0053) даже для серии ТБ.80 заметно выше, чем обычно наблюдается для условий одноосного сжатия. Т. е., деформации однозначно свидетельствуют о том, что бетон всех этих образцов находился в условиях объемного сжатия.

Низкая эффективность обоймы объясняется неблагоприятными условиями ее работы. Стальная труба-оболочка, обеспечивая бетону условия ограниченного деформирования в поперечном направлении, работает в условиях сложного напряженного состояния. От бокового давления бетона в стенках трубы возникают усилия изгиба и растяжения. В результате труба воспринимает значительно меньшее сжимающее усилие в продольном направлении по сравнению с образцами серии Т, в стенках которых возникают преимущественно сжимающие напряжения. Стальная труба-оболочка образцов серии ТБ.80 воспринимает меньшее усилие сжатия по сравнению с образцами серии ТБ.40, поскольку в высокопрочном бетонном ядре создается большее по величине боковое давление. Данным обстоятельством и объясняются столь низкие значения коэффициента  $m_c$  в образцах серии ТБ.80.

Наличие спиральной арматуры в образцах серий ТБС.40 и ТБС.80, несмотря на сравнительно небольшой процент армирования (1,1%), существенно повысило их эффективность. Коэффициент  $m_c$  для образцов из бетона класса В40 составил порядка 1,3, а для образцов из высокопрочного бетона – 1,25. Сопоставление прочности образцов различных серий также наглядно свидетельствует о преимуществе образцов со спиральным армированием. Так, прочность образцов серий ТБ.40 и ТБ.80 повысилась по отношению к стальным образцам соответственно в 2,4 и 3,4 раза. Наличие в ТБЭ спирального армирования привело к более значительному росту прочности. Прочность образцов серий ТБС.40 и ТБС.80 повысилась по отношению к образцам серии Т соответственно в 3 и 4,7 раза. По сравне-

нию с образцами серий ТБ.40 и ТБ.80 прочность образцов серий ТБС.40 и ТБС.80 оказалась выше на 25 и 40% соответственно.

Здесь следует обратить внимание на больший прирост прочности у образцов со спиральной арматурой, изготовленных из бетона класса В80. Этот результат объясняется большим вкладом объемно-напряженного высокопрочного железобетонного ядра в прочность ТБЭ.

По результатам замера относительных деформаций стальной оболочки, а для образцов серий ТБС.40 и ТБС.80 также спиральной и продольной арматуры построены зависимости  $n-\varepsilon$  (здесь  $n=N/N_u$  – относительный уровень нагрузки;  $\varepsilon$  – деформации образца в продольном или поперечном направлении). На рис. 3 приведены характерные зависимости для образца ТБС.40-1. Их анализ позволяет выделить три этапа работы ТБЭ. Первый этап – квазиупругая работа элемента, который продолжался до  $n=0,45-0,55$ . Далее наблюдался упругопластический этап. В бетонном ядре интенсивно образовывались микротрещины, что способствовало увеличению его объема. Активно включалась в работу спиральная арматура. Стальная труба-оболочка постепенно переходила в состояние текучести. На последнем этапе происходило разрушение лабораторных образцов.

Характер разрушения образцов исследованных серий зависел от наличия в них бетонного (железобетонного) ядра. В образцах серии Т при максимально достигнутой нагрузке начинался процесс местной потери устойчивости стенок. Разрушение образцов серий ТБ.40, ТБ.80, ТБС.40 и ТБС.80 протекало пластично и имело схожий характер (рис. 4). К моменту достижения предельной нагрузки у них наблюдалось появление складок на поверхности стальной оболочки. Этому предшествовал процесс раздробления бетонного (железобетонного) ядра, расположенного в зоне образования складки, в результате чего между бетоном и стальной оболочкой нарушилось сцепление. Далее бетон уже не мог предохранять стенки стальной оболочки от местной потери устойчивости.

Максимально зафиксированные величины продольных деформаций образцов ТБЭ зависели от класса исходного бетона, но в большей степени от наличия в них спиральной арматуры. В образцах серии ТБС.40 среднее значение достигло 1%, что примерно в два раза больше по сравнению с аналогичной деформацией образцов

серий ТБ.40. При разрушении образцов серии ТБС.40 продольная деформация составляла в среднем 0,45%, а образцов серии ТБС.80 – в 1,6 раза больше.

В данной работе рассматривается упрощенный расчет прочности ТБЭ квадратного поперечного сечения на основе метода предельных усилий. Как ранее показали наши исследования [1], для подобных конструкций без спиральной арматуры этот расчет дает приемлемые результаты.

Согласно данному методу определение теоретического значения разрушающей нагрузки исследованных образцов осуществляется по формуле:

$$N = R_{b3m} A + \sigma_{pz} A_{p,eff} + \sigma_s A_s, \quad (3)$$

где  $R_{b3m}$  – прочность объемно-сжатого бетонного (железобетонного) ядра;  $\sigma_{pz}$  и  $\sigma_s$  – сжимающие напряжения в стальной оболочке и продольной арматуре в стадии разрушения ТБЭ;  $A_{p,eff}$  – площадь эффективного сечения стальной трубы-оболочки.

С целью упрощения расчетов предлагается использовать усредненную прочность при сжатии бетонного ядра  $R_{b3m}$ , определяемую по формуле:

$$R_{b3m} = \frac{R_{b30}(A - A_c) + R_{b3u} A_c}{A}, \quad (4)$$

где  $R_{b3u}$  – прочность при сжатии бетона, имеющего косвенное армирование стальной оболочкой и спиралью;  $R_{b30}$  – прочность при сжатии бетона, имеющего косвенное армирование только в виде стальной оболочки;  $A_c$  – площадь центральной зоны, ограниченной спиралью.

Прочность  $R_{b30}$  предлагается рассчитывать по формуле:

$$R_{b30} = R_{bu} \left[ 1 + \xi \cdot \gamma_p \cdot \left( 0,25 \bar{\sigma} + \frac{\bar{\sigma} - 2}{4} + \sqrt{\left( \frac{\bar{\sigma} - 2}{4} \right)^2 + 10 \bar{\sigma}} \right) \right], \quad (5)$$

где  $\bar{\sigma}$  – относительная величина бокового давления со стороны стальной оболочки на центральную часть бетонного ядра;  $\gamma_p$  – коэффициент, учитывающий упрочнение холодногнутых профилей ( $\gamma_p = 1,1$  при использовании стальной оболочки из холодногнутых профилей;  $\gamma_p = 1$  в остальных случаях);  $\xi$  – коэффициент, учитывающий неоднородность распределения главных напряжений по квадратному сечению бетонного ядра [1] и вычисляемый по формуле:

$$\xi = (1 - 0,01 b / \delta)^2 \geq 0, \quad (6)$$

где  $b$  – ширина поперечного сечения;  $\delta$  – толщина стенки стальной трубы-оболочки.

Относительная величина бокового давления со стороны стальной оболочки на бетонное ядро к моменту потери прочности сжатого ТБЭ рассчитывается по формуле:

$$\bar{\sigma} = 0,48 e^{-(a_1 + b_1) \rho^{0,8}}, \quad (7)$$

где  $b_1$  и  $a_1$  – коэффициенты материала, устанавливаемые на основании опытов [14] (для тяжелого бетона  $b_1 = 0,096$ ;  $a_1 = 0,5 b_1$ );  $\rho$  – конструктивный коэффициент, вычисляемый по формуле:

$$\rho = \frac{\sigma_{yp} A_p}{R_{bu} A}. \quad (8)$$

Прочность  $R_{b3u}$  находится по формуле:

$$R_{b3u} = R_{b3s} \left[ 1 + \xi \cdot \gamma_p \cdot \frac{A}{A_c} \left( 0,25 \bar{\sigma}_s + \frac{\bar{\sigma}_s - 2}{4} + \sqrt{\left( \frac{\bar{\sigma}_s - 2}{4} \right)^2 + \frac{\bar{\sigma}_s}{b_1}} \right) \right], \quad (9)$$

где  $R_{b3s}$  – прочность при сжатии бетона, имеющего косвенное армирование только в виде спирали; – относи-

тельная величина бокового давления со стороны стальной оболочки на спирально армированное ядро.

Значение вычисляется с использованием формул (7) и (8). При этом при нахождении конструктивного коэффициента  $\rho$  вместо  $R_{bu}$  следует подставлять  $R_{b3s}$ .

Прочность спирально армированного бетона  $R_{b3s}$  определяется по формуле:

$$R_{b3s} = R_{bu} \left[ 1 + \left( 0,25 \bar{\sigma}_{sc} + \frac{\bar{\sigma}_{sc} - 2}{4} + \sqrt{\left( \frac{\bar{\sigma}_{sc} - 2}{4} \right)^2 + \frac{\bar{\sigma}_{sc}}{b_1}} \right) \right], \quad (10)$$

где  $\bar{\sigma}_{sc}$  – относительные радиальные напряжения в бетоне внутри контура спирали, определяемые по формуле:

$$\bar{\sigma}_{sc} = \frac{2 A_{sc}}{d_{eff} s} \cdot \frac{\sigma_{ysc}}{R_{bu}}, \quad (11)$$

в которой  $\sigma_{ysc}$  – предел текучести спирали;  $A_{sc}$  – площадь сечения арматуры спирали;  $d_{eff}$  – диаметр витков спирали;  $s$  – шаг витков спирали.

Следует заметить, что формула (11) предполагает полное использование спиральной арматуры, когда напряжения в ней достигают предела текучести. В каких-то случаях эти напряжения могут оказаться несколько меньшими. В работе [15] приведено решение для общего случая расчета.

Сжимающее напряжение в стальной оболочке вычисляется по формуле:

$$\sigma_{pz} = R_{bs} \left( \sqrt{\rho^2 - 3 \bar{\sigma}_s} - \bar{\sigma}_s \right) \frac{A}{A_p}. \quad (12)$$

Поскольку в стенках трубы-оболочки возникают изгибающие моменты, при определении воспринимаемых ей продольных сжимающих усилий в расчет берется только часть площади поперечного сечения  $A_{p,eff}$ . Эффективная площадь сечения стальной оболочки определяется по формуле:

$$A_{p,eff} = 4 b_{eff} \delta, \quad (13)$$

где  $b_{eff}$  – эффективная ширина стенки оболочки, определяемая в соответствии с рекомендациями работы [16];  $\delta$  – толщина стенки оболочки.

Напряжение в продольной арматуре  $\sigma_s$  определяется с учетом ее совместного деформирования с бетонным ядром  $\epsilon_{su} = \epsilon_{b00}$ , где  $\epsilon_{b00}$  – деформация объемно-сжатого бетона при максимально сжимающем напряжении. Связь между напряжениями и деформацией арматуры обычной прочности можно представить диаграммой Прандтля. Тогда напряжение вычисляется по формуле:

$$\sigma_s = \epsilon_{b00} \cdot E_s \leq \sigma_{ys}, \quad (14)$$

где  $E_s$  – модуль упругости стальной арматуры.

Напряжение в высокопрочной арматуре находится по формуле, приведенной в СП 63.13330.2012 для трехлинейной диаграммы ее состояния.

Для определения деформации укорочения объемно-сжатого бетона в продольном направлении предлагается следующая формула:

$$\epsilon_{b00} = \left( \frac{R_{b3m}}{R_b} \right)^{2,5} \left\{ \epsilon_{b0} - \frac{R_b}{E_b} \left[ 1 - \left( \frac{R_{b3m}}{R_b} \right)^{-1,5} \right] \right\}, \quad (15)$$

где  $\epsilon_{b00}$  – деформация одноосно сжатого бетона при напряжении;  $E_b$  – начальный модуль упругости бетона.

По приведенным формулам рассчитаны теоретические значения прочности  $N_u^{th}$  и максимальных продольных деформаций  $\epsilon_u^{th}$  исследованных образцов, которые представлены в таблице.

Выполненные эксперименты показали, что спиральное армирование бетонного ядра коротких центрально-

сжатых ТБЭ способно значительно повышать прочность их нормальных сечений. Относительно небольшое (по сравнению с внешней оболочкой) количество спиральной арматуры заметно повысило эффективность косвенного армирования. Данные опытов показали, что коэффициент  $m_c$ , количественно характеризующий эту эффективность, удалось увеличить с 0,95–1,1 в образцах серий ТБ.80 и ТБ.40 и до 1,25–1,3 в образцах серий ТБС.80 и ТБС.40.

Для теоретической оценки прочности и деформативности образцов исследованной конструкции предложены соответствующие формулы. Сопоставление опытных и теоретических значений прочности и продольных деформаций исследованных образцов свидетельствует о вполне удовлетворительном их совпадении. Особенно близки между собой значения  $N_u^{th}$  и  $N_u^{exp}$ . Статистическая обработка этих результатов дала коэффициент вариации 7,9% при максимальных отклонениях +16/-9%. При сопоставлении опытных и теоретических значений продольных деформаций коэффициент вариации составил 15,3% при максимальных отклонениях +25/-16%.

Таким образом, предложенные формулы позволяют определять прочность центрально-сжатых ТБЭ квадратного сечения, в том числе имеющих спиральное армирование, с достаточной для практики точностью.

На основании результатов выполненных исследований можно сделать два важных вывода. Во-первых, спиральное армирование ТБЭ приводит к повышению их прочности и деформативности. Следовательно, для их разрушения необходимо затратить гораздо больше энергии. Это приводит к существенному повышению живучести данных конструкций, что очень важно с точки зрения повышения механической безопасности зданий и сооружений.

Во-вторых, высокая деформативность образцов позволяет эффективно использовать в них высокопрочную продольную арматуру. За счет уменьшения расхода арматуры появляется возможность снижения стоимости конструкций.

**Выводы.** Результаты экспериментальных и теоретических исследований свидетельствуют о высокой прочности и деформативности центрально-сжатых ТБЭ квадратного поперечного сечения со спиральным армированием. Использование относительно небольшого расхода спиральной арматуры (порядка 1%) позволило примерно в 1,3 раза увеличить эффект обоймы исследованных конструкций. Причем высокая эффективность данных конструкций сохраняется при использовании в них высокопрочного бетона.

Предложенная методика расчета учитывает рост прочности и деформативности бетонного ядра ТБЭ за счет одновременного использования двух видов косвенного армирования – в виде внешней стальной оболочки и спиральной арматуры. Методика позволяет определять прочность центрально-сжатых ТБЭ квадратного сечения с достаточной для практики точностью.

#### Список литературы / References

1. Кришан А.Л., Мельничук А.С. Прочность трубобетонных колонн квадратного поперечного сечения. Монография: Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова. 2013. 105 с.
1. Krishan A.L., Mel'nichuk A.S. Prochnost' trubobetonnykh kolonn kvadratnogo poperechnogo secheniya. Monografiya [Strength of pipe-concrete columns of square cross-section. Monograph]. Magnitogorsk: Publishing house of Magnitogorsk state technical university named after G.I. Nosov. 2013. 105 p.
2. Han L.H., Yao G.H., Tao Z. Performance of concrete-filled thin-walled steel tubes under pure tension. *Journal of Thin-Walled Structures*. 2007. Vol. 45, pp. 24–36.
3. Masoudnia R., Amiri S., WanBadaruzzaman W.H. An Analytical model of short steel box columns with concrete in-fill (part I). *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*. 2011. No. 5, pp. 1715–1721.
4. Naeef M., Bali M., Naeef M.R. and Amir J.V. Prediction of lateral confinement coefficient in reinforced concrete columns using M5' machine learning method. *Journal of Civil Engineering*. 2013. No. 17 (7), pp. 1714–1719.
5. Yu T., Teng J.G. Behavior of hybrid FRP-concrete-steel double-skin tubular columns with a square outer tube and a circular inner tube subjected to axial compression. *Journal of Composites for Construction*. 2013. Vol. 17, pp. 271–279.
6. Nishiyama I., Morino S., Sakino K., Nakahara H. Summary of research on concrete-filled structural steel tube column system carried out under the US-JAPAN Cooperative Research Program on composite and hybrid structures. Japan. 2002. 176 p.
7. Кришан А.Л., Кришан М.А., Сабиров Р.Р. Перспективы применения трубобетонных колонн на строительных объектах России // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2014. № 1 (45). С. 137–140.
7. Krishan A.L., Krishan M.A., Sabirov R.R. Prospects for the application of pipe-concrete columns at construction sites in Russia. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova*. 2014. No. 1 (45), pp. 137–140. (In Russian).
8. Han L.H., An Y.H. Performance of concrete-encased CFST stub columns under axial compression. *Journal of Constructional Steel Research*. 2014. Vol. 93, pp. 92–76.
9. Jayasooriya R., Thambiratnam D.P., Perera N.J. Blast response and safety evaluation of a composite column for use as key element in structural systems. *Engineering Structures*. 2014. Vol. 61. No. 1, pp. 31–43.
10. Yu Q., Tao Z., Wu Y.X. Experimental behaviour of high performance concrete-filled steel tubular columns. *Thin-Walled Structures*. 2008. Vol. 46 (4), pp. 362–370.
11. Трубобетонные колонны высотных зданий из высокопрочного бетона в США // *Бетон и железобетон*. 1992. № 1. С. 29–30.
11. Tube-concrete columns of high-rise buildings made of high-strength concrete in the USA. *Beton i zhelezobeton*. 1992. No. 1, pp. 29–30. (In Russian).
12. Цай Шаохуай. Новейший опыт применения трубобетона в КНР // *Бетон и железобетон*. 2001. № 3. С. 20–24.
12. Tsai Shaokhuai. The latest experience of using pipe-concrete in the PRC. *Beton i zhelezobeton*. 2001. No. 3, pp. 20–24. (In Russian).
13. Han L.H., Li W., Bjorhovde R. Developments and advanced applications of concrete filled steel tubular (CFST) structures. *Journal of Constructional Steel Research*. 2014. No. 100, pp. 211–228.
14. Карпенко Н.И. Общие модели механики железобетона. М.: Стройиздат, 1996. 416 с.
14. Karpenko N.I. Obshchie modeli mekhaniki zhelezobetona [General models of mechanics of reinforced concrete]. Moscow: Stroizdat. 1996. 416 p.
15. Кришан А.Л., Астафьева М.А., Сабиров Р.Р. Расчет и конструирование трубобетонных колонн. Монография: Saarbrücken, Deutschland: Palmarium Academic Publishing. 2016. 261 с.
15. Krishan A.L., Astaf'eva M.A., Sabirov R.R. Raschet i konstruirovaniye trubobetonnykh kolonn. Monografiya [Calculation and construction of pipe-concrete columns. Monograph]. Saarbrücken, Deutschland: Palmarium Academic Publishing. 2016. 261 p.
16. Liang Q.Q., Uy B., Richard Liew J.Y. Nonlinear analysis of concrete-filled thin-walled steel box columns with local buckling effects. *Journal of Constructional Steel Research*. 2006. Vol. 62, pp. 581–591.

Д.Ю. ЖЕЛДАКОВ, канд. техн. наук (djeld@mail.ru)

Научно-исследовательский институт строительной физики РААСН (127238, г. Москва, Локомотивный проезд, 21)

## Химическая коррозия кирпичной кладки. Постановка задачи

В условиях возросших требований к сопротивлению теплопередаче ограждающих конструкций современных зданий строительная отрасль практически полностью перешла на применение многослойных ограждающих конструкций. Однако долговечность материалов, их коррозионная стойкость в нормативных документах рассматривается без учета их влияния друг на друга в единой системе ограждающей строительной конструкции. В статье рассматривается новый подход к исследованию долговечности кирпичной кладки с учетом протекания процессов химической коррозии в двухкомпонентной химической системе глиняный кирпич – цементно-песчаный раствор. Оценка морозостойкости, нормируемая в стандартах, не дает возможности оценки предельной долговечности конструкций из кирпичной кладки, следовательно теории долговечности, построенные на оценке морозостойкости и цикличности процессов замораживания-оттаивания, оставляют ряд неразрешенных вопросов, которые анализируются в настоящей статье. Кроме того, в статье приводится классификация процессов химической коррозии, протекающих в многокомпонентных системах с участием строительных материалов, применяемых в ограждающих конструкциях. Данная классификация позволяет системно подойти к расчету скорости деструктирующих химических реакций, а следовательно и рассчитать «жизненный цикл» строительной конструкции в целом.

**Ключевые слова:** многокомпонентная система, ограждающая конструкция, кирпичная кладка, химическая коррозия, морозостойкость, долговечность.

**Для цитирования:** Желдаков Д.Ю. Химическая коррозия кирпичной кладки. Постановка задачи // *Строительные материалы*. 2018. № 6. С. 29–32.

D.YU. ZHELDAKOV, Candidate of Sciences (Engineering) (djeld@mail.ru)

Scientific-Research Institute of Building Physics of the Russian Academy architecture and construction sciences (21, Lokomotivnyy Driveway, Moscow, 127238, Russian Federation)

### Chemical corrosion of a bricklaying. Problem definition

In the conditions of increased requirements to resistance to heat transfer of the enclosing structures of modern buildings, the construction industry has almost completely switched to the use of multi-layered enclosing structures. However, the durability of materials, their corrosion resistance in normative documents is considered without taking into account their influence on each other in a single system of the enclosing construction structure. Describes a new approach to the study of the durability of brickwork, taking into account the course of chemical corrosion processes in a two-component chemical system of clay brick – cement-Sandy mortar. The assessment of frost resistance standardized in the standards does not provide an opportunity to assess the ultimate longevity of brickwork structures. Hence the theory of durability built on the assessment of frost resistance and cyclic freeze-thaw processes, leave a number of unresolved issues that are analyzed in this article. In addition, the article categorizes the processes of chemical corrosion occurring in multicomponent systems with the participation of building materials used in enclosing structures. This classification allows you to systematically approach the calculation of the rate of destructive chemical reactions, and therefore calculate the “life cycle” of the building structure as a whole.

**Keywords:** multicomponent system, enclosing structure, brickwork, chemical corrosion, frost resistance, durability.

**For citation:** Zheldakov D.Yu. Chemical corrosion of a bricklaying. Problem definition. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2018. No. 6, pp. 29–32. (In Russian).

Эстетическая привлекательность кирпича как строительного материала не имеет конкуренции среди многообразия современных решений фасадов зданий. Кроме того, кирпич зарекомендовал себя как долговечный материал на протяжении столетий [1]. Надежность и прочность конструкций оборонительных стен из кирпича в разных странах мира была подтверждена сотнями завоевательных походов. Однако в последнее время авторитет кирпича снижается в том числе в связи с его разрушением на фасадах домов и в конструктивных элементах. Кирпичная облицовка фасадов зданий, построенных в середине прошлого века, в настоящее время повсеместно имеет большое количество разрушений. Многослойные ограждающие конструкции с кирпичным облицовочным слоем требуют ремонта уже через несколько лет эксплуатации.

Долговечность кирпичных наружных стен изучалась многими исследователями, по мнению которых основной причиной разрушения кирпичных конструкций является замораживание и оттаивание влаги в материале [2]. Считается, что с изменением климата увеличилось количество переходов температуры наружного воздуха через ноль, что интенсифицирует процесс деструкции кирпичной кладки. В [3] было показано, что это мнение ошибочно, данные многолетних наблюдений не показали значительного увеличения циклов перехода температуры через ноль. В [4, 5] разрушение

кирпича определяется поступлением в кладку минерализованных грунтовых вод, что приводит к значительному увеличению образования кристаллогидратов и разрушению структуры кирпича. Однако в данных и других похожих работах не объясняется деструкция кирпича на верхних этажах зданий. Интересные выводы на основании долголетних исследований сделаны в [6]. Деструкция облицовочного шелевого кирпича напрямую связана с увеличением расхода раствора при облицовке зданий шелевым кирпичом и увеличению площади соприкосновения кирпича и раствора. При этом нарушается тепловлажностный режим ограждающей конструкции, что приводит к увеличению количества диффузионной влаги на границе кирпич–раствор.

Существует ряд вопросов по долговечности кирпичной кладки, которые пока не нашли объяснения у исследователей, но свидетельствуют о том, что количество циклов замерзания–оттаивания конструкции, капиллярный подсос солей из грунта, влияние кислотных газов атмосферы не являются основными критериями долговечности кирпичной кладки.

На рис. 1–5 представлены различные типы разрушения кирпичной кладки. Фотографии сделаны в Москве (Россия) с резкоконтинентальным климатом и в городах Сиена и Болонья (Италия) с мягким средиземноморским климатом без снижения температуры ниже нуля градусов в течении всего года.



Рис. 1. Разрушение кладки из керамического кирпича. а – облицовочный слой из щелевого керамического кирпича здания второй половины XX в., Москва, Россия; б - кладка из полнотелого керамического кирпича (верхняя часть) крепостной стены XII-XV вв., г. Сиена, Италия.



Рис. 2. Разрушение единственного кирпича из кладки полнотелого керамического кирпича в г. Сиена, Италия

На основании данных фотографий можно сделать несколько выводов:

1. Рис. 1–2 показывают, что процесс разрушения кирпичной кладки может активно протекать при положительной температуре. Замораживание/оттаивание влаги в порах кирпича и раствора не является необходимым условием для разрушения кладки.

2. Рис. 1 показывает неравномерность разрушения кирпича в равных климатических условиях. Близость расположения кирпичей в кладке косвенно свидетельствует о том, что соседствующие кирпичи принадлежат одной партии. При этом следует помнить существенные различия технологии производства кирпича и выполнения работ в середине XX в. и в XII–XV вв.

3. Рис. 2 показывает разрушение одного кирпича в кладке цоколя жилого дома XIX в. в Сиене (Италия), то есть в отсутствие замораживания/оттаивания влаги в порах кирпича. Разрушенный кирпич находится не в нижних рядах кладки, где кирпичи не разрушены. Объяснить разрушение одного кирпича капиллярным подъемом солей нельзя.

4. На рис. 2 и 4 показаны разные типы коррозии кирпича. На рис. 2 продукт деструкции кирпича мелкодисперсный, на рис. 4 кирпич шелушится, разрушение происходит слоями.

5. На рис. 3 показана совместная работа различных типов штукатурного покрытия и кирпича: при использовании известкового раствора происходит разрушение только

штукатурного слоя, кирпичная кладка коррозии не подвергается. При использовании цементно-песчаного раствора разрушение происходит в граничном слое кирпича.

6. Рис. 4 показывает, что скорости деструкции раствора и кирпича могут быть разные: в некоторых случаях в первую очередь разрушается раствор, в других происходит разрушение кирпича, при этом раствор сохраняет некоторую целостность.



Рис. 3. Разрушение кладки из полнотелого керамического кирпича под слоем: а – цементно-песчаной штукатурки. Локомотивный пр., д. 7 Москва, Россия; б – известковой штукатурки. Малая Калужская ул., д. 27, Москва, Россия





Рис. 4. Разрушение кирпичной кладки из полнотелого керамического кирпича: а – разрушение кирпича, Москва, Россия; б – разрушение вяжущего раствора, Сиена, Италия

7. На рис. 5 показано равномерное разрушение керамического кирпича с обеих сторон ограждающей стены. Этот факт говорит о том, что деструкция материала не всегда может быть вызвана односторонним замораживанием/оттаиванием ограждающей конструкции.

Решение поставленных вопросов возможно объяснить с точки зрения протекания химических процессов в материалах кирпичной кладки. При этом обязательным условием решения поставленной задачи является рассмотрение двух материалов кирпичной кладки, цементно-песчаного раствора и красного керамического кирпича как единой системы. Следует отметить, что необходимым компонентом в системе взаимодействующих материалов является вода, которая может находиться в любом состоянии и количестве.

Замораживание-оттаивание, так же как воздействие природных факторов, например, солнечная радиация, дождь, засуха, высокая или низкая температура, имеет второстепенное влияние на деструкцию материала конструкции, увеличивая или уменьшая скорость химического взаимодействия веществ.

Необходимо выделить и классифицировать группы химических реакций, проходящих в многокомпонентной системе. Подобную классификацию провел В.М. Москвин, разделив реакции химической коррозии бетона на три вида: реакции разрушения самого цементного камня в процессе выщелачивания, реакции с кислотами и солями, протекающие с образованием растворимых продуктов, выводящихся из системы и реакции с образованием нерастворимых продуктов реакции, накапливающихся в теле бетона и разрушающих его структуру [7]. Однако классификация, предложенная В.М. Москвиным, удобна при рассмотрении химической коррозии только в одном материале [8]. При анализе протекания процессов химической коррозии в многокомпонентной системе применение данной классификации процессов не эффективно.

Предлагается следующая классификация процессов химической коррозии материалов, протекающих в многокомпонентной системе:

– реакции основного процесса взаимодействия строительных материалов. Это реакции, которые протекают между материалами многокомпонентной системы в обязательном порядке при их контакте между собой с той или иной

скоростью с образованием тех или иных продуктов реакции в зависимости от условий ее протекания;

– побочные реакции первого типа – реакции не являющиеся основными, протекание таких реакций при взаимодействии двух материалов обусловлено наличием каких-либо примесей хотя бы в одном из контактирующих веществ. Данные реакции могут ускорять или замедлять реакции основного процесса. Условия протекания данных реакций напрямую зависят от концентрации вещества – примеси;

– побочные реакции второго типа – реакции, протекание которых обусловлено внешней средой. К данному типу реакций относятся реакции, связанные с капиллярным подъемом кислых и щелочных грунтовых вод, а также реакции, возможные при наличии в атмосферном воздухе (например, в воздухе приморских городов) или в воздухе помещений (воздух химических и металлургических цехов) высокой концентрации загрязняющих газов: оксидов азота, оксидов серы, аммиака, хлора и других [9];

– реакции гидратации и дегидратации продуктов основных и побочных реакций. Реакции гидратации зависят от количества влаги в системе и температуры.

При рассмотрении механизма протекания реакций при контакте материалов процессы химической коррозии должны рассматриваться именно в порядке, в котором они представлены в классификации. В первую очередь это связано с удобством описания химизма процесса коррозии многокомпонентной системы в



Рис. 5. Разрушение ограждающей стены из полнотелого керамического кирпича, оштукатуренной цементно-песчаным раствором, Москва, Россия

целом. Концентрации примесей в компонентах системы, концентрации электролитов в грунтовых водах и газов в атмосферном воздухе подвержены сильным колебаниям. При описании основного процесса с учетом побочных процессов, а побочных процессов как функций концентрации примесей и электролитов, поступающих в систему, возможно получить наиболее точные характеристики процесса химической деструкции материалов системы.

Однако данный подход к рассмотрению механизма химической коррозии строительных материалов противоречит принятой практике. Основным нормативный документ СП 28.13330.2012 «СНиП 2.03.11-85 «Защита строительных конструкций от коррозии», в котором определены технические требования к защите от коррозии бетонных, железобетонных, стальных, алюминиевых, деревянных, каменных и хризотилцементных строительных конструкций зданий и сооружений при воздействии агрессивных сред с температурой от -50 до 50°C, рассматривает только воздействие агрессивных сред на материалы, то есть учитывает только побочные реакции второго типа. При этом строительные конструкции, выполненные из различных материалов, рассматриваются отдельно. Для кирпичной кладки, где присутствуют одновременно вяжущий раствор и кирпич, в п. 7.1 СП определяется, что «оценка степени агрессивного воздействия на камен-

ные конструкции производится отдельно по раствору и кладочному материалу и для конструкции из каменной кладки в целом принимается как для материала, для которого среда является наиболее агрессивной».

Тот же подход рассмотрения каждого строительного материала в отдельности применен и в СП 72.13330.2016 «Защита строительных конструкций и сооружений от коррозии. Актуализированная редакция СНиП 3.04.03-85», который рассматривает защиту металлических, бетонных и каменных поверхностей строительных конструкций индивидуально.

#### Выводы.

Применение в современной строительной индустрии многослойных ограждающих конструкций обуславливает необходимость рассмотрения процессов химической коррозии при условии взаимного влияния всех материалов, применяемых в многокомпонентной системе. Несоблюдение данного условия может привести к неправильной трактовке результатов исследований при расчете долговечности материалов конструкции. Приведенная в статье классификация процессов химической коррозии в многокомпонентной системе, позволяет не только рассчитать константу скорости основного процесса, но и наиболее точно учесть действие побочных реакций на протекание процесса коррозии.

#### Список литературы

1. Обрузбаева Г.Т., Касымова М.Т. Определение температуры обжига Чуйской керамики VIII–XVI вв. // *Строительные материалы*. 2017. № 9. С. 33–36.
2. Чернышов Е.М. Морозная деструкция бетонов. Часть 1. Механизм, критериальные условия управления // *Строительные материалы*. 2017. № 9. С. 40–46.
3. Гагарин В.Г., Желдаков Д.Ю. Методика учета изменения климатических данных при определении количества циклов перехода температуры через ноль по сечению наружной стены здания как часть программы по адаптации к изменению климата // *БСТ*. 2017. № 6. С. 32–35.
4. Минас А.И. Защита сооружений от солевой формы физической коррозии, возникающей в районах с сухим климатом. — В кн. Защита строительных конструкций от коррозии. М. 1961, вып. 22, 119 с.
4. Инчик В.В. Физико-химические аспекты деструкции кирпичной кладки. Материалы международной конференции «Проблемы долговечности зданий и сооружений в современном строительстве» 10–12 октября 2007 г. СПб: Роза мира, 2007. С. 79–85.
6. Ананьев А.И. Долговечность, влажностный режим и теплозащитные свойства наружных стен зданий из пустотелого кирпича // *АВОК*. 2018. № 3. С. 70-73.
7. Москвин В.М. Коррозия бетона. М.: Гос. изд-во лит. по строительству и архитектуре, 1952. 344 с.
8. Москвин В.М., Иванов Ф.М., Алексеев С.Н., Гузеев Е.А. Коррозия бетона и железобетона, методы их защиты. М.: Стройиздат, 1980. 536 с.
9. Желдаков Д.Ю. Ограждающие конструкции зданий — фильтры атмосферного воздуха мегаполисов // *Методология безопасности среды жизнедеятельности. Программа и тезисы IV Крымской Международной научно-практической конференции*. Под редакцией: А.Т. Дворецкого, Т.В. Денисовой, А.Е. Максимова. Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского (Симферополь). 2017. С. 34.

#### References

1. Obruzbaeva G.T., Kasymova M.T. Determination of the firing temperature of Chui ceramics of the VIII–XVI centuries. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2017. No. 9, pp. 33–36.
2. Chernyshov E.M. Frosty destruction of concrete. Part 1. Mechanism, criterial conditions of management. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2017. No. 9, pp. 40–46. (In Russian).
1. Gagarin, V.G., Zheldakov, D. Method of accounting changes of climatic data in determining the number of cycles of the transition temperature of zero in the cross section of the outer wall of the building as part of a program for adaptation to climate change. *BST*. 2017. No. 6, pp. 32–35. (In Russian).
2. Minas A.I. Zashchita sooruzhenii ot solevoi formy fizicheskoi korrozii, vznikayushchei v raionakh s sukhim klimatom. — V kn. Zashchita stroitel'nykh konstruksii ot korrozii [Protection of structures against salt form of physical corrosion occurring in areas with a dry climate. — In the book. Protection of building structures against corrosion]. Moscow, 1961. Vol. 22. 119 p.
3. Inchik V.V. Physico-chemical aspects of the degradation of the brickwork. Proceedings of the international conference “Problems of durability of buildings and structures in modern construction” 10–12 October 2007 – Saint Petersburg: Rosa mira, 2007. P. 79–85.
4. Ananyev A.I. Durability, humidity and thermal insulation properties of external walls of buildings of hollow bricks. *AVOK*. 2018. No. 3, pp. 70–73. (In Russian).
5. Moskvin V.M. Korroziya betona [Corrosion of concrete]. Moscow, 1952. 344 p.
6. Moskvin V.M., Ivanov F.M., Alekseev S.N., Guzeev E.A. Korroziya betona i zhelezobetona, metody ikh zashchity [Corrosion of concrete and reinforced concrete, methods of their protection]. Moscow: Stroizdat, 1980. 536 p.
7. Zheldakov D. The building envelope — filters of atmospheric air of cities // *Methodology security environment. Program and abstracts of the IV Crimean international scientific-practical conference*. Ed. by: A.T. Butler, T.V. Denisova, A.E. Maksimenko. Crimean federal university of V.I. Vernadsky (Simferopol). 2017. P. 34.

Д.О. НЕВЕЛЬСКИЙ, инженер (nevelsky@list.ru)

Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (125319, г. Москва, Ленинградский пр-т, 64)

## Определение фактического износа дорожных покрытий шипованными шинами

Одновременно с ростом уровня автомобилизации в России увеличилась интенсивность изнашивания дорожных покрытий. На левых полосах автомагистралей образуется колеиность уже через 2–3 года эксплуатации дороги. Значительный вклад в образование колеи износа вносит применение шипованных шин. С 1 января 2015 г. вступил в силу Технический регламент Таможенного союза «О безопасности колесных транспортных средств» ТР ТС 018/2011. Документ строго нормирует основные параметры шипов в шинах, но при этом допускает использование ненормируемых шипов, если они не вызывают большего износа. В статье рассмотрены основные зарубежные и российские методы определения износа дорожных покрытий шипованными шинами. Выявлены их недостатки, проблемы применения на территории РФ. Предложен метод по определению фактического износа дорожных покрытий шипованными шинами.

**Ключевые слова:** износ дорожного покрытия, шипованные шины, тормозной путь, колеиность, автомобильные дороги, испытания.

**Для цитирования:** Невельский Д.О. Определение фактического износа дорожных покрытий шипованными шинами // *Строительные материалы*. 2018. № 6. С. 33–35.

D.O. NEVELSKY, Engineer (nevelsky@list.ru)

Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI) (64, Leningradsky Avenue, Moscow, 125319, Russian Federation)

### The determination of the actual wear of road surfaces by studded tyres

At the same time, with the increase in the level of motorization in our country, the intensity of wear on road surfaces has increased. On the left lanes of highways the rut is formed in 2–3 years of road maintenance. A significant contribution to the formation of the wear gauge is made by the use of studded tires. It should be noted that in some regions of Russia more than 90% of motorists in the winter use studded tires. On January 1, 2015 the technical regulations of the Customs Union "on safety of wheeled vehicles" TR CU 018/2011 entered into force. The document strictly regulates the basic parameters of the studs in the tyres, but allows the use of not normalized spikes if they do not cause greater wear. The article describes the main methods of determining the wear of road surfaces studded tires. The article considers the main foreign and Russian methods for determining the wear of road surfaces with studded tires. Their main disadvantages are shown and the problems of application in the territory of the Russian Federation are defined. A method is proposed for determining the actual wear of road surfaces by studded tyres.

**Keywords:** Wear of the road surface, studded tires, braking distance of car, rutting, roads, testing.

**For citation:** Nevelsky D.O. The determination of the actual wear of road surfaces by studded tyres. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2018. No. 6, pp. 33–35. (In Russian).

В последнее время широко обсуждается износ дорожного покрытия шипованными шинами [1–3]. Противники использования шипованных шин считают, что их единственным преимуществом является повышенный коэффициент сцепления на льду (8–10%). Однако современные тесты говорят о другом. Сущность данных экспериментов заключается в том, что автомобиль оснащают различными шинами [4], проводя серию торможений с измерением тормозного пути. Чем меньше тормозной путь, тем выше уровень безопасности на зимней дороге. В табл. 1 приведены результаты таких испытаний.

На основании результатов этих экспериментов можно сделать следующие выводы:

1. У шипованных шин тормозной путь на льду короче, чем у фрикционных, на 11–25%.

2. На асфальтобетонных покрытиях тормозной путь автомобиля на шипованных шинах не просто не уступает фрикционным, а в некоторых случаях короче на 6%. Следовательно, такой вид зимних шин является более универсальным. Благодаря таким экспериментам, а также субъективным ощущениям рядовых автомобилистов в некоторых регионах РФ на дорогах в зимнее время года более 90% автомобилей оснащены шипованными шинами [5].

3. В зависимости от фирмы-производителя и ценовой категории шин тормозной путь при одинаковых условиях отличается на несколько процентов.

Напрашивается логическая закономерность: различный тормозной путь → различные коэффициенты сцепления → различный износ дорожного покрытия.

Износ дорожных покрытий шипованными шинами в настоящее время является очень актуальной темой. На свежееуложенном покрытии возникает колея износа уже на второй-третий год эксплуатации дороги [6]. Денежные средства, направляемые на приведение покрытий в нормативное состояние по причине преждевременного износа,

могли бы поступать на другие нужды дорожного хозяйства. В качестве примера можно привести опыт Норвегии по борьбе с чрезмерным износом покрытий автодорог шипованными шинами. За 30 лет там удалось снизить показатель износа на 80% [7].

Первым шагом для решения проблемы износа автодорог в России стало введение Технического регламента Таможенного союза «О безопасности колесных транспортных средств» ТР ТС 018/2011. Документ был принят 9 декабря 2011 г. и с 1 января 2015 г. вступил в силу. В приложении 10 п. 20, 21 и 116 указаны минимально допустимые параметры шипов (вес, выступ, количество). Требования являются более лояльными по сравнению с аналогичными требованиями, предъявляемыми, например, в Скандинавских странах (табл. 2).

Также в Техническом регламенте есть примечание, позволяющее использовать шипы большей массы и большего количества, если они не вызывают большего износа дорожного покрытия. Определение износа возлагается на независимые аккредитованные испытательные лаборатории. Проблема заключается даже не в отсутствии таких лабораторий, а в отсутствии методов, позволяющих определить износ. Конечно, существуют методы А (аналог шведского метода PRALL), Б (аналог финского метода SRK), изложенные в ОДМ 218.2.019–2011 «Методические рекомендации по определению сопротивляемости истиранию асфальтобетонных покрытий под воздействием шипованных шин», а также российский метод асфальтовой шаровой мельницы (АШМ) [8, 9]. Однако вышеперечисленные методы не в полной мере соответствуют реальным условиям взаимодействия шипованных шин с дорожным покрытием, поскольку не реализуют всех составляющих этого взаимодействия. В связи с этим они являются косвенными методами, не позволяющими достоверно определить реальный износ покрытия шипованными шинами.

Таблица 1

Сравнение тормозного пути шипованных и фрикционных шин на льду и асфальтобетонном покрытии

Температура воздуха, °С	Покрытие	Скорость движения, км/ч	Размер шины	Тип шины	Модель шины	Тормозной путь, м	
-20	Лед	25	185/60R15	Фрикционный	Nokian Hakkapeliitta R2	15,43	
					GislavedSoftFrost 200	18,43	
				Шипованный	Nokian Hakkapeliitta9	13,88	
					GislavedNordFrost 200	14,72	
	Асфальто-бетон	80	Фрикционный	Nokian Hakkapeliitta R2	36,33		
				GislavedSoftFrost 200	34,97		
Шипованный	80	Nokian Hakkapeliitta9	36,08				
		GislavedNordFrost 200	35,32				
-2	Лед	50	235/55R18	Фрикционный	Continental contivikingcontact 6	58,49	
				Шипованный	Continental icecontact 2	46,87	
	Асфальто-бетон			80	Фрикционный	Continental contivikingcontact 6	33,24
					Шипованный	Continental icecontact 2	31,37

Они подходят для оценки износостойкости покрытий, так как сам процесс взаимодействия колеса и покрытия моделируется посредством ударов металлических шаров или истиранию имитаторов шипованных колес, имеющих отличные от реальных шин параметры.

Для получения адекватных данных по износу дорожных покрытий в странах, столкнувшихся с проблемой чрезмерного износа шипованными шинами, разработаны специальные комплексы ускоренных испытаний. Они представляют собой круговые или линейные стенды, а также специальные полигоны [10]. Основная их задача – получение максимально достоверных натуральных данных за наименьшее время. Следует отметить, что немаловажным фактором является стоимость таких экспериментов. Строительство специального полигона и проведения на нем экспериментов требуют значительных затрат. Принято считать, что наиболее перспективными являются круговые стенды из-за возможности проводить измерения на больших скоростях. Подобный комплекс размещен в Учебно-исследовательском центре МАДИ [11].

К основным недостаткам вышеперечисленных методов можно отнести:

- высокую себестоимость комплексов и высокие затраты на проведение исследований;
- уличное размещение комплексов и полигонов. Для объективности измерений необходимы лабораторные условия. Следует отметить, что возможна компоновка кругового стенда таким образом, чтобы он смог разместиться в закрытом помещении (VTI's Circular Road Simulator <https://www.vti.se/en/research-areas/circular-road-simulator>);
- наличие постоянной центробежной силы и различных условий взаимодействия участков протектора по ширине беговой дорожки при движении колеса по дуге;

- не во всех стендах предусмотрена возможность изменения траектории движения. Это вызывает движение «шип в шип», что сильно искажает результаты измерений;
- техническая сложность оборудования.

Полученные данные должны служить основой в расчетах прогнозирования колееобразования. К сожалению, в действующих нормативных документах присутствуют различные рекомендации по определению глубины колеи износа. В результате расчета по разным методикам значения отличаются друг от друга в несколько раз. К тому же используемые зависимости для оценки износа покрытий были получены более 40 лет назад. В России и за рубежом предпринимаются попытки актуализации расчетных методик [12, 13], однако проверить работоспособность расчетной модели возможно только с помощью ускоренных испытаний.

Автором предлагается метод определения фактического износа дорожных покрытий шипованными шинами посредством специального линейного стенда. В основном такие стенды в зарубежных странах используют для измерения прочности дорожных одежд, а не износа. Стремление добиться высокой скорости во время испытаний не является основным приоритетом. Наблюдения показывают, что износ также возникает на перекрестках и на кривых малого радиуса, где скорости движения намного ниже, чем на магистралях. Главное – обеспечить приемлемую продолжительность эксперимента. Например, если колесу потребуется ездить по покрытию полгода или даже год, то, конечно, данный метод нельзя признать рабочим. Основной задачей при конструировании прототипа-стенда является подбор необходимой длины направляющей балки, мощности электродвигателя и обеспечение такой скорости движения, при которой возможно сравнить износ от разных шипованных шин. При этом максимальная продолжительность эксперимента не должна превышать один месяц. Зная зависимость интенсивности износа от

Таблица 2

Сравнение нормируемых параметров шипов в России и в Скандинавских странах

Документ	Нормируемые параметры			
	Выступ шипа за пределы протектора, мм	Количество шипов на п. м	Масса шипа, г	Максимальное усилие вдавливания шипа в протектор, Н
ТР ТС 018/2011	1,2 / 1,7 / 2,5	60	1,6 / 2,8 / 3,5	–
Скандинавские страны	Не более 1,2	50	1,2 / 2 / 4	120 / 180 / 340

**Примечание.** В таблице приведены данные для шин легковых, легких грузовых и грузовых автомобилей.

скорости движения [14], можно ввести поправочный коэффициент и рассчитать износ при любой скорости движения.

Основные преимущества предлагаемого метода:

1. Возможность определения износа покрытий шипованными шинами.
2. Достаточно простая конструкция, обеспечивающая моделирование взаимодействия колеса с покрытием, наиболее близкое к реальному.

#### Список литературы

1. Горшкова Н.Г., Журавлев А.С. Влияние шипованных шин на износ покрытия. *Научные технологии и инновации (XXII научные чтения)*. 6–7 октября 2016. Белгород. С. 61–64.
2. Беляев Д.С. Шипованные шины: экология или безопасность? // *Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе*. 2015. № 1. С. 208–214.
3. Кристалный С.Р. Качество функционирования современных систем контроля устойчивости на автомобилях, оснащаемых в эксплуатации шипованными шинами // *Автомобиль. Дорога. Инфраструктура*. Электронное издание. 2014. № 2. [http://www.adimadi.ru/madi/article/view/54/pdf\\_23](http://www.adimadi.ru/madi/article/view/54/pdf_23).
4. Шушурин В.В., Прохорова Е.В. Выбор автомобильных шин. *Современные автомобильные материалы и технологии (Саммит-2016) Материалы VIII Международной научно-технической конференции*. 2016. С. 459–465.
5. Беляев Н.Н. Под прицелом – шипованные шины // *Автомобильные дороги*. 2014. № 5. С. 58–61.
6. Горельшева Л.А., Гарманов В.Н., Петров Ю.Н. Результаты исследования износа асфальтобетонного покрытия на автодороге Уфа–Аэропорт // *Дороги и Мосты*. 2016. № 34. С. 115–126.
7. Brynhild Snilsberg, Rabbira Garba Saba, Nils Uthus. Asphalt pavement wear by studded tires – Effects of aggregate grading and amount of coarse aggregate. *6-th Eurasphalt&Eurobitume Congress*. 2016. Prague, Czech Republic.
8. Беляев Н.Н. Метод асфальтовой шаровой мельницы. Электронный ресурс <http://www.stpr.ru/technologies/innovations/44/> (дата обращения: 23.04.2018).
9. Патент РФ 2465389. *Способ оценки устойчивости образцов асфальтобетона к износу шипованными шинами и комплект оборудования для его осуществления* / Беляев Н.Н., Никольский Ю.Е., Петушенко В.П.; Заявл. 01.12.2010. Опубл. 27.10.2012.
10. Бакаева Н.В., Разумов М.С., Быковская Н.Е., Волкова Д.С. Стенд для определения характера износа дорожного покрытия и автомобильного колеса с учетом массы транспортного средства, а также характеристик динамики движения и торможения // *Мир транспорта и технологических машин*. 2017. № 1 (56). С. 101–106.
11. Васильев Ю.Э., Ивачев А.В., Братищев И.С. Исследование устойчивости дорожно-строительных материалов к износу колееобразованию в условиях, приближенных к эксплуатационным // *Интернет-журнал Науковедение*. 2014. № 5 (24). <https://naukovedenie.ru/PDF/11TVN514.pdf>
12. Лугов С.В., Каленова Е.В. Возможности расчетной оценки износа покрытий при прогнозировании колееобразования // *Вестник МАДИ*. 2013. № 4. С. 53–59.
13. Dattatraya T.T. Highway development and management model (HDM-4): calibration and adoption for low-volume roads in local conditions // *International Journal of Pavement Engineering*. 2013. No. 1 (14), pp. 50–59. <http://dx.doi.org/10.1080/10298436.2011.606320>
14. Спектор А.Г. Износ асфальтобетонных покрытий шипованной резиной. Электронный ресурс <http://www.dor.spb.ru/index/technology/iznos-pokrytyi> (дата обращения 23.04.2018).

3. Габариты стенда, позволяющие разместить его в обычной лаборатории.

4. С помощью торможения колеса можно моделировать движение на перекрестках, кривых малого радиуса и экстренное торможение.

Такой прототип был построен и на данный момент проходит испытания. О результатах этих испытаний будет изложено в последующих работах.

#### References

1. Gorshkova N.G., Zhuravlev A.S. Impact of studded tires on road pavement wear. *High technology and innovation (XIII scientific readings)*. October 6–7, 2016. Belgorod. pp. 61–64. (In Russian).
2. Belyaev D.S. Studded tires: ecology or safety? *Modernizatsiya i nauchnye issledovaniya v transportnom komplekse*. 2015. No. 1, pp. 208–214. (In Russian)
3. Kristalnyi S.R. Quality of operating modern stability systems on a cars, equipped with spiked tires for use in winter condition. *Avtomobil'. Doroga. Infrastruktura. Electronic edition*. 2014. No. 2. [http://www.adimadi.ru/madi/article/view/54/pdf\\_23](http://www.adimadi.ru/madi/article/view/54/pdf_23). (In Russian)
4. Shushurikhin V.V., Prokhorova E.V. Operation and maintenance of motor Vehicle tire recycling. Selection of automobile tires. *Modern Automotive Materials and Technologies (Samit-2016) Materials of the VIII International Scientific and Technical Conference*. 2016, pp. 459–465. (In Russian).
5. Belyaev N.N. Under the gun - studded tires. *Avtomobil'nye Dorigi*. 2014. No. 5, pp. 58–61. (In Russian).
6. Gorelysheva L.A., Garmanov V.N., Petrov Yu.N. The results of the study of asphalt concrete pavement wear on the road “Ufa-Airport”. *Dorigi i Mosty*. 2016. No. 34, pp. 115–126. (In Russian).
7. Brynhild Snilsberg, Rabbira Garba Saba, Nils Uthus. Asphalt pavement wear by studded tires – Effects of aggregate grading and amount of coarse aggregate. *6-th Eurasphalt&Eurobitume Congress*. 2016. Prague, Czech Republic.
8. Belyaev N.N. Method of asphalt ball mill. *Elektronnyy resurs* <http://www.stpr.ru/technologies/innovations/44/> (Date of access 23.04.2018). (In Russian).
9. Patent RF 2465389. *Sposob otsenki ustoychivosti obraztsov asfal'tobetona k iznosu shipovannymi shinami i komplet oborudovaniya dlya ego osushchestvleniya* [Method for assessing the resistance of asphalt concrete samples to wear by studded tires and a set of equipment for its implementation]. Belyaev N.N., Nikol'skiy Yu.E., Petushenko V.P.; Declared 01.12.2010. Published 10.27.2012. (In Russian).
10. Bakaeva N.V., Razumov M.S., Bykovskaya N.E., Volkova D.S. Stand for determining the nature of the deterioration of pavement and road wheels based on vehicle mass, as well as the characteristics of the dynamics of movement and braking. *Mir transporta i tekhnologicheskikh mashin*. 2017. No. 1 (56), pp. 101–106. (In Russian).
11. Vasil'ev Yu.E., Ivachev A.V., Bratishchev I.S. Research of road building materials wear rutting resistance in near working conditions. *Internet-journal Naukovedenie*. 2014. No. 5 (24). <https://naukovedenie.ru/PDF/11TVN514.pdf> (In Russian).
12. Lugov S.V., Kalenova E.V. The possibility of pavement wear valuation at rutting predicting. *Vestnik MADI*. 2013. No. 4, pp. 53–59. (In Russian).
13. Dattatraya T.T. Highway development and management model (HDM-4): calibration and adoption for low-volume roads in local conditions // *International Journal of Pavement Engineering*. 2013. No. 1 (14), pp. 50–59. <http://dx.doi.org/10.1080/10298436.2011.606320>
14. Spektor A.G. The wear of asphalt concrete pavements with studded tires. *Elektronnyy resurs* <http://www.dor.spb.ru/index/technology/iznos-pokrytyi> (Date of access 23.04.2018). (In Russian).

В.А. СМЕРНОВ, канд. техн. наук (belohvost@list.ru),  
М.Ю. СМОЛЯКОВ (smolyakovmu@gmail.com), инженер

Научно-исследовательский институт строительной физики РААСН (127238, Россия, г. Москва, Локомотивный пр., 21)

## Сравнительный анализ динамических характеристик эластичных пластмасс и резиновых вибродемпфирующих материалов

В работе проводится сравнительный анализ динамического поведения вибродемпфирующих материалов, выполненных из эластомерных, например вспененного полиуретана, и резиновых, например натуральных каучуков, материалов. На основании проведенных нагрузочных испытаний сравнивается их поведение как под статической нагрузкой, так и при динамическом нагружении в области 5–40 Гц, наиболее характерном для применения в задачах виброзащиты. Анализируя поведение резиновых материалов и вспененного полиуретана отмечаются явные преимущества последнего для применения в качестве упругодемпфирующего элемента прогрессивных систем виброизоляции на транспорте и в промышленно-гражданском строительстве.

**Ключевые слова:** натуральный каучук, резина, эластомер, вспененный полиуретан, динамический модуль упругости, коэффициент потерь, виброизоляция.

**Для цитирования:** Смирнов В.А., Смоляков М.Ю. Сравнительный анализ динамических характеристик эластичных пластмасс и резиновых вибродемпфирующих материалов // *Строительные материалы*. 2018. № 6. С. 36–40.

V.A. SMIRNOV, Candidate of Sciences (Engineering) (belohvost@list.ru),  
M.Yu. SMOLYAKOV, Engineer (smolyakovmu@gmail.com)  
Scientific-Research Institute of Building Physics of the Russian Academy architecture and construction sciences  
(21, Lokomotivnyy Driveway, Moscow, 127238, Russian Federation)

### Comparative Analysis of Dynamic Characteristics of Elastic Plastics and Rubber Vibro-Damping Materials

This paper presents a comparative analysis of the dynamic behavior of vibration damping materials made of elastomeric, for example, polyurethane foam, and rubber, for example, natural rubber materials. On the basis of load tests conducted, their behavior both under the static load and dynamic load in the range of 5–40 Hz, which is the most characteristic for application to vibration protection problems, is compared. Analyzing the behavior of rubber materials and foamed polyurethane, there are obvious advantages of the latter for using as an elastic-damping element of progressive vibration isolation systems in transport and in industrial and civil construction.

**Keywords:** natural rubber, rubber, elastomer, foamed polyurethane, dynamic modulus of elasticity, loss factor, vibration insulation.

**For citation:** Smirnov V.A., Smolyakov M.Yu. Comparative analysis of dynamic characteristics of elastic plastics and rubber vibro-damping materials. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2018. No. 6, pp. 36–40. (In Russian).

В крупных городах довольно остро стоит вопрос о комфортности пребывания людей в жилых многоквартирных домах, офисных помещениях, садах, школах и т. д., где одним из основных факторов является вопрос защиты от шума и вибрации. Основными источниками вибрации и структурного шума, переизлучаемого конструкцией, для зданий и сооружений являются рельсовый транспорт (метро, трамваи, железная дорога) и инженерное оборудование. Вибродемпфирующие материалы, в качестве которых применяются маты из эластичных пластмасс (преимущественно пенополиуретан) или резиновых (на основе натурального и синтетического каучука) материалов, широко используются в разных системах, в частности для снижения вибрации в конструкциях посредством поглощения энергии (демпфирования) или изоляции элементов конструкции, связанных с преобразованием, передачей и поглощением энергии. Для оптимального функционирования таких систем важно, чтобы их элементы обладали заданными (расчетными) динамическими свойствами.

Из практики проектирования виброзащитных систем известны случаи [1], при которых из-за неправильного учета динамических характеристик резиновых виброизоляторов их эффективность отличалась от проектной.

Основными характеристиками, определяющими эффективность систем виброизоляции, являются [2]: динамический модуль упругости и динамический мо-

дуль сдвига материала, коэффициент потерь механической энергии. Для большинства материалов данные характеристики зависят от частоты внешнего воздействия, температуры, амплитуды динамического воздействия и предварительной деформации [3]. При этом для правильной оценки, проектирования и подбора систем виброизоляции важно понимать пределы применимости каждого из материалов, под какое оборудование (с преобладающим вертикальным или горизонтальным динамическим воздействием) его можно использовать и в каком частотном диапазоне, какими расчетными формулами описывать поведение конструкции.

Данные материалы отличаются не только физико-механическими характеристиками, но и структурой. Резиновые смеси, из которых получают подавляющее количество резиновых виброизоляторов, представляют собой сложные многокомпонентные системы на основе каучука или комбинации каучуков, имеющих однородную структуру и являющихся несжимаемым материалом – механическое нагружение приводит к «выпучиванию» материала и большим боковым деформациям (коэффициент Пуассона стремится к 0,5). Механические свойства резин существенно изменяются даже при кратковременной деформации, при этом возможны необратимые изменения, что может быть следствием ряда химических процессов, активируемых механическим напря-

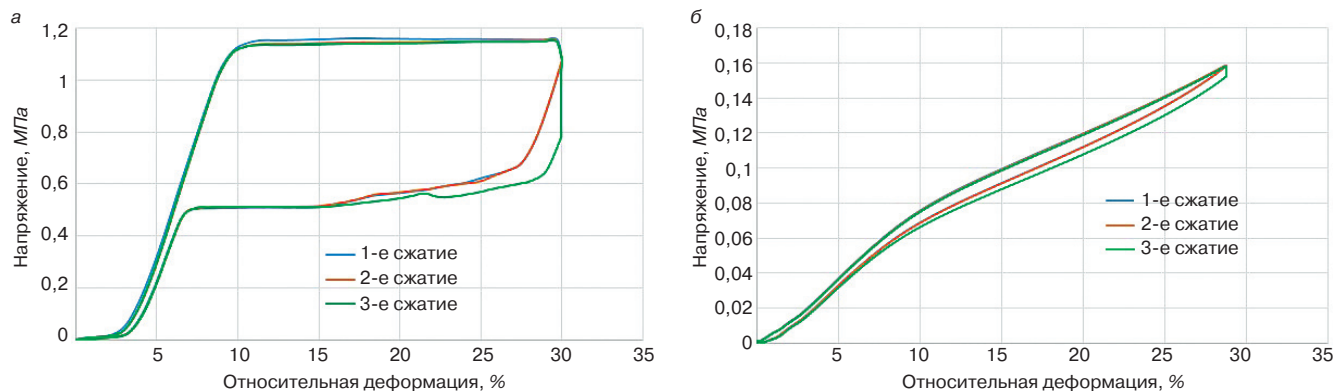


Рис. 1. Испытание на статическое сжатие образцов 300×300 мм: а – из резины; б – из эластомерного материала с закрытыми порами

жением и приводящих к достаточно глубоким структурным перестроениям [4]. Необратимое разрушение структуры под действием механических сил тем больше, чем меньше скорость релаксационных процессов. При многократных деформациях это приводит к соответствующим изменениям структуры и свойств резины. Упругие свойства резины нелинейны и носят резко выраженный релаксационный характер: зависят от режима нагружения, его величины, времени, скорости, частоты внешнего воздействия, а также температуры.

Эластичные пластмассы, ярким представителем которых являются вспененные полиуретаны, имеют ячеистую структуру со смешанными или закрытыми порами, что позволяет их рассматривать как сжимаемый материал (коэффициент Пуассона колеблется от 0,16 до 0,23). Благодаря этому свойству жесткость материала гораздо меньше зависит от форм-фактора образца, чем для резины, но имеет меньшую несущую способность и модуль упругости. Эластомеры обладают высокой эластичностью и практически не подвержены изменению механических свойств при многократных деформациях и старении материала, а также имеют низкую остаточную деформацию после снятия нагрузок.

Классические цилиндрические пружины, широко применяемые в задачах виброзащиты, имеют линейную зависимость между прикладываемой нагрузкой и деформацией во всем частотном диапазоне внешнего воздействия (для инженерной практики от 1 до 250 Гц). Кроме того, жесткость таких элементов не зависит от величины действующей нагрузки в отличие от эластомерных материалов, как показано на рис. 3. С данной точки зрения цилиндрические пружины выступают как «эталонные» виброизоляторы. Однако за счет пренебрежимо малого демпфирования в пружинах динамические перемеще-

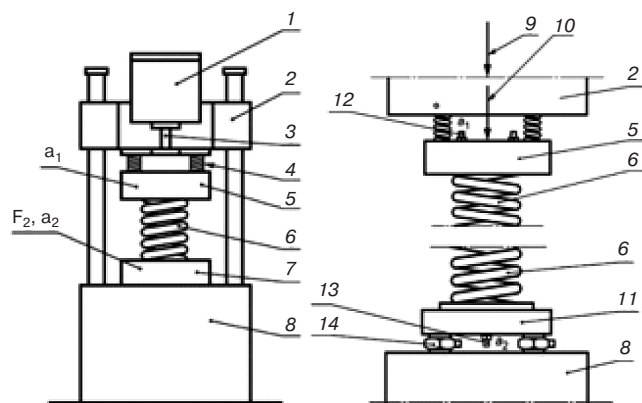


Рис. 2. Схема проведения измерений динамических характеристик: 1 – вибровозбудитель; 2 – траверса; 3 – толкатель; 4 – вспомогательные виброизоляторы; 5 – плита распределения вынуждающей силы; 6 – испытуемый объект; 7 – система измерения силы  $F_2$  и ускорения  $a_2$ ; 8 – жесткий фундамент; 9 – статическая нагрузка; 10 – динамическое возбуждение; 11 – плита распределения силы на выходной стороне; 12 – акселерометр  $a_1$ ; 13 – акселерометр  $a_2$ ; 14 – датчики силы  $F_2$

ния при резонансе в таких системах оказываются значительными, что приводит к необходимости использования дополнительных демпфирующих устройств, устанавливаемых параллельно основному упругому элементу [5].

В данной работе проводится анализ статического и динамического поведения вибродемпфирующих материалов, выполненных из резины и вспененного полиуретана, и определяются основные особенности их поведения, которые необходимо учитывать при детальном проектировании виброзащитных систем.

На рис. 1 показано поведение вязкоупругих материалов при статическом нагружении, при этом испыта-

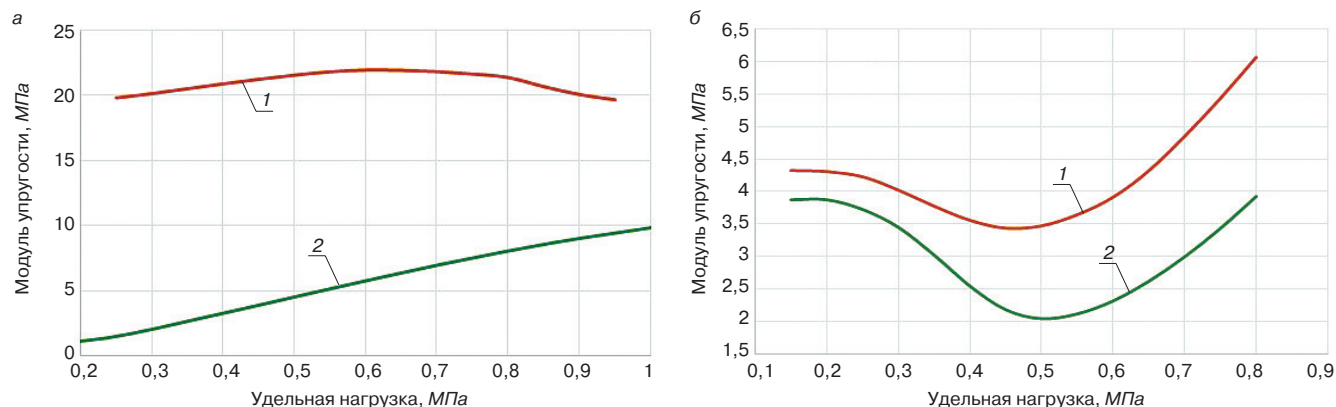


Рис. 3. Зависимость модуля упругости от величины удельной нагрузки: а – НИИРП 102; б – Sylodyn ND; 1 – 20 Гц; 2 – статическое

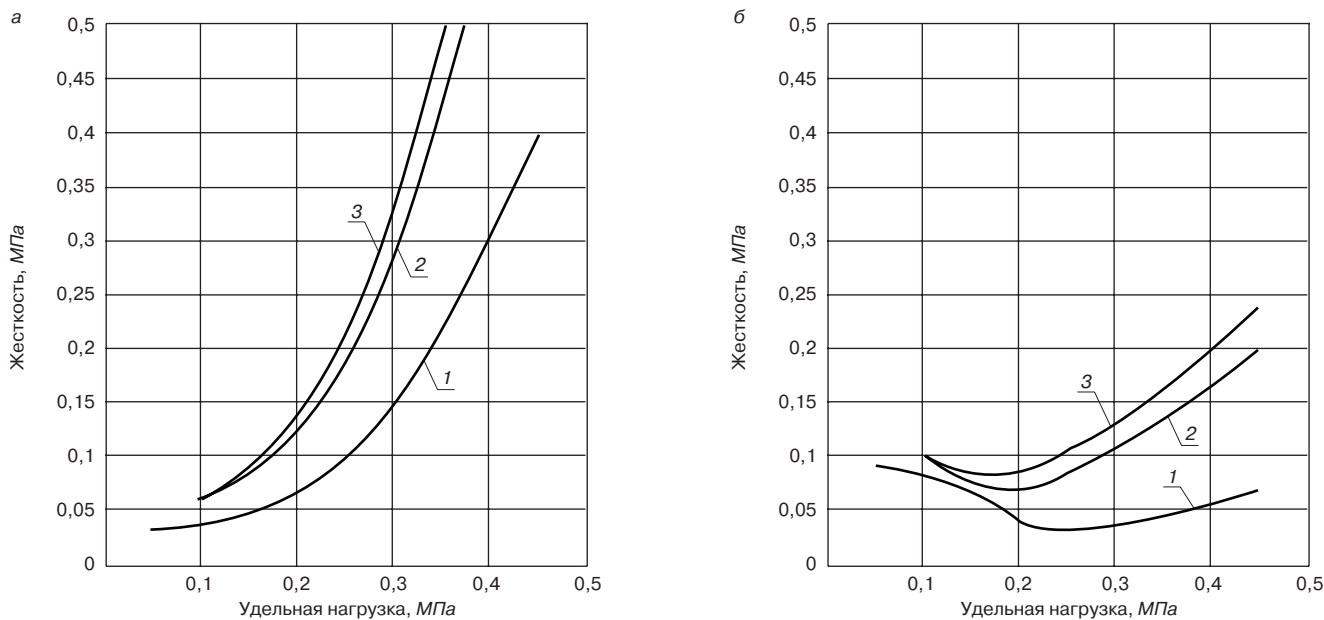


Рис. 4. Статические и динамические характеристики хлоропреновой резины (а); вспененного полиуретана (б)

нию подвергали образцы тех же размеров, что и для определения динамических характеристик. На рис. 1, а представлен образец из резины отечественного производства типа ИРП 102. Существенно нелинейное поведение и небольшой предел применимости по деформации обусловлен химическим составом и цельной структурой материала. На рис. 1, б показаны характеристики материала Sylodyn ND производства компании Getzner Werkstoffe GbmH. Для эластомерных материалов максимально возможная деформация может составлять до 80% [6], кроме того, он способен воспринимать пиковые нагрузки, во много раз превышающие диапазон его работы.

На данный момент существует несколько различных методик динамических испытаний вязкоупругих материалов, например резонансный метод (ГОСТ 16297–80. Материалы звукоизоляционные и звукопоглощающие. Методы испытаний в реверберационной камере), метод сдвиговых колебаний консольно закрепленного образца (ГОСТ Р ИСО 18437–3–2014. Вибрация и ударное определение динамических механических свойств вязкоупругих материалов. Ч. 3. Метод изгибных колебаний консольно закрепленного образца), метод динамической жесткости (ГОСТ Р ИСО 10846–2–2010. Вибрация. Измерения виброакустических передаточных характеристик упругих элементов конструкций в лабораторных условиях. Ч. 2. Прямой метод определения динамической жесткости упругих опор). Для определения динамических характеристик материалов в данной работе была выбрана методика, описанная в ГОСТ Р ИСО 10846–2, которая позволяет определять для вязкоупругих элементов с параллельными фланцевыми поверхностями прямым методом переходную динамическую жесткость при заданных величинах удельной нагрузки. Данный метод основан на измерении вибрации на входной стороне упругой опоры и затормаживающей силы на ее выходной стороне (рис. 2).

Для сравнения были выбраны материалы с примерно одинаковым рабочим диапазоном нагрузок: ИРП 102 и Sylodyn ND. Испытание проводили при нормальных условиях на частоте 20 Гц, образцы имеют форму фактор б. На рис. 3 показаны зависимости статического и динамического модуля упругости от величины удельной нагрузки, действующей на образец, в рабочем диа-

пазоне нагрузок. Как видно из графиков рис. 3, а, с увеличением удельной нагрузки на резину ее динамическая жесткость также повышается. Для эластомеров, напротив, при увеличении нагрузки она снижается в определенном диапазоне. В частности, такая особенность может быть использована для проектирования равночастотных опор [2].

На рис. 4 представлены кривые нагрузка – деформация для хлоропреновой резины зарубежного производства и вспененного полиуретана, имеющих сравнительно близкий начальный динамический модуль упругости, при различных частотах внешнего воздействия.

Как видно из сравнения графиков на рис. 4, а и рис. 3, а, в общем случае все резины обладают тем свойством, что с возрастанием частоты внешней нагрузки увеличивается их динамическая жесткость. Данный факт нашел подтверждение в работах [10–12]. Отношение динамической  $k_{dyn}$  к статической жесткости  $k_{stat}$  для резин колеблется в диапазоне от 1,5 до 2,5. Кроме того, коэффициент потерь механической энергии для резиновых элементов является также частото-зависимым, как показано на рис. 5 [10].

При этом с уменьшением  $k_{dyn}/k_{stat}$  качество виброзащитной системы увеличивается, приближаясь к «эта-

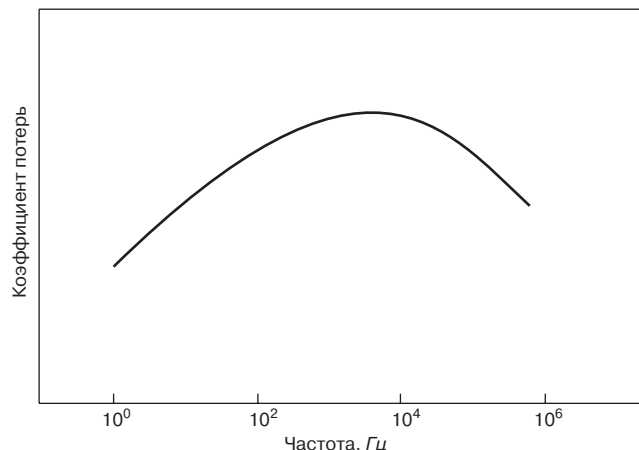


Рис. 5. Зависимость коэффициента потерь механической энергии от частоты внешнего воздействия для резины



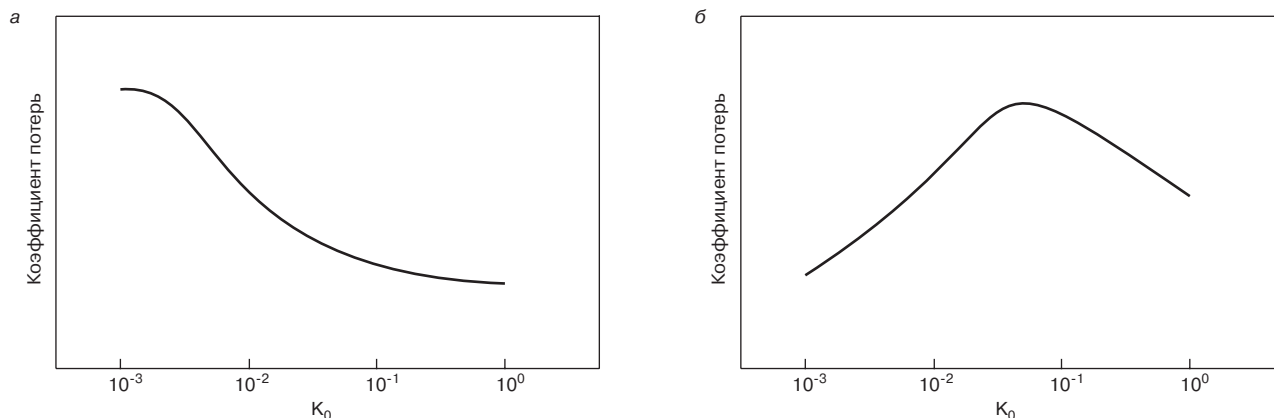


Рис. 6. Зависимость динамического модуля сдвига (а) и коэффициента потерь (б) от амплитуды воздействия

лонному» случаю. Как видно из анализа графиков на рис. 3, б и рис. 4, б, данное отношение для вспененного полиуретана составляет около 1,2–1,3.

Указанная зависимость динамических характеристик резин от частоты нагрузки связана с реорганизацией полимерных цепей в материале при нагружении [10]. Поскольку данная реорганизация не может происходить моментально, потеря энергии оказывается частотозависимой.

Для резин характерен эффект Флетчера–Гента, при котором с увеличением амплитуды деформации  $K_0$  модуль сдвига снижается, а коэффициент потерь механической энергии возрастает, как показано на рис. 6. Как показывают последние исследования [10–12], амплитудная зависимость связана с изменением (сдвижкой) слабых связей между структурой заполнителя и полимерными цепочками в резине.

При этом для эластомерных материалов, таких как вспененный полиуретан, данные особенности не столь явно выражены, поскольку при деформациях до 30–40% происходит преимущественное сжатие или перетекание воздуха в порах материала без существенного влияния на саму структуру материала.

В заключение можно отметить, что основным параметром, который описывает качество вибродемпфирующего материала, выполненного из резины или эластичной пластмассы, является отношение между статической  $k_{stat}$  и динамической  $k_{dyn}$  жесткостями. Статическая жесткость определяет прогибы виброизолируемого объекта при действии постоянных и временных нагрузок, а динамическая — является основной характеристикой, описывающей эффективность виброизоляции. Чем меньше данное отношение, тем более эффективную систему виброизоляции можно спроектировать. В частности, для эластомерных материалов при  $k_{dyn}/k_{stat}$  около 1,3 возможно спроектировать систему виброизоляции с собственной частотой около 7 Гц.

При этом, как показали проведенные сравнительные испытания, важно понимать поведение материалов при действии не только статической, но и динамической нагрузки различной частоты и амплитуды. Комплексные исследования вибродемпфирующих материалов позволяют спроектировать систему виброизоляции, эффективную в широком диапазоне нагрузок на нее.

#### Список литературы

1. Барабошин В.Ф. Основные параметры новой конструкции пути метрополитенов с повышенными виброзащитными свойствами. *Труды ВНИИЖТ*.

*Совершенствование конструкции железнодорожного пути метрополитенов*. 1981. Вып. 630. С. 26–53.

2. Челомей В.Н. Вибрации в технике. Т. 6. Защита от вибрации и ударов / Под ред. К.В. Фролова. М.: Машиностроение, 1981. 455 с.
3. Нашиф А., Джоунс Д., Хендерсон Дж. Демпфирование колебаний / Пер. с англ. М.: Мир, 1988. 488 с.
4. Булат А.Ф., Дырда В.И., Звягильский Е.Л., Кобец А.С. Прикладная механика упругонаследственных сред: В 4 томах. Т. 1. Механика деформирования и разрушения эластомеров. Киев: Наукова думка, 2011. 568 с.
5. VDI 2062:2–2007 Vibration Insulation – Insulation Element. Verlag des Vereins Deutscher Ingenieure. 52 p.
6. ГОСТ 16297–80 «Материалы звукоизоляционные и звукопоглощающие. Методы испытаний в реверберационной камере». М.: Издательство стандартов, 1988.
7. ГОСТ Р ИСО 18437-3–2014 «Вибрация и удар. Определение динамических механических свойств вязкоупругих материалов. Ч. 3. Метод изгибных колебаний консольно закрепленного образца». М.: Стандартинформ, 2015.
8. ГОСТ Р ИСО 10846-2–2010 «Вибрация. Измерения виброакустических передаточных характеристик упругих элементов конструкций в лабораторных условиях. Ч. 2. Прямой метод определения динамической жесткости упругих опор». М.: Стандартинформ, 2011.
9. Смирнов В.А. Расчет и моделирование демпфирующих устройств прецизионного испытательного стенда // *Строительство и реконструкция*. 2016. № 3 (65) С. 61–70.
10. Olsson A.K. Finite element procedures in modeling the dynamic properties of rubber. Doctoral Thesis, Lund University. 2007.
11. Garcia Tarrago M.J., Kari L., Vinolas J., Gil-Negrete N. Frequency and amplitude dependence of the axial and radial stiffness of carbon-black filled rubber bushings. *Polymer Testing*. 2007. Vol. 26. Iss. 5, pp. 629–638.
12. Garcia Tarrago M.J., Kari L., Vinolas J., Gil-Negrete N. Torsion stiffness of a rubber bushing: A simple engineering design formula including the amplitude dependence. *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*. 2007. Vol. 42. Iss. 1, pp. 13–21.

#### References

1. Baraboshin V.F. The main parameters of the new design of the metro routes with increased vibro-protective

- properties. *Proceedings of VNIIZhT. Improving the design of the metro railways.* 1981. Vol. 630, pp. 26–53. (In Russian).
- Chelomei V.N. *Vibratsii v tekhnike. T. 6. Zashchita ot vibratsii i udarov / Pod red. K.V. Frolova [Vibrations in technology. Vol. 6. Protection from vibration and shock. Ed. by Frolov K.W.].* Moscow: Mashinostroenie. 1981. 455 p.
  - Nashif A., Dzhouns D., Khenderson Dzh. *Dempfirovaniye kolebanii: Per. s angl. [Damping of oscillations: Trans. From English]* Moscow: Mir. 1988. 488 p.
  - Bulat A.F., Dyrda V.I., Zvyagil'skiy E.L., Kobets A.S. *Prikladnaya mekhanika uprugonasledstvennykh sred: v 4-kh tomakh. T. 1. Mekhanika deformirovaniya i razrusheniya elastomerov [Applied mechanics of elastic hereditary media: in 4 volumes. Vol. 1. Mechanics of deformation and fracture of elastomers].* Kiev: Naukova dumka. 2011. 568 p.
  - VDI 2062:2–2007 *Vibration Insulation – Insulation Element.* Verlag des Vereins Deutscher Ingenieure. 52 p.
  - GOST 16297–80 *Materialy zvukoizolyatsionnye i zvukopoglashchayushchie. Metody ispytaniy v reverberatsionnoi kamere [Soundproof materials and sound-absorbing materials. Test methods in a reverberation chamber].* Moscow: Publishing House of Standards. 1988. (In Russian).
  - GOST R ISO 18437–3–2014 *Vibratsiya i udar. Opredelenie dinamicheskikh mekhanicheskikh svoystv vyazkouprugikh materialov. Chast' 3. Metod izgibnykh kolebanii konsol'no zakreplennogo obraztsa [Vibration and shock. Deter-*
- mination of the dynamic mechanical properties of viscoelastic materials. Part 3. Method of bending vibrations of a cantilevered specimen]. Moscow: Standartinform. 2015. (In Russian).
  - GOST R ISO 10846-2–2010 *Vibratsiya. Izmereniya vibroakusticheskikh peredatochnykh kharakteristik uprugikh elementov konstruksii v laboratornykh usloviyakh. Chast' 2. Pryamoi metod opredeleniya dinamicheskoi zhestkosti uprugikh opor [Vibration. Measurements of vibro-acoustic transfer characteristics of elastic structural elements in laboratory conditions. Part 2. Direct method for determining the dynamic rigidity of elastic supports].* Moscow: Standartinform. 2011. (In Russian).
  - Smirnov V.A. Calculation and simulation of damping devices of a precision test bench. *Stroitel'stvo i Rekonstruktsiya.* 2016. No. 3 (65), pp. 61–70. (In Russian).
  - Olsson A.K. Finite element procedures in modeling the dynamic properties of rubber. Doctoral Thesis, Lund University. 2007.
  - Garcia Tarrago M.J., Kari L., Vinolas J., Gil-Negrete N. Frequency and amplitude dependence of the axial and radial stiffness of carbon-black filled rubber bushings. *Polymer Testing.* 2007. Vol. 26. Iss. 5, pp. 629–638.
  - Garcia Tarrago M.J., Kari L., Vinolas J., Gil-Negrete N. Torsion stiffness of a rubber bushing: A simple engineering design formula including the amplitude dependence. *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design.* 2007. Vol. 42. Iss. 1, pp. 13–21.

Реклама

АО «Завод ЛИТ» 152020, Россия, Ярославская обл., Переславль-Залесский, Советская, 1  Тел: 8 (800) 2-34-34-35 E-mail: lit@zavodlit.ru www.zavodlit.ru

# ТИЛИТ®

## ПЛАВАЮЩИЙ ПОЛ

товар сертифицирован, соответствует требованиям СП51-13330-2011 ГОСТ 23499-2009

Разделяющий шумоизоляционный слой, обеспечивающий отсутствие жесткой связи бетонной стяжки пола с основанием и стенами.

СРОК ЭКСПЛУАТАЦИИ: **50 ЛЕТ** НЕ МЕНЕЕ

Протокол испытаний НИИСФ РААСН №1/22.05.2018

ЗАКРЫТАЯ ЯЧЕЙСТАЯ СТРУКТУРА

### РЕЗУЛЬТАТЫ АКУСТИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ

	6 мм	8 мм	10 мм
Коэффициент относительного сжатия $\epsilon_r$ , при нагрузке на образец (2000/5000 Па)	0,063/0,126	0,031/0,071	0,052/0,081
Динамический модуль упругости $E_d$ , МПа, при нагрузке на образец (2000/5000 Па)	0,532/1,263	0,8/1,625	0,79/1,913
Коэффициент потерь колебаний $\eta$ , при нагрузке на образец (2000/5000 Па)	0,226/0,215	0,209/0,208	0,253/0,195
Индекс улучшения изоляции ударного шума $\Delta L_{w, dB}$	25	23	25

**АКСЕССУАРЫ**

ЛЕНТА ДЕМПФЕРНАЯ ТИЛИТ® СУПЕР

ЛЕНТА ДЕМПФЕРНАЯ ТИЛИТ® БАЗИС



**NEW**

А.А. Федулов

### Технология гипсовых отделочных материалов и изделий

**Федулов А.А., М:**  
ООО РИФ «СТРОЙМАТЕРИАЛЫ», 2018. 240 с.

В книге описано производство гипсовых отделочных материалов и изделий от добычи сырья до упаковки готовой продукции. Особое внимание автор уделяет подробному описанию технологических линий и от дельных единиц оборудования, установленных на передовых предприятиях гипсовой промышленности. В книге представлено большое количество иллюстраций всех технологических переделов, которые помогут глубже представить и понять технологические процессы производства того или иного изделия. Описание технологии каждого вида гипсовых изделий основывается на существующих производственных регламентах предприятий России, Германии и Дании, включая шахты, карьеры, которые автор посещал лично.

Книга предназначена студентам, изучающим производство строительных материалов и конструкций в качестве дополнительного материала по технологии современных гипсовых изделий, а также для инженеров-технологов заводов, производящих гипсовую продукцию в качестве справочного материала.

**Тел./факс: (499) 976-22-08, 976-20-36**  
**E-mail: mail@rifsm.ru**

В.С. ЛЕСОВИК<sup>1</sup>, д-р техн. наук (naukavs@mail.ru), С.В. АЛЕКСЕЕВ<sup>1</sup>, канд. техн. наук (aleks\_sb@list.ru); И.В. БЕССОНОВ<sup>2</sup>, канд. техн. наук (bessonoviv@mail.ru); С.С. ВАЙСЕРА<sup>1</sup>, инженер (vaisera\_sersei@mail.ru)

<sup>1</sup> Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова (308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46)

<sup>2</sup> Научно-исследовательский институт строительной физики РААСН (127238, г. Москва, Локомотивный пр., 21)

## Управление структурой и свойствами акустических материалов на основе пеностеклокомпозитов

Представлен подход к созданию эффективных акустических стеклокомпозитов. Звукопоглощающие свойства материалов с жестким каркасом зависят от вида и размера пор на поверхности и объема сообщающихся пор в теле материала. Исследована пористая структура материала. Показано, что характер кривой распределения пор по размерам и кривой звукопоглощения имеют схожий вид. Размер пор связан с частотой звука, наибольший вклад в звукопоглощение материала вносят поры размером 200–250 и 450 мкм. Получена зависимость между водопоглощением и акустическими характеристиками. Коэффициент звукопоглощения достигает экстремума при значении водопоглощения образцов в интервале 35–45%, при дальнейшем повышении водопоглощения наблюдается постепенное снижение коэффициента звукопоглощения. Установлен нижний и верхний размерный порог акустически активных пор, количество открытой (сообщающейся) пористости в материале при достижении максимальных значений коэффициента звукопоглощения. Определены основные требования к оптимальным структурам, позволяющие достигнуть требуемых акустических показателей материала.

**Ключевые слова:** геоника, пористость, прочность, водопоглощение, звукопоглощение, пеностекло, энергосбережение.

**Для цитирования:** Лесовик В.С., Алексеев С.В., Бессонов И.В., Вайсера С.С. Управление структурой и свойствами акустических материалов на основе пеностеклокомпозитов // *Строительные материалы*. 2018. № 6. С. 41–44.

V.S. LESOVIK<sup>1</sup>, Doctor of Sciences (Engineering) (naukavs@mail.ru), S.V. ALEKSEEV<sup>1</sup>, Candidate of Sciences (Engineering) (aleks\_sb@list.ru); I.V. BESSONOV<sup>2</sup>, Candidate of Sciences (Engineering) (bessonoviv@mail.ru); S.S. VAISERA<sup>1</sup>, Engineer (vaisera\_sersei@mail.ru)

<sup>1</sup> Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (46, Kostyukova Street, Belgorod, 308012, Russian Federation)

<sup>2</sup> Scientific-Research Institute of Building Physics of the Russian Academy architecture and construction sciences (21, Lokomotivnyi Driveway, Moscow, 127238, Russian Federation)

### Control of the Structure and Properties of Acoustic Materials on the Basis of Foam Glass Composites

An approach to the creation of effective acoustic glass composites is presented. Sound-absorbing properties of materials with a rigid frame depend on the type and size of pores on the surface and the volume of communicating pores in the material body. The porous structure of the material is investigated. It is shown that the nature of the pore size distribution curve and the sound absorption curve are similar. Pore size is associated with the sound frequency, the largest contribution to the sound absorption of the material is made by pores of 200–250 μm and 450 μm. The dependence between water absorption and acoustic characteristics is obtained. The sound absorption coefficient reaches the extreme point at the value of water absorption of samples in the range of 35–45%, with further increase in water absorption, a gradual decrease in the sound absorption coefficient is observed. The lower and upper dimensional thresholds of acoustically active pores, the number of open (communicating) porosity in the material, when reaching the maximum values of the sound absorption coefficient, are established. The basic requirements for optimal structures making it possible to achieve the required acoustic performance of the material are determined.

**Keywords:** geonika, porosity, strength, water absorption, sound absorption, glass composite, energy saving.

**For citation:** Lesovik V.S., Alekseev S.V., Bessonov I.V., Vaisera S.S. Control of the structure and properties of acoustic materials on the basis of foam glass composites. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials], 2018. No. 6, pp. 41–44. (In Russian).

Важной задачей современного строительства гражданских зданий является создание комфортного акустического климата в помещениях различного назначения. Акустический климат в помещении в значительной степени определяется способностью ограждающих конструкций (стен, перегородок, перекрытий и др.) изолировать воздушный и ударный звук, а условия слухового восприятия речи и музыки (особенно важно для ряда общественных зданий) — способностью поглощать звук ограждающими поверхностями (рис. 1). Для решения данной задачи целесообразно использовать эффективные акустические материалы. Но помимо хорошей звукоизоляционной и звукопоглощающей способности акустические материалы должны удовлетворять требования и других показателей. К звукопоглощающим материалам предъявляют требования по механической прочности и декоративности, поскольку их применяют для облицовки стен внутри помещения. Так же как и теплоизоляционные, они должны быть пожаробезопасными и не выделять во время эксплуатации вредных для

человека веществ [1–3]. К числу таких материалов можно отнести пеностекло [4]. Традиционное пеностекло за счет низкой теплопроводности, продолжительного сро-

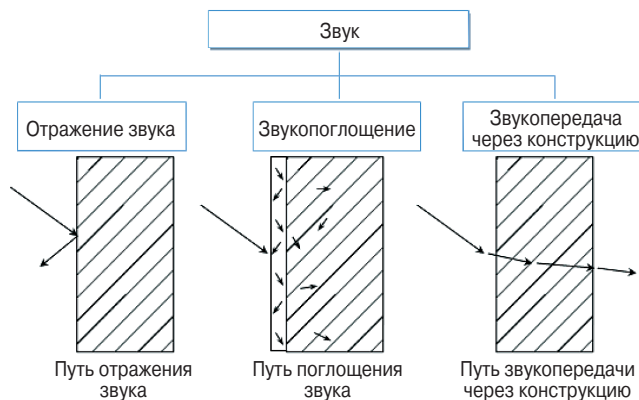


Рис. 1. Пути прохождения звука через конструкцию

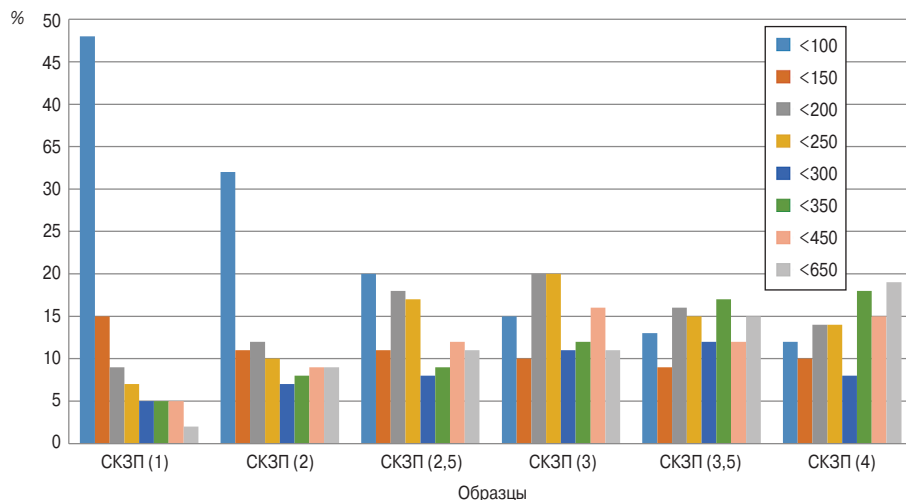


Рис. 2. Распределение пор по размерам СКЗП

**Эксплуатационные характеристики стеклокомполитов**

Стеклокомпозит звукопоглощающего назначения (СКЗП)*	Количество газообразователя, %	$K_{всп}$	$\rho_{ср}$ , кг/м <sup>3</sup>	Прочность, МПа	W, %	Коэффициент звукопоглощения
1	0,1	3,7	285	0,85	15–20	0,28
1,5	0,15	4	260	0,85	21–24	0,39
2	0,2	4	240	0,75	25–28	0,46
<b>2,5</b>	<b>0,25</b>	<b>4,2</b>	<b>230</b>	<b>0,7</b>	<b>32–36</b>	<b>0,67</b>
<b>3</b>	<b>0,3</b>	<b>4,7</b>	<b>205</b>	<b>0,6</b>	<b>39–45</b>	<b>0,7</b>
3,5	0,35	4,7	185	0,55	50–54	0,62
4	0,4	4,9	160	0,4	62–68	0,35
4,5	0,45	5,2	150	0,3	75	0,35
5	0,5	5,5	135	0,3	75	0,33

\* Толщина образца 100 мм.

ка эксплуатации и неорганического состава применяют в теплоизоляции промышленных и гражданских ограждающих конструкций, а также в тепло- и звукоизоляции инженерных коммуникаций. Наряду с указанными достоинствами пеностекло имеет также ряд недостатков, основными из которых являются нецелесообразность использования материала внутри помещения за счет низких значений звукопоглощения и высокой стоимости.

Схема взаимодействия ограждающей конструкции с энергией падающего на нее звука: часть энергии отражается от поверхности конструкции, часть энергии поглощается конструкцией и часть проходит сквозь нее (рис. 1).

Соотношение значений этих энергий в основном зависит от трех факторов:

- вида и размера пор на поверхности материала и характера пористости внутри;
- степени упругости материала (конструкции);
- массы материала (конструкции).

С учетом того, что пеностекло имеет жесткий каркас, варьировать упругость материала не представляется возможным, так же как и идти по пути увеличения массы конструкции (материала) нецелесообразно по ряду причин. Что касается изменения вида пористой структуры пеностекла, то это возможно путем введения в пенообразующую смесь добавок различного рода. В работах [5, 6] показано положительное влияние на механические и акустические свойства пеностекла добавок тита-

нового концентрата. Известны работы, в которых для получения звукопоглощающего пеностекла обоснована целесообразность использования в качестве газообразователя карбонатных пород [7].

Звукопоглощающие свойства материалов с жестким каркасом прежде всего зависят от вида и размера пор на поверхности материала и характера пористости внутри (сообщающаяся или замкнутая пористость). Известно, что размер пор тесно связан с частотой звука [8, 9]. Так, увеличение звукопоглощения на низких частотах может быть достигнуто за счет относительно больших пор, а на высоких – за счет мелких пор. Следовательно, для поглощения звука в широком диапазоне частот необходимо сочетание крупных и мелких пор.

При использовании газообразователей с различным механизмом газовыделения, были получены образцы с разными эксплуатационными характеристиками (см. таблицу).

Из анализа таблицы следует, что коэффициент звукопоглощения достигает экстремума при водопоглощении образцов в интервале 35–45%, при дальнейшем повышении водопоглощения наблюдается постепенное снижение коэффициента звукопоглощения.

Разработанные образцы стеклокомполитов были исследованы на предмет распределения пор по размерам (рис. 2).

С увеличением концентрации газообразователя в смеси наблюдается изменение пор в размерах и характере их распределения по объему стеклокомполита. Так, наблюдается уменьшение количества пор размером менее 100 мкм (неактивных) в сторону увеличения количества пор более крупных в следующих размерных интервалах: 200–250; 450; 650 мкм.

Наиболее выраженным коэффициентом звукопоглощения обладал образец, полученный при введении газообразователя в пенообразующую смесь в размере 0,3%. Данный образец исследован методом электронной сканирующей микроскопии (рис. 3).

Анализ рис. 3 позволяет предположить, что высокий коэффициент звукопоглощения был достигнут за счет создания структуры материала с макро- и микропорами, равномерно распределенными по объему материала.

Для определения оптимального размера пор (соотношения пор по размерам) соответствующих работе материала на заданной частоте (1000 Гц) был произведен сопоставимый анализ кривых распределения пор по размерам и коэффициента звукопоглощения (рис. 4).

Установлено, что преобладание в материале пор менее 100 мкм приводит к низким значениям звукопоглощения (СКЗП (1)). Объясняется это ухудшением условий прохождения звуковых волн внутрь материала; размеры пор менее 100 мкм можно отнести к категории

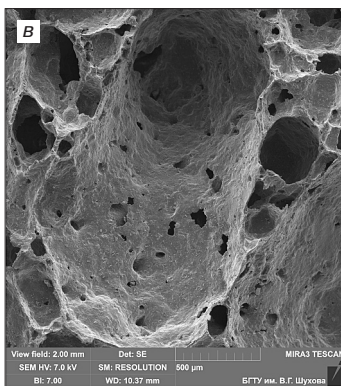
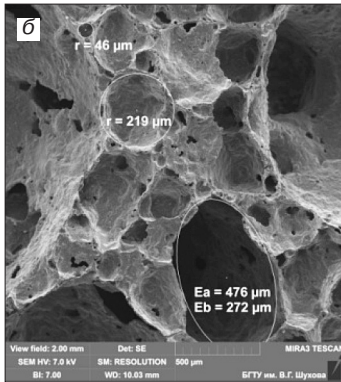
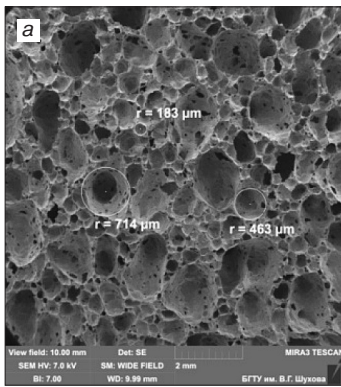


Рис. 3. Микрофотографии образцов пеностекла при различном увеличении: а –  $\times 100$ ; б –  $\times 500$ ; в –  $\times 500$

акустически пассивных, что будет соответствовать наличию закрытой пористости. Образцы состава № 2, 5 и 3 имеют экстремум (звукопоглощение 0,69), у данных образцов преобладают поры размером 200–250 и 450 мкм. Характер кривой распределения пор по размерам и кривой звукопоглощения схожи и свидетельствует о том, что наибольший вклад в звукопоглощение материала вносят поры размером 200–250 и 450 мкм. Ограничение верхнего предела крупности (размера) пор, после которого наблюдается постепенное снижение коэффициента звукопоглощения (примерно 400–500 мкм). Поэтому максимальные значения коэффициента звукопоглощения материала при увеличении установленного размера пор уменьшаются.

Коэффициент звукопоглощения полученных стеклокомпозиатов на различных частотах приведен на рис. 5.

Анализ рис. 5 свидетельствует о том, что на низких частотах материалы показывают сравнительно низкие значения коэффициента звукопоглощения. При увеличении процента открытой (сообщающейся) пористости

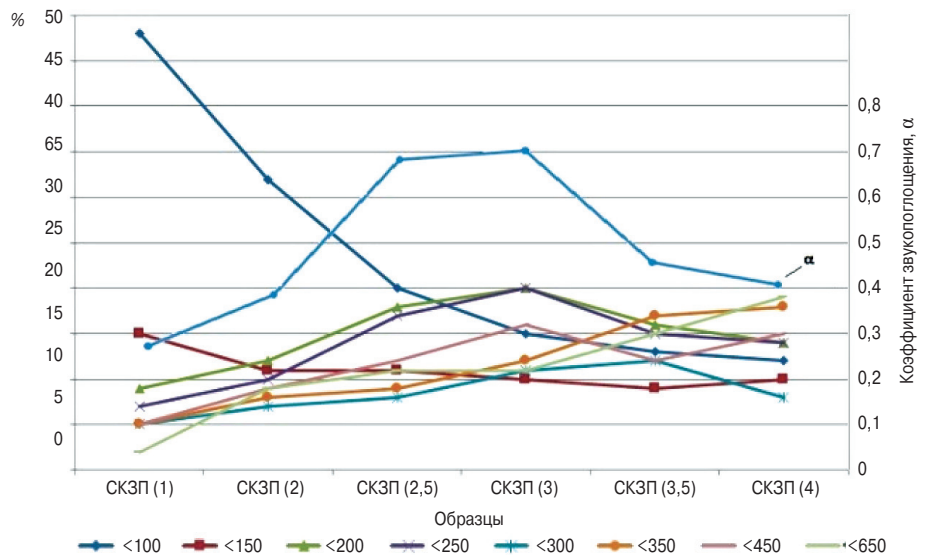


Рис. 4. Зависимость коэффициента звукопоглощения материала от распределения пор по размерам

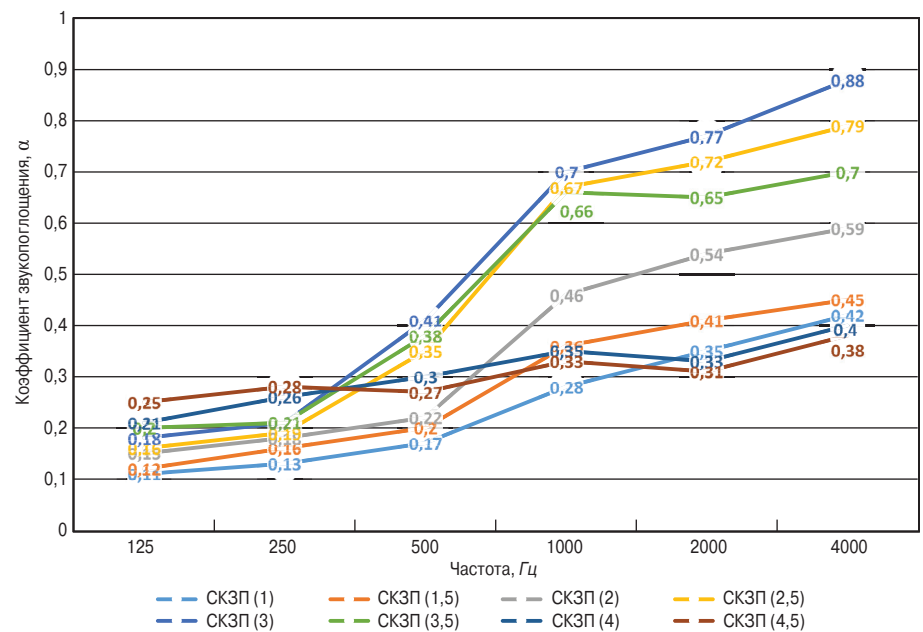


Рис. 5. Коэффициент звукопоглощения разработанных СКЗП на различных частотах

материала за счет увеличения количества вводимого газообразователя в пенообразующую смесь коэффициент звукопоглощения на средних и высоких частотах (500–4000 Гц) также увеличивается. Максимальные значения звукопоглощения достигаются в пределах 35–45% открытой пористости (водопоглощения); последующее увеличение процента открытой пористости способствует снижению коэффициента звукопоглощения вследствие уменьшения влияния вязкого трения воздуха в материале.

Таким образом, установлен нижний и верхний размерный порог акустически активных пор и количество открытой (сообщающейся) пористости в материале при достижении максимальных значений коэффициента звукопоглощения. Использование различных красящих пигментов в процессе производства позволяет получать материал различной цветовой окраски: белого, красного и синего оттенков (рис. 6).

Проведение теоретических и практических исследований [10, 11], связанных со звукопоглощением пори-

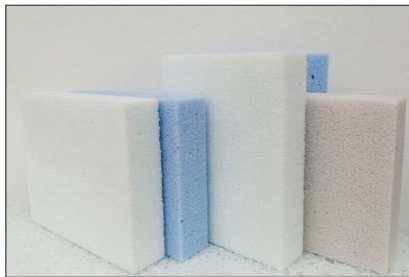


Рис. 6. Декоративно-акустические СКЗП

стых материалов (пеностекла), а также изучение влияния параметров пористости на звукопоглощение позволяют сформулировать технологические условия регулирования свойств декоративно-акустических материалов. Создание многомодальной открытой (сообщающейся) пористости обеспечивает эффективное поглощение звука на средних и высоких частотах. Данные результаты позволяют существенно повысить эффективность использования пеностекла в звукоизоляцион-

ных конструкциях и как самостоятельный звукопоглощающий материал, приближая его характеристики к лучшим из известных аналогов.

Возможность получения материалов широкой цветовой гаммы способствует увеличению их привлекательности применения в жилых и административных зданиях. Абсолютная негорючесть приводит к повышению пожарной безопасности.

Таким образом, специально разработанное пеностекло может обладать высокими звукопоглощающими свойствами, высокой прочностью и декоративностью, что позволяет использовать его без применения других отделочных материалов. Поэтому, несмотря на высокую стоимость самого материала, общая стоимость конструкции в целом не особенно велика по сравнению с использованием других материалов, требующих дополнительной внешней отделки.

### Список литературы

1. Кабанова М.К., Токарева С.А., Уваров П.П. Основные критерии – безопасность, экологичность и долговечность строительных материалов // *Строительные материалы*. 2017. № 1–2. С. 90–93.
2. Лесовик В.С. Строительные материалы. Настоящее и будущее // *Вестник МГСУ*. 2017. Т. 12. № 1 (100). С. 9–16.
3. Осипов А.Н. Энергоэффективный, пожаробезопасный теплоизоляционный материал – пеностекло // *Кровельные и изоляционные материалы*. 2013. № 2. С. 17–18.
4. Бессонов И.В., Шубин И.Л., Умнякова Н.П., Спиридонов А.В. Перспективы применения материалов и изделий из пеностекла в системах тепловой изоляции // *БСТ*. 2017. № 6. С. 12–14.
5. Семухин Б.С., Вотинов А.В., Казьмина О.В., Ковалев Г.И. Влияние малых добавок диоксида циркония на акустические свойства пеностекляных материалов // *Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета*. 2014. № 6 (47). С. 123–131.
6. Семухин Б.С., Казьмина О.В., Ковалев Г.И., Опаренков Ю.В., Душкина М.А. Определение акустических свойств пеностеклокристаллических материалов // *Известия высших учебных заведений. Физика*. 2013. Т. 56. № 7–2. С. 334–338.
7. Шутов А.И., Мосьпан В.И., Воля П.А., Алексеев С.В. Пеностекло. Белгород: БГТУ им В.Г. Шухова, 2009. 109 с.
8. Румянцев Б.М., Жуков А.Д., Боброва Е.Ю. Структура и эксплуатационные свойства декоративно-акустических материалов // *Инновации в жизнь*. 2017. № 1 (20). С. 17–24.
9. Румянцев Б.М., Жуков А.Д., Боброва Е.Ю. Звукопоглощение и пористость акустических материалов // *Инновации в жизнь*. 2017. № 1 (20). С. 67–76.
10. Вайсера С.С., Пучка О.В., Лесовик В.С., Бессонов И.В., Сергеев С.В. Эффективные акустические стеклокомпозиты // *Строительные материалы*. 2016. № 6. С. 28–32.
11. Вайсера С.С., Пучка О.В., Лесовик В.С., Бессонов И.В., Алексеев С.В. Влияние влагосодержания, воздухопроницаемости и плотности материала на его звукопоглощающие характеристики // *Строительные материалы*. 2017. № 6. С. 24–28.

### References

1. Kabanova M.K., Tokareva S.A., Uvarov P.P. Main criteria are safety, ecological compatibility and durability of building materials. *Stroitel'nye Materialy* [Construction materials]. 2017. No. 1–2, pp. 90–93. (In Russian).
2. Lesovik V.S. Construction Materials. The present and the future. *Vestnik MGSU*. 2017. Vol. 12. No. 1 (100), pp. 9–16. (In Russian).
3. Osipov A.N. Energy-efficient, fireproof thermal insulation material – foam glass. *Krovel'nye i izolyazionnyye materialy*. 2013. No. 2, pp. 17–18. (In Russian).
4. Bessonov I.V., Shubin I.L., Umnyakova N.P., Spiridonov A.V. Prospects for the application of materials and products from foamed glass in thermal insulation systems. *BST*. 2017. No. 6, pp. 12–14. (In Russian).
5. Semukhin B.S., Votinov A.V., Kazmina O.V., Kovalev G.I. Influence of small additives of zirconium dioxide on the acoustic properties of foam glass materials. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta*. 2014. No. 6 (47), pp. 123–131. (In Russian).
6. Semukhin B.S., Kazmina O.V., Kovalev G.I., Oparenkov Yu.V., Dushkina M.A. Determination of acoustic properties of foam glass crystal materials. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Fizika*. 2013. Vol. 56. No. 7–2, pp. 334–338. (In Russian).
7. Shutov A.I., Mospan V.I., Volya P.A., Alekseev S.V. Penosteklo [Foam glass]. Belgorod: BGTU im. V.G. Shukhova. 2009. 109 p.
8. Rumyantsev B.M., Zhukov A.D., Bobrova E.Yu. Structure and operational properties of decorative-acoustic materials. *Innovazii v zhizn'*. 2017. No. 1 (20), pp. 17–24. (In Russian).
9. Rumyantsev B.M., Zhukov A.D., Bobrova E.Yu. Sound absorption and porosity of acoustic materials. *Innovazii v zhizn'*. 2017. No. 1 (20), pp. 67–76. (In Russian).
10. Vaisera S.S., Puchka O.V., Lesovik V.S., Bessonov I.V., Sergeev S.V. Efficient Acoustic Glass Composites. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2016. No. 6, pp. 28–32. (In Russian).
11. Vaisera S.S., Puchka O.V., Lesovik V.S., Bessonov I.V., Alekseev S.V. Impact of Moisture Content, Air Permeability, and Density of Material on Its Noise-Absorption Characteristics. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2017. No. 6, pp. 24–28. (In Russian).

А.А. АСКАДСКИЙ<sup>1, 2</sup>, д-р хим. наук (andrey@ineos.ac.ru);  
 К.С. ПИМИНОВА<sup>2</sup>, магистрант (ksenia.p.s@mail.ru),  
 А.В. МАЦЕЕВИЧ<sup>2</sup>, младший научный сотрудник (avmac@mail.ru)

<sup>1</sup> Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (129337, г. Москва, Ярославское ш., 26)

<sup>2</sup> Институт элементоорганических соединений им. А.Н. Несмеянова РАН (119991, г. Москва, ул. Вавилова, 28)

## Релаксационные свойства террасных досок, изготовленных из древесно-полимерных композитов (ДПК)

Проведены эксперименты по релаксации напряжения на образцах, представляющих собой фрагменты террасных досок, где матричным полимером являлся поливинилхлорид. Измерения проведены при разных постоянных деформациях сжатия от 2 до 5% и температуре от 20 до 70°C. Установлено, что при всех условиях относительная релаксация принимает малые значения, что свидетельствует о длительном сохранении механической работоспособности изделий. Нелинейное механическое поведение проявляется уже при деформации 3%. При температуре 20–35°C релаксационные процессы проходят практически одинаково без уменьшения начального и конечного напряжения. При температуре 50–70°C оба напряжения снижаются. Построена обобщенная релаксационная кривая, которая позволяет прогнозировать механическое поведение на длительное время.

**Ключевые слова:** древесно-полимерные композиты, террасные доски, релаксация напряжения, ползучесть, релаксаторы, ядро релаксации, обобщенная кривая, фактор сдвига.

**Для цитирования:** Аскадский А.А., Пиминова К.С., Матеевич А.В. Релаксационные свойства террасных досок, изготовленных из древесно-полимерных композитов (ДПК) // *Строительные материалы*. 2018. № 6. С. 45–52.

A.A. ASKADSKII<sup>1, 2</sup>, Doctor of Sciences (Chemistry), Head of Laboratory (andrey@ineos.ac.ru);  
 K.S. PIMINOVA<sup>2</sup>, Master (ksenia.p.s@mail.ru), A.V. MATSEEVICH<sup>2</sup>, Junior Researcher (avmac@mail.ru)

<sup>1</sup> National Research Moscow state university of civil engineering (26, Yaroslavskoe Highway, Moscow, 129337, Russian Federation)

<sup>2</sup> Institute of Organoelement Compounds Russian Academy of Sciences (28, Vavilova Street, Moscow, 119991, Russian Federation)

### The Relaxation Properties of Decking Boards Made from Wood-Polymer Composites (WPC)

Experiments on stress relaxation on the samples representing fragments of terraced boards have been carried out. Matrix polymer is polyvinyl chloride. Measurements conducted at different permanent deformations of compression from 2 to 5% and temperatures from 20 to 70°C. Found that under all conditions the relative relaxation takes small values, indicating the long-term conservation of the mechanical workability of the products. Nonlinear mechanical behavior is evident already at 3% strain. At temperatures from 20 to 35°C relaxation processes take place almost identically, without reduction in initial and final stress. At temperatures of 50 and 70°C both stresses are reduced. The master curve is plotted, which allows prediction the mechanical behavior for a long time.

**Keywords:** wood-polymer composites, terrace boards, stress relaxation, creep, relaxers, memory function, master curve, shift-factor.

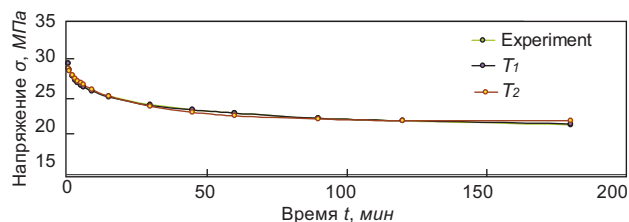
**For citation:** Askadskii A.A., Piminova K.S., Matseevich A.V. The relaxation properties of decking boards made from wood-polymer composites (WPC). *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2018. No. 6, pp. 45–52. (In Russian).

В настоящее время полимерные композиты, наполненные древесиной (так называемые ДПК), используют в том числе для производства террасной доски. Из ДПК изготавливают полы террасных помещений, сайдинг, декоративные ограждения, заборные системы, ступени, универсальные профили, разные аксессуары и комплектующие. Для производства террасной доски отечественная компания Savewood использует в качестве матричного полимера поливинилхлорид (ПВХ).

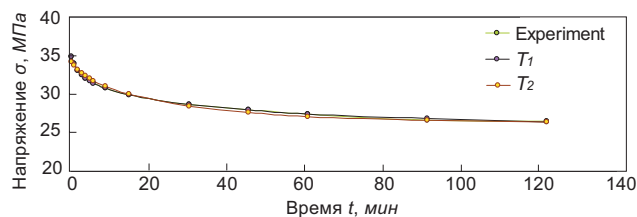
Свойства террасных досок изучены в работах [1, 2]. Что касается вообще изделий из ДПК, то имеются довольно ограниченные сведения по производству этих изделий и зависимостям их физико-химических свойств от состава полимерной матрицы [3–8]. Рассматриваются в основном предельные механические свойства. К ним относятся модуль упругости, предел прочности при сжатии, растяжении и изгибе, удельная ударная вязкость, стойкость к растрескиванию, твердость.

Исследование ДПК на основе ПВХ проведено в ряде работ [7–11]. Способы изготовления ДПК изложены в работах [12–14]. Материалы ДПК широко используются в строительстве [15–16]. Поскольку такие композиты используются в условиях действия влаги, температурных воздействий, УФ-излучения, а также под действием механической нагрузки разных видов, оценка качества продукции и сравнение разных типов террасных досок

должны проводиться с учетом всех перечисленных факторов. Прочностные свойства ДПК описаны, например, в работах [17–19].



**Рис. 1.** Аппроксимация кривой релаксации напряжения при деформации  $\epsilon_0 = 2\%$ .



**Рис. 2.** Аппроксимация кривой релаксации напряжения при деформации  $\epsilon_0 = 3\%$  и температуре 35°C.

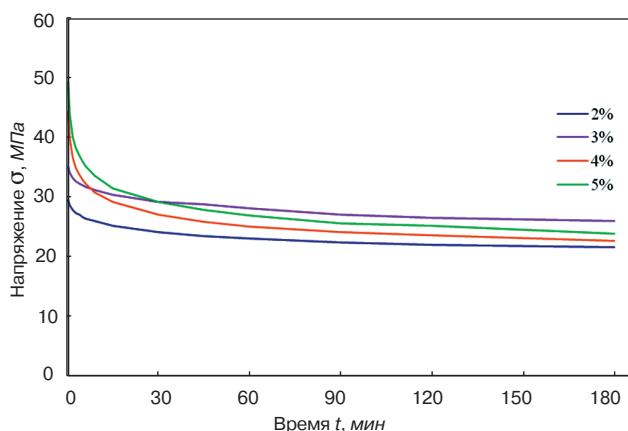


Рис. 3. Кривые релаксации напряжения при 20°C и разных деформациях

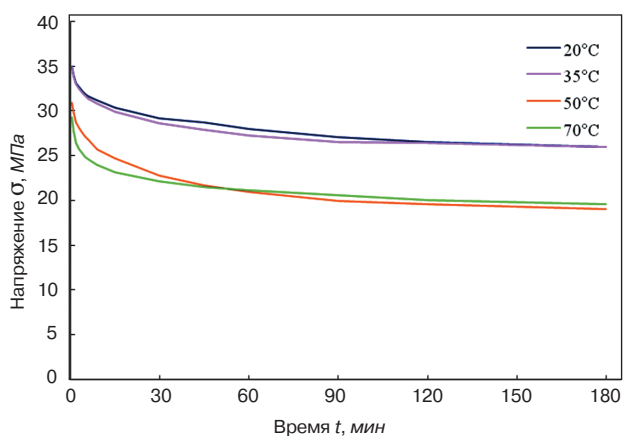


Рис. 5. Кривые релаксации напряжения при разной температуре и деформации 3%

Для полимерных материалов помимо предельных прочностных и деформационных свойств важно иметь представление о релаксации напряжений и ползучести. В случае полимерных материалов при заданной деформации напряжение не остается постоянным, а интенсивно релаксирует. При действии постоянного напряжения развивается ползучесть. Все это справедливо и при переменных напряжениях и деформациях, а также при изменении температуры. Если релаксация напряжения или ползучесть развивается интенсивно, это приводит к потере механической работоспособности изделий за определенный срок, связанный со временем релаксации или временем запаздывания [20–29]. В предельном случае при релаксации напряжение может снизиться до нуля, и тогда материал перестанет выполнять свои функции. При ползучести через определенное время деформация может скачкообразно возрасти, и в результате материал потеряет свою целостность.

Экспериментально кривые релаксации напряжения регистрируют при испытаниях на растяжение или сжатие при постоянной деформации  $\epsilon_0$  образца. В литературе имеется ограниченное количество работ, посвященных релаксации напряжения. Среди них отметим следующие работы [1, 2, 32, 33].

В данной работе проведены эксперименты по измерению кривых релаксации напряжения при сжатии на образцах размеров 4×4×6,5 мм, вырезанных из террасных досок компании Savewood. Измерения проводили на модифицированном приборе для микромеханических испытаний. Скорость задания деформации составляла 0,75 мм/мин. Аппроксимацию кривых релаксации напряжения проводили с помощью специальной написанной ЭВМ-программы. На рис. 1 в качестве примера показан характер аппроксимации кривых ре-

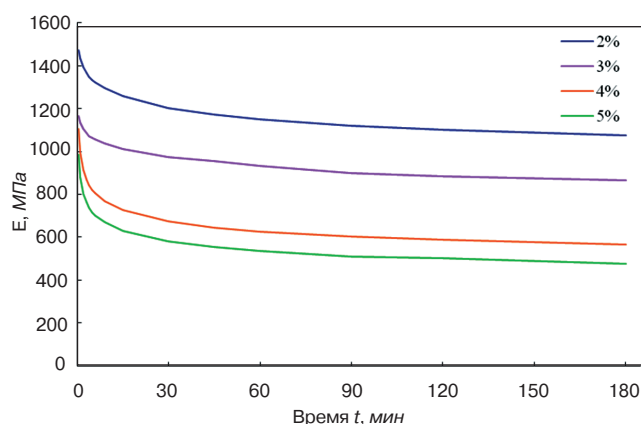


Рис. 4. Кривые релаксации модуля при 20°C и разных деформациях

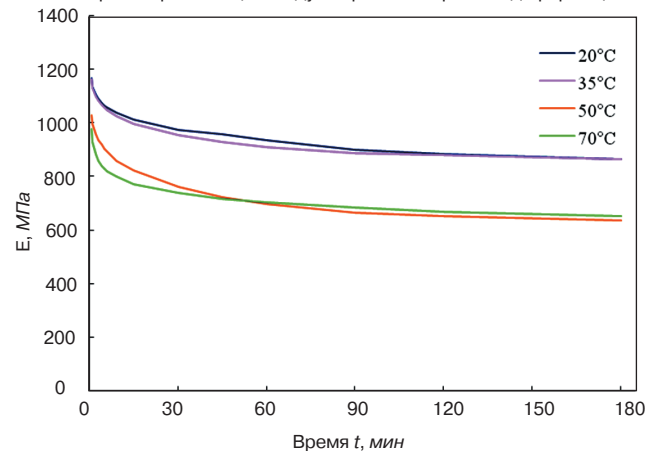


Рис. 6. Кривые релаксационного модуля при деформации 3% и разной температуре

лаксации напряжения при деформации 2% с использованием уравнения Больцмана и ядер релаксации  $T_1(\tau)$  и  $T_2(\tau)$ . Во всех случаях аппроксимация наиболее точно осуществляется при использовании ядра  $T_1(\tau)$ , что отражено как на рис. 1, так и в табл. 1. Коэффициент корреляции при использовании ядра  $T_1(\tau)$  близок к 1 и несколько превышает коэффициент корреляции, который получается при использовании ядра  $T_2(\tau)$ .

То же самое можно заключить при анализе аппроксимации кривых релаксации напряжения при разной температуре (рис. 2, табл. 2).

Для анализа нелинейного механического поведения материалов при разных деформациях построены зависимости релаксирующего напряжения от времени при разных постоянных деформациях (рис. 3), а также зависимости релаксирующего модуля от времени при разных деформациях (рис. 4). На этих рисунках отчетливо видно, что с ростом деформации модуль упругости существенно снижается на всем протяжении релаксационной кривой. Нелинейное поведение начинается уже при деформации 3%, и при деформациях 4 и 5% эта нелинейность усиливается. Напомним, что нелинейность механического поведения заключается в том, что параметры релаксационного процесса не являются постоянными при разных деформациях, а зависят от самого механического напряжения.

Проанализируем влияние температуры. Данные рис. 5 показывают, что кривые релаксации напряжения при постоянной деформации 3% практически не изменяются с ростом температуры от 20 до 35°C. Затем, при увеличении температуры до 50 и 70°C кривые релаксации напряжения смещаются в сторону меньших напряжений, но при этом при температуре 50 и 70°C кривые практически приходят к одному и тому же напряжению



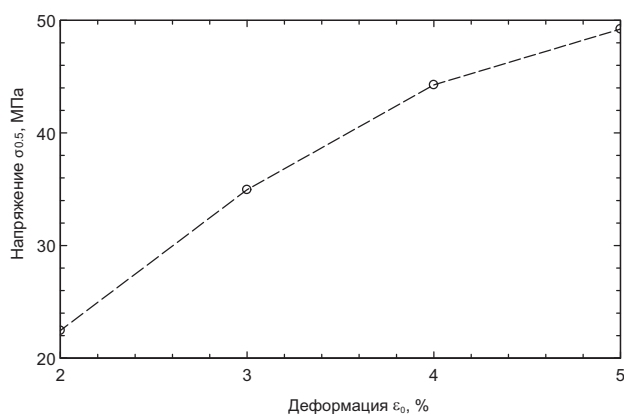


Рис. 7. Зависимость напряжения  $\sigma_{0,5}$  от деформации  $\epsilon_0$

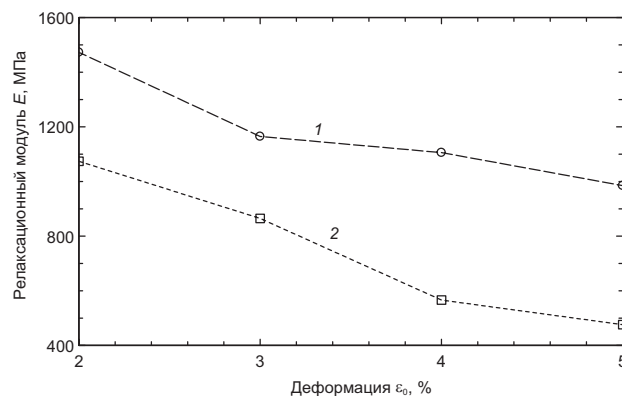


Рис. 8. Зависимость релаксационного модуля  $E$  от деформации  $\epsilon_0$ : 1 -  $E_{0,5}$ , 2 -  $E_{180}$

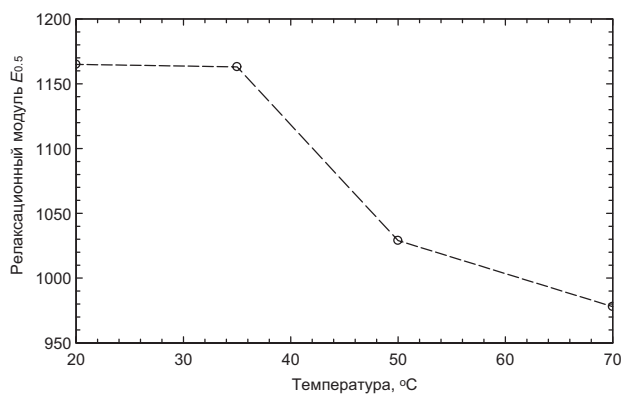


Рис. 9. Зависимость релаксационного модуля  $E_{0,5}$  от температуры  $T$ .

за 180 мин. То же самое наблюдается и при анализе релаксационного модуля (рис. 6).

Для более наглядного представления на рис. 7 показаны зависимости напряжения  $\sigma_{0,5}$ , которое развивается за 0,5 мин, от величины деформации  $\epsilon_0$ , а на рис. 8 – зависимости релаксационных модулей от величины деформации при разной температуре. Релаксационный модуль  $E_{180}$  за 180 мин процесса релаксации сначала уменьшается быстро при переходе от деформации 2% к деформации 4%, а затем – слабо.

На рис. 9 показана зависимость релаксационного модуля  $E_{0,5}$  от температуры. Хорошо видно, что он практически не изменяется при изменении температуры от 20 до 35°C, с повышением температуры до 50°C модуль резко падает, а затем уменьшается слабо. Все это свидетельствует о существенной нелинейности механического поведения.

Кривые релаксации напряжения аппроксимировали с помощью уравнения Больцмана-Вольтерры.

$$\sigma = \sigma_0 \left[ 1 - \int_0^t T(\tau) d\tau \right], \quad (1)$$

где  $\sigma$  – релаксирующее напряжение,  $\sigma_0$  – начальное напряжение, которое развивается в момент окончания «мгновенного» задания деформации,  $T(\tau)$  – ядро релаксации,  $\tau$  – текущее время, которое пробегает значения от 0 до  $t$ ,  $t$  – конечное время.

Для аппроксимации кривых релаксации напряжения использовали ядра релаксации, предложенные в работах [20–29]. Основная идея этого подхода заключается в том, что процесс релаксации напряжения или ползучести происходит в результате взаимодействия и диффузии кинетических единиц – релаксаторов.

Релаксаторами могут быть различные атомные группы, повторяющиеся звенья, более крупные фрагменты макромолекул и их сегменты. К релаксаторам относятся также отдельные элементы свободного (в данном случае – «пустого») объема, т. е. микрополости, концентраторы напряжения и т. д. Эти микрополости могут, взаимодействуя друг с другом, сливаться, перестраиваться и диффундировать в полимерном материале в процессе релаксации или ползучести, образуя такую структуру, которая способствует снижению релаксирующего напряжения. Процесс преобразования исходной микропористой структуры в новую равновесную структуру в ходе релаксации напряжения детально изучен в работах [27, 28] методом аннигиляции позитронов. Такой процесс хорошо фиксируется в рабочей ячейке спектрометра, снабженной устройством для измерения релаксации напряжения.

Согласно работам [20–29], полимерный материал можно рассматривать как состоящий из релаксаторов и нерелаксаторов, причем после «мгновенного» задания деформации или нагрузки подавляющая часть материала состоит из релаксаторов, взаимодействующих между собой с образованием нерелаксирующего материала. Возникновение кинетических элементов двух видов (релаксаторов и нерелаксаторов) и их диффузия в материале приводят к производству энтропии системы, которая возрастает в ходе релаксации напряжения или ползучести.

Производство энтропии (или скорость возникновения энтропии) определяется выражением  $\frac{dS}{dt} \frac{1}{V}$ ,

где  $S$  – энтропия,  $t$  – время,  $V$  – объем системы. Ядра релаксации получены [20–29] при допущении, что движущей силой процесса является производство энтропии системы (образца), которая возрастает в процессе релаксации напряжения или ползучести до максимального значения. Рассматривая энтропию смешения двух типов кинетических единиц – релаксаторов и нерелаксаторов, получаем

$$S = k_B \ln \frac{m^*!}{(\alpha m^*)! [(1-\alpha)m^*]!}, \quad (2)$$

где  $k_B$  – константа Больцмана,  $m^*$  – общее число релаксаторов и нерелаксаторов в единице объема,  $\alpha$  – доля релаксаторов от общего числа кинетических единиц.

Из выражения (2) следует

$$S = -k_B m^* [\alpha \ln \alpha + (1-\alpha) \ln (1-\alpha)]. \quad (3)$$

Величина  $\alpha$  меняется со временем  $t$  от 1 до 0,5, так как при  $\alpha = 0,5$  энтропия смешения принимает максимальное значение.

Согласно работе [22], ядро релаксации связано с энтропией обратной зависимостью

$$T(\tau) = S_0 \left( \frac{1}{S} - \frac{1}{S_{\max}} \right) \int_0^{\infty} T^*(\tau) d\tau, \quad (4)$$

где  $T^*(t)$  – переменная часть ядра.

Подставляя в формулу (4) выражение (3), получаем

$$T(\tau) = -\frac{S_0}{k_B m} \left[ \frac{1}{\alpha \ln \alpha + (1-\alpha) \ln(1-\alpha)} - \frac{1}{\ln 0,5} \right], \quad (5)$$

где  $m = m^* \int_0^{\infty} T^*(\tau) d\tau$ .

Как было отмечено выше, изменение  $\alpha$  со временем  $t$  может быть обусловлено двумя причинами: взаимодействием релаксаторов с переходом их в нерелаксаторы и диффузией кинетических единиц. Кратко рассмотрим эти причины и возникающие из них следствия.

Поскольку процесс взаимодействия релаксаторов является сложным, его естественно описывать уравнением реакции  $n$ -го порядка. Если при обычной химической реакции третий порядок наблюдается редко (так как это требует активного соударения сразу трех молекул), то в данном случае релаксаторы «конденсированы» в образце, и элементарный акт их физического взаимодействия может включать сразу несколько релаксаторов (например, слияние нескольких микрополостей в одну). При этом порядок реакции может быть и дробным. Для такого случая действительно кинетическое уравнение

$$\frac{dc}{d\tau} = kc^n, \quad (6)$$

где  $k$  – константа скорости реакции,  $c$  – концентрация,  $n$  – порядок реакции.

Интегрируя (6) от  $\tau = 0$  до  $\tau$ , получаем

$$c = \frac{c_0}{\left[ 1 + c_0^{n-1} (n-1) k \tau \right]^{\frac{1}{n-1}}}. \quad (7)$$

Здесь  $c_0$  – начальная концентрация релаксаторов любого типа (для простоты принято, что эти концентрации равны для разных типов релаксаторов). Тогда

$$\alpha = \frac{c}{c_0} = \frac{1}{\left( 1 + k^* \tau / \beta \right)^\beta}, \quad (8)$$

где  $k^* = kc_0^{n-1}$ ,  $\beta = \frac{1}{n-1}$ ,  $n$  – порядок реакции.

Подставляя выражение (8) в уравнение (5), получаем

$$T_1(\tau) = -\frac{S_0}{k_B m_1} \cdot \left( \frac{1}{\left[ \alpha - \alpha_0 \right] \ln \left[ \alpha - \alpha_0 \right]} + \frac{1}{\left[ 1 - \alpha + \alpha_0 \right] \ln \left[ 1 - \alpha + \alpha_0 \right]} \right) - \frac{1}{\ln 0,5}, \quad (9)$$

где  $\alpha_0 = 10^{-10}$ .

Рассмотрим диффузионный механизм релаксации. Процесс диффузии проанализирован в работе [31] путем анализа случайного блуждания диффундирующих единиц на решетке. Оказалось, что доля мест, занимае-

мых ими на решетке к моменту времени  $\tau$ , следовательно и доля нерелаксаторов  $(1-\alpha)$  определяется соотношением [31]

$$(1-\alpha) = a\tau^{b/2}, \quad (10)$$

где  $0 < b < 1$ ,  $a$  – константа.

При  $b = 1$  соотношение (10) соответствует фиковской диффузии

$$1-\alpha = \frac{4}{l} \left( \frac{D\tau}{\pi} \right)^{1/2}. \quad (11)$$

Здесь  $l$  – размер образца,  $D$  – коэффициент диффузии.

Подставляя соотношение (10) в уравнение (5), получаем

$$T_2(\tau) = -\frac{S_0}{k_B m_2} \left[ \frac{1}{a\tau^\gamma \ln a\tau^\gamma + (1-a\tau^\gamma) \ln(1-a\tau^\gamma)} - \frac{1}{\ln 0,5} \right], \quad (12)$$

где  $\gamma = a/2$ .

Функция  $T_2(t)$  имеет физический смысл только при условии, что  $a\tau^\gamma \leq 0,5$ . Ядро (12) содержит три параметра:

$$A = \frac{S_0}{k_B m}, \quad a \text{ и } \gamma. \text{ Оно представляет собой функцию со}$$

слабой особенностью при  $\tau = 0$ .

Ядра (9) и (12) позволяют описывать процессы релаксации напряжения и ползучести с большой точностью, а также оценивать физические параметры материала – величину  $A = m^*/S_0$ , пропорциональную количеству неоднородностей в материале,  $k^*$ ,  $n$ ,  $\gamma$ ,  $a$ ,  $\sigma_0$  ( $E_0$ ),  $\sigma_\infty$  ( $E_\infty$ ), где  $E_0$  – мгновенный модуль упругости  $E_0 = \sigma_0/\epsilon_0$ ,  $\sigma_\infty$  – равновесное напряжение, устанавливающееся при  $t \rightarrow \infty$ ;  $E_\infty$  – равновесный модуль упругости;  $\epsilon_0$  – упругая деформация, развивающаяся при «мгновенном» нагружении.

Ядра (9) и (12) хорошо описывают релаксационные процессы в линейной области механического поведения, когда параметры материала не зависят от напряжения или деформации. Однако очень часто полимеры проявляют нелинейное механическое поведение, и в этом случае параметры ядер релаксации зависят от напряжения или деформации.

Будем пользоваться ядром  $T_1(\tau)$ , переходя к описанию процедуры аппроксимации релаксационных зависимостей в нелинейной области механического поведения. Идеология такой аппроксимации состоит в следующем. Запишем выражение для температурной зависимости константы скорости

$$k^* = k_0^* \exp(-\Delta U / RT), \quad (13)$$

где  $k_0^*$  – предэкспоненциальный множитель;  $\Delta U$  – энергия активации процесса взаимодействия релаксаторов,  $R$  – универсальная газовая постоянная,  $T$  – абсолютная температура.

Известно, что в ходе деформирования полимеров их свободный объем увеличивается (под свободным объемом в данном случае подразумевается пустой объем (empty volume), представляющий разность между истинным объемом полимерного тела и ван-дер-ваальсовым объемом атомов, которые они занимают в твердом теле). При сильном деформировании твердых (стеклообразных и кристаллических) полимеров свободный объем возрастает до достаточно большой величины, что существенно облегчает перескок кинетических единиц из одного положения в другое. Это и приводит к вынужденной эластичности, т. е. к вынужденному размягчению материала. Поэтому если

Таблица 1

## Результаты аппроксимации кривых релаксации напряжения при 20°C и разных деформациях

T, °C	Ядро $T_1(\tau)$							Экспериментальные значения	
	Деформация, $\varepsilon_0$ , %	$k$ , мин <sup>-1</sup>	$r$	$A$ , Дж·моль/м <sup>3</sup>	$n$	$\sigma_0$ , МПа	$\sigma_\infty$ , МПа	$\sigma_{0,5}$ , МПа	$\sigma_{180}$ , МПа
20	2	0,01	0,999	$2,36 \cdot 10^6$	6	38,4	21,1	29,46	22,03
	3	0,01	0,99	$1,96 \cdot 10^6$	3,5	44,1	14,9	34,96	25,94
	4	0,01	0,984	$1,28 \cdot 10^6$	2,67	72,96	23,87	44,27	22,64
	5	0,01	0,982	$1,25 \cdot 10^6$	3	81,15	25,17	49,23	23,81
T, °C	Ядро $T_2(\tau)$							Экспериментальные значения	
	Деформация, $\varepsilon_0$ , %	$\gamma$	$r$	$A$ , Дж·моль/м <sup>3</sup>	$a$	$\sigma_0$ , МПа	$\sigma_\infty$ , МПа	$\sigma_{0,5}$ , МПа	$\sigma_{180}$ , МПа
20	2	0,5	0,985	$3,57 \cdot 10^6$	0,0403	29,66	22,03	29,46	22,03
	3	0,5	0,96	$3,51 \cdot 10^6$	0,0306	34,66	25,96	34,96	25,94
	4	0,5	0,943	$2,71 \cdot 10^6$	0,05	42,77	23,54	44,27	22,64
	5	0,5	0,94	$1,61 \cdot 10^6$	0,05	47,38	25,03	49,23	23,81

Таблица 2

## Результаты аппроксимации кривых релаксации напряжения при деформации 3 % и разной температуре

Ядро $T_1(\tau)$							Экспериментальные значения	
Температура, °C	$k$ , мин <sup>-1</sup>	$r$	$A$ , Дж·моль/м <sup>3</sup>	$n$	$\sigma_0$ , МПа	$\sigma_\infty$ , МПа	$\sigma_{0,5}$ , МПа	$\sigma_{180}$ , МПа
20	0,01	0,99	$1,96 \cdot 10^6$	3,5	44,1	14,9	34,96	25,94
35	0,01	0,999	$2,3 \cdot 10^6$	6	45,17	25,25	34,91	25,98
50	0,01	0,997	$1,74 \cdot 10^6$	6	45,23	18,19	30,88	19,04
70	0,01	0,991	$1,77 \cdot 10^6$	4,33	40,63	19,93	29,27	19,58
Ядро $T_2(\tau)$							Экспериментальные значения	
Температура К	$\gamma$	$r$	$A$ , Дж·моль/м <sup>3</sup>	$a$	$\sigma_0$ , МПа	$\sigma_\infty$ , МПа	$\sigma_{0,5}$ , МПа	$\sigma_{180}$ , МПа
20	0,5	0,96	$3,51 \cdot 10^6$	0,0306	34,66	25,96	34,96	25,94
35	0,5	0,989	$3,5 \cdot 10^6$	0,0403	35,13	26,31	34,91	25,98
50	0,5	0,994	$2,39 \cdot 10^6$	0,0403	31,62	19,61	30,88	19,04
70	0,5	0,962	$2,61 \cdot 10^6$	0,05	29,25	20,36	29,27	19,58

предположить, что энергия активации взаимодействия релаксаторов снижается с ростом механического напряжения, то при достаточно высоком его значении это может повлечь возникновение избыточного свободного объема. Таким образом, запишем

$$k^* = k_0^* \exp\left(-\frac{\Delta U_0 - \delta \sigma_r}{RT}\right) = k_0^* \exp\left(-\frac{\Delta U_0 - \delta E_r \varepsilon_0}{RT}\right), \quad (14)$$

где  $E_r$  – релаксирующий модуль;  $\Delta U_0$  – начальная энергия взаимодействия релаксаторов;  $\sigma_r$  – релаксирующее напряжение;  $\varepsilon_0$  – постоянная деформация,  $\delta$  – флуктуационный объем, в котором происходит элементарный акт взаимодействия релаксаторов.

При этом в линейной области механического поведения, когда напряжение еще не столь велико для образования избыточного свободного объема, можно принять, что величина  $\delta=0$ , т. е. константа скорости  $k^* = k_0^* \exp(-\Delta U_0 / RT)$  не зависит от механического напряжения. С ростом задаваемой деформации, которая в процессе релаксации напряжения поддерживается постоянной, наступает момент, когда появляется большой избыточный свободный объем, что существенно облег-

чает взаимодействие релаксаторов и приводит к ускорению релаксационного процесса. Это и есть с рассматриваемых позиций переход к нелинейному поведению. В этом случае величина  $k^*$  не является константой, а становится зависимой от релаксирующего модуля согласно выражению (14). Учет этого позволяет провести аппроксимацию кривых релаксации напряжения в нелинейной области и одновременно определить избыточный флуктуационный объем  $\delta$ , в котором происходит элементарный акт взаимодействия релаксаторов.

Проанализируем результаты аппроксимации кривых релаксации напряжения. Физические параметры, полученные в результате аппроксимации, внесены в табл. 1 и 2.

Проанализируем параметры релаксационных процессов, полученных с использованием ядра  $T_1(\tau)$ . Данные табл. 1 показывают, что константа скорости взаимодействия релаксаторов  $k$  для каждой деформации составляет 0,01 мин<sup>-1</sup>. Величина  $A$ , которая характеризует количество неоднородностей в материале, уменьшается с ростом деформации вплоть до 4%, а затем остается практически одинаковой. Порядок реакции  $n$  уменьшается с ростом деформации.

Результаты аппроксимации кривых релаксации напряжения при деформации 3 % и разной температуре

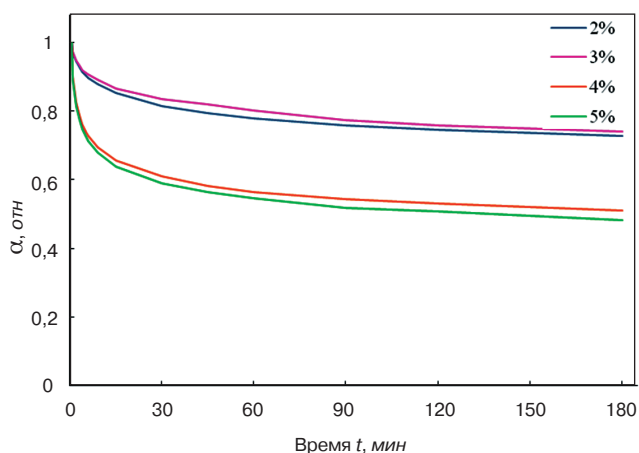


Рис. 10. Зависимость относительного спада напряжения от времени при разных деформациях

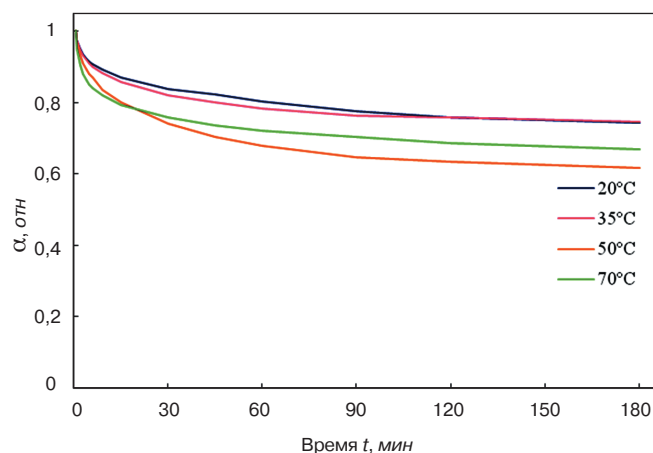


Рис. 11. Зависимости относительного спада напряжения от времени при разной температуре

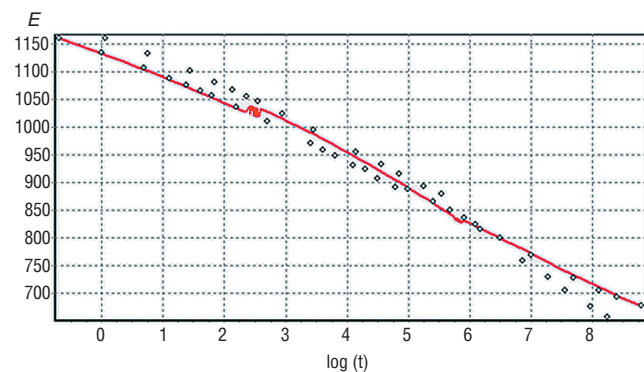


Рис. 12. Обобщенная кривая для исследованного образца

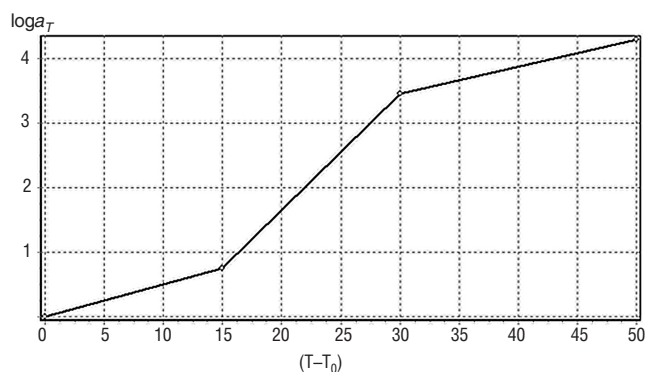


Рис. 13. Температурная зависимость фактора сдвига  $\log a_T$ .

Проанализируем влияние температуры. Константа скорости взаимодействия релаксаторов  $k$  составляет  $0,01 \text{ мин}^{-1}$ , а величина  $A$  с ростом температуры от 20 до 35°C несколько возрастает, а затем существенно снижается и принимает примерно постоянное значение. Порядок реакции  $n$  увеличивается с повышением температуры, т. е. количество активных соударений релаксаторов в единичном акте взаимодействия релаксаторов возрастает.

В заключение рассмотрим величины относительного спада напряжения в результате релаксации. Естественно, что чем меньше спад напряжения, тем материал успешнее сохраняет упругие свойства.

Графики на рис. 10 демонстрируют относительный спад напряжения в ходе релаксации в зависимости от величины деформации. При деформации 2 и 3% относительный спад практически постоянен, но при деформации 4 и 5% он существенно увеличивается. При этом для 4 и 5% относительный спад очень близок. Это свидетельствует о том, что при повышении деформации до 4% наступает релаксационный переход, который резко уменьшает время релаксации и увеличивает спад напряжения. Такое снижение времени релаксации как раз и характерно для нелинейного механического поведения. Проведенный нами анализ по специальной ЭВМ-программе показал, что начальная энергия активации процесса релаксации существенно снижается при росте деформации, а величина флуктуационного объема  $\delta$  составляет  $5,16 \text{ \AA}^3$ . При сравнении кривых с деформациями 2 и 4% величина флуктуационного объема резко уменьшается до  $0,21 \text{ \AA}^3$  и остается практически постоянной при сравнении кривой при деформации 2 и 5% ( $\delta = 0,2 \text{ \AA}^3$ ).

Относительное изменение напряжения при разной температуре свидетельствует о том, что при 20 и 35°C это изменение практически одинаково (рис. 11). При более высокой температуре (50 и 70°C) относительные напряжения снижаются на большую величину, но при этом доля относительного напряжения не падает меньше 0,6. Таким образом, исследованные материалы сохраняют высокую долю упругости.

По результатам измерения релаксации напряжения при разной температуре с помощью специальной ЭВМ-программы построена обобщенная релаксационная кривая для исследованного образца (рис. 12).

Кривая показывает, что со временем релаксирующее напряжение сначала снижается с относительно небольшой скоростью, а затем при больших временах скорость существенно увеличивается. Температурная зависимость фактора сдвига  $\log a_T$  показана на рис. 13. Она не подчиняется уравнению ВЛФ, а также другим выражениям, описанным в монографиях [27, 28]. Все это является следствием неравномерного изменения кривых релаксации напряжения с ростом температуры.

### Выводы

Исследования релаксационных свойств террасной доски, производимой компанией Savewood, показало, что данные изделия обладают значительным и длительным сопротивлением механическим нагрузкам. Такие изделия обладают длительным ресурсом работы в широком интервале температуры, деформаций и напряжений.

## Список литературы

1. Мороз П.А., Аскадский Ал.А., Матсеевич Т.А., Соловьева Е.В., Аскадский Ан.А. Применение вторичных полимеров для производства древесно-полимерных композитов // *Пластические массы*. 2017. № 9-10. С. 56–61.
2. Матсеевич Т.А., Аскадский А.А. Механические свойства террасной доски на основе полиэтилена, полипропилена и поливинилхлорида // *Строительство: наука и образование*. 2017. Т. 7. Вып. 3 (24). С. 48–59.
3. Абушенко А.В., Воскобойников И.В., Кондратюк В.А. Производство изделий из ДПК // *Деловой журнал по деревообработке*. 2008. № 4. С. 88–94.
4. Ершова О.В., Чупрова Л.В., Муллина Э.Р., Мишурина О.А. Исследование зависимости свойств древеснополимерных композитов от химического состава матрицы // *Современные проблемы науки и образования*. 2014. № 2. С. 26. <https://www.science-education.ru/ru/article/view?id=12363>. (Дата обращения 17.04.2018).
5. Клесов А.А. Древесно-полимерные композиты / пер. с англ. А. Чмеля. СПб: Научные основы и технологии, 2010. 736 с.
6. Walcott M.P., Englund K.A. A technology review of wood-plastic composites; 3ed. New York: Reihold Publ. Corp., 1999. 151 p.
7. Руководство по разработке композиций на основе ПВХ / под ред. Р.Ф. Гроссмана; пер. с англ. под ред. В.В. Гузеева. СПб: Научные основы и технологии, 2009. 608 с.
8. Kickelbick G. Introduction to hybrid materials. In Book: *Hybrid Materials: Synthesis, Characterization, and Applications* Weinheim. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2007. 498 p.
9. Уилки Ч., Саммерс Дж., Даниелс Ч. Поливинилхлорид / пер. с англ. под ред. Г.Е. Заикова. СПб: Профессия, 2007. 728 с.
10. Kokta B.V., Maldas D., Daneault C., Bland P. Composites of polyvinyl chloride-wood fibers // *Polymer-plastics Technology Engineering*. 1990. Vol. 29, pp. 87–118.
11. Низамов Р.К. Поливинилхлоридные композиции строительного назначения с полифункциональными наполнителями. Дисс. ... докт. техн. наук. Казань. 2007. 369 с.
12. Stavrov V.P., Spiglazov A.V., Sviridenok A.I. Rheological parameters of molding thermoplastic composites high-filled with wood particles // *International Journal of Applied Mechanics and Engineering*. 2007. Vol. 12. No. 2, pp. 527–536.
13. Бурнашев А.И. Высоконаполненные поливинилхлоридные строительные материалы на основе наномодифицированной древесной муки. Дисс. ... канд. техн. наук. Казань. 2011. 159 с.
14. Figovsky O., Borisov Yu., Beilin D. Nanostructured binder for acid-resisting building materials // *Scientific Israel – Technological Advantages*. 2012. Vol. 14. No. 1, pp. 7–12.
15. Hwang S.-W., Jung H.-H., Hyun S.-H., Ahn Y.-S. Effective preparation of crack-free silica aerogels via ambient drying // *Journal of Sol-Gel Science and Technology*. 2007. Vol. 41, pp. 139–146.
16. Помогайло А.Д. Synthesis and intercalation chemistry of hybrid organo-inorganic nanocomposites // *Высокомолекулярные соединения*. 2006. Т. 48. № 7. С. 1317–1351.
17. Фиговский О.Л., Бейлин Д.А., Пономарев А.Н. Успехи применения нанотехнологий в строительных материалах // *Нанотехнологии в строительстве*. 2012. № 3. С. 6–21.

## References

1. Moroz P.A., Askadskiy Al.A., Matseevich T.A., Solov'eva E.V., Askadskii A.A. Use of secondary polymers for production of wood and polymeric composites. *Plasticheskie massy*. 2017. No. 9–10, pp. 56–61. (In Russian).
2. Matseevich T.A., Askadskii A.A. Mechanical properties of a terrace board on the basis of polyethylene, polypropylene and polyvinylchloride. *Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie*. 2017. Vol. 7. No. 3(24), pp. 48–59. (In Russian).
3. Abushenko A.V., Voskoboynikov I.V., Kondratyuk V.A. Production of products from WPC. *Delovoy zhurnal po derevoobrabotke*. 2008. No. 4, pp. 88–94. (In Russian).
4. Ershova O.V., Chuprova L.V., Mullina Eh.R., Mishurina O.A. Research of dependence of properties the drevesnopolimernykh of composites from the chemical composition of a matrix. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya*. 2014. No 2, pp. 26. <https://www.science-education.ru/ru/article/view?id=12363>. (Date of access 17.04.18). (In Russian).
5. Klesov A.A. Drevesno-polimernye kompozity [Wood and polymeric composites]. Saint Petersburg: Nauchnye osnovy i tekhnologii. 2010. 736 p.
6. Walcott M.P., Englund K.A. A technology review of wood-plastic composites; 3ed. N.Y.: Reihold Publ. Corp., 1999. 151 p.
7. Rukovodstvo po razrabotke kompozitsij na osnove PVKH [The guide to development of compositions on the basis of PVC]. Ed. by R.F. Grossman. Saint Petersburg: Nauchnye osnovy i tekhnologii. 2009. 608 p.
8. Kickelbick G. Introduction to hybrid materials. In book: *Hybrid Materials: Synthesis, Characterization, and Applications*. Weinheim. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. 2007. 498 p.
9. Uilki CH., Sammers Dz., Daniels CH. Polivinilklorid [The polyvinylchloride]. Ed. By G.E. Zaikov. Saint Petersburg: Professiya. 2007. 728 p.
10. Kokta B.V., Maldas D., Daneault C., Bland P. Composites of polyvinyl chloride-wood fibers. *Polymer-plastics Technology Engineering*. 1990. Vol. 29, pp. 87–118.
11. Nizamov R.K. Polyvinylchloride compositions of construction appointment with multifunctional fillers. Doc. Diss. (Engineering). Kazan. 2007. 369 p. (In Russian).
12. Stavrov V.P., Spiglazov A.V., Sviridenok A.I. Rheological parameters of molding thermoplastic composites high-filled with wood particles. *International Journal of Applied Mechanics and Engineering*. 2007. Vol. 12. No. 2, pp. 527–536.
13. Burnashev A.I. The high-filled polyvinylchloride construction materials on the basis of the nano-modified wood flour. Cand. Diss. (Engineering). Kazan. 2011. 159 p. (In Russian).
14. Figovsky O., Borisov Yu., Beilin D. Nanostructured binder for acid-resisting building materials. *Scientific Israel – Technological Advantages*. 2012. Vol. 14. No. 1, pp. 7–12.
15. Hwang S.-W., Jung H.-H., Hyun S.-H., Ahn Y.-S. Effective preparation of crack-free silica aerogels via ambient drying. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*. 2007. Vol. 41, pp. 139–146.
16. Pomogaylo A.D. Synthesis and intercalation chemistry of hybrid organo-inorganic nanocomposites. *Vysokomolekulyarnye soedineniya*. 2006. Vol. 48. No. 7, pp. 1317–1351. (In Russian).
17. Figovsky O.L., Beylin D.A., Ponomarev A.N. Progress of application of nanotechnologies in construction materials. *Nanotekhnologii v stroitel'stve*. 2012. No. 3, pp. 6–21. (In Russian).
18. Korolev E.V. The principle of realization of nanotechnology in construction materials science. *Stroitel'nye*

18. Королев Е.В. Принцип реализации нанотехнологии в строительном материаловедении // *Строительные материалы*. 2013. № 6. С. 60–64.
19. Абушенко А.В. Древесно-полимерные композиты: слияние двух отраслей // *Мебельщик*. 2005. № 3. С. 32–36.
20. Абушенко А.В. Экструзия древесно-полимерных композитов // *Мебельщик*. 2005. № 2. С. 20–25.
21. Шкуро А.Е., Глухих В.В., Мухин Н.М. и др. Влияние содержания сэвилена в полимерной матрице на свойства древесно-полимерных композитов // *Вестник Казанского технологического университета*. 2012. № 17. Т. 15. С. 92–95.
22. Аскадский А.А. Новые возможные типы ядер релаксации // *Механика композитных материалов*. 1987. № 3. С. 403–409.
23. Askadskii A.A. Computational Materials Science of Polymers. Cambridge International Science Publishing. Cambridge. 2003. 695 p.
24. Аскадский А.А., Кондращенко В.И. Компьютерное материаловедение полимеров. Том 1. Атомно-молекулярный уровень. М.: Научный Мир. 1999. 534 с.
25. Аскадский А.А. Лекции по физико-химии полимеров. М.: Физический факультет МГУ. 2001. 220 с.
26. Askadskii A.A. Lecture on the Physico-Chemistry of Polymers. New York: Nova Science Publishers, Inc. 2003. 218 p.
27. Аскадский А.А., Хохлов А.Р. Введение в физико-химию полимеров. М.: Научный Мир. 2009. 380 с.
28. Аскадский А.А., Попова М.Н., Кондращенко В.И. Физико-химия полимерных материалов и методы их исследования. М.: АСВ. 2015. 408 с.
29. Аскадский А.А., Тишин С.А., Казанцева В.В., Коврига О.В. О механизме деформации термостойких ароматических полимеров на примере полиимидов // *Высокомолекулярные соединения*. 1990. Сер. А. Т. 32. № 12. С. 2437–2445.
30. Аскадский А.А., Тишин С.А., Цапонецкий М.И., Казанцева В.В., Коврига О.В., Тишин В.А. Комплексный анализ механизма деформационных и релаксационных процессов в полиимиде // *Высокомолекулярные соединения*. 1992. Сер. А. Т. 34. № 1. С. 62–72.
31. Gaylord R.J., Joss B., Bendler J.T., Di Marzio E.A. The Continuous-Time Random Walk Description of the Non-equilibrium Mechanical Response of Crosslinked Elastomers. *British Polymer Journal*. 1985. Vol. 17. No. 2, pp. 126–128.
32. Международная научно-техническая конференция полимерные композиты и трибология (ПОЛИКОМТРИБ-2017). Гомель, Беларусь 27–30 июня 2017 г. Тезисы докладов ГОМЕЛЬ 2017.
33. Матеевич Т.А., Аскадский А.А. Террасные доски: состав, изготовление, свойства. Часть 1. Механические свойства // *Строительные материалы*. 2017. № 1–2. С. 101–105.
- Materialy* [Construction Materials]. 2013. No. 6, pp. 60–64. (In Russian).
19. Abushenko A.V. Wood and polymeric composites: merge of two branches. *Mebel'shnik*. 2005. No. 3, pp. 32–36. (In Russian).
20. Abushenko A.V. Extrusion of wood and polymeric composites. *Mebel'shnik*. 2005. No. 2, pp. 20–25. (In Russian).
21. Shkuro A.E., Glukhikh V.V., Mukhin N.M., etc. Influence of maintenance of a sevilen in a polymeric matrix on properties of wood and polymeric composites. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*. 2012. No. 17. Vol. 15, pp. 92–95. (In Russian).
22. Askadskii A.A. New possible types of kernels of a relaxation. *Mekhanika kompozitnih materialov*. 1987. No. 3, pp. 403–409. (In Russian).
23. Askadskiy A.A. Computational Materials Science of Polymers. Cambridge International Science Publishing. Cambridge. 2003. 695 p.
24. Askadskii A.A., Kondrashchenko V.I. Komp'yuternoe materialovedenie polimerov. Tom 1. Atomno-molekulyarnyj uroven' [Computer materials science of polymers. Volume 1. Atomic and molecular level]. Moscow: Nauchnoe slovo. 1999. 534 p.
25. Askadskii A.A. Lektsii po fiziko-khimii polimerov [Lectures on fiziko-chemistry of polymers]. Moscow: Physical faculty of MSU. 2001. 220 p.
26. Askadskii A.A. Lecture on the physico-chemistry of polymers. New York: Nova Science Publishers, Inc. 2003. 218 p.
27. Askadskii A.A., Khokhlov A.R. Vvedenie v fiziko-khimiyu polimerov [Introduction to fiziko-chemistry of polymers]. Moscow: Nauchnoe slovo. 2009. 380 p.
28. Askadskii A.A., Popova M.N., Kondrashchenko V.I. Fiziko-khimiya polimernykh materialov i metody ikh issledovaniya [Fiziko-himiya of polymeric materials and methods of their research]. Moscow: ASV. 2015. 408 p.
29. Askadskii A.A., Tishin S.A., Kazantseva V.V., Kovriga O.V. Loaf the mechanism of deformation of heat resistant aromatic polymers on the example of a polyimide. *Vysokomolekulyarnie Soedineniya*. 1990. Ser. A. Vol. 32. No. 12, pp. 2437–2445. (In Russian).
30. Askadskii A.A., Tishin S.A., Tsapovetsky M.I., Kazantseva V.V., Kovriga O.V., Tishin V.A. The complex analysis of the mechanism of deformation and relaxation processes in a polyimide. *Vysokomolekulyarnie Soedineniya*. 1992. Ser. A. Vol. 34. No. 1, pp 62–72. (In Russian).
31. Gaylord R.J., Joss B., Bendler J.T., Di Marzio E.A. The Continuous-time random walk description of the non-equilibrium mechanical response of crosslinked elastomers. *British Polymer Journal*. 1985. Vol. 17. No. 2, pp. 126–128.
32. International scientific and technical conference polymeric composites and tribology (POLIKOMTRIB-2017) Gomel Belarus on June 27–30, 2017. Theses of reports GOMEL 2017.
33. Matseevich T.A., Askadskii A.A. Terrace boards: structure, production, properties. Part 1. Mechanical properties. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2017. No. 1–2, pp. 101–105. (In Russian).

**СПЕЦИАЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА**



**Технология производства стеновых цементно-песчаных изделий**

Балакшин Ю.З., Терехов В.А. М.: ООО РИФ «СТРОЙМАТЕРИАЛЫ». 2012. – 276 с.

В книге описано производство и применение стеновых материалов методом вибропрессования из цементно-песчаных бетонов. Рассмотрена существующая и перспективная номенклатура изделий и их свойства. Описаны сырьевые материалы для производства цементно-песчаных изделий: песок, щебень, вяжущие и химические добавки.

Сформулированы специфические требования к сырьевым материалам, а также рекомендации по подбору состава бетонной смеси. Подробно представлена технология производства цементно-песчаных вибропрессованных стеновых изделий. Особое внимание уделено технологическому контролю на производстве и техническому контролю и обслуживанию оборудования. Чертежи и табличная информация облегчают восприятие материала. Книга предназначена для организации производственно-технического обучения на предприятии, будет полезна инженерно-техническому персоналу и широкому кругу специалистов.

Заказать литературу можно через редакцию, направив заявку по e-mail: [mail@rifsm.ru](mailto:mail@rifsm.ru), или оформить заказ на сайте [www.rifsm.ru](http://www.rifsm.ru)

Ю.Г. БОРИСЕНКО, канд. техн. наук (borisenko2005@yandex.ru),

С.В. РУДАК, инженер, О.А. БОРИСЕНКО, канд. техн. наук

Северо-Кавказский федеральный университет (355009, г. Ставрополь, ул. Пушкина, 1)

## Влияние содержания и зернового состава легких пористых заполнителей на физико-механические свойства битумоминеральных композиций

Показано, что перспективным направлением развития и совершенствования битумоминеральных композиций на основе легких пористых минеральных заполнителей является дифференцированный подбор их зерновых составов. Проведен сравнительный анализ влияния различных фракций и содержания пористого заполнителя на физико-механические свойства горячих мелкозернистых асфальтобетонов и битумоминеральных композиций. Выявлено, что наиболее эффективным легким пористым заполнителем, позволяющим существенно снизить плотность и массу битумоминерального дорожного покрытия, является минеральный заполнитель на основе керамзитового гравия. Разработаны составы битумоминеральных композиций с пониженной плотностью и массой, высокими прочностными показателями, теплостойкостью, термостабильностью и хорошей водостойкостью. Установлено, что наибольшее влияние на физико-механические свойства и структуру указанных композиций оказывают фракции керамзитового гравия с размером зерен 10–5 мм.

**Ключевые слова:** битумоемкость, битумоминеральная композиция, зерновой состав, керамзит, легкий пористый заполнитель.

**Для цитирования:** Борисенко Ю.Г., Рудак С.В., Борисенко О.А. Влияние содержания и зернового состава легких пористых заполнителей на физико-механические свойства битумоминеральных композиций // *Строительные материалы*. 2018. № 6. С. 53–56.

Yu.G. BORISENKO, Candidate of Sciences (Engineering) (borisenko2005@yandex.ru);  
S.V. RUDAK, Engineer, O.A. BORISENKO, Candidate of Sciences (Engineering)  
North-Caucasus Federal University (1, Pushkin Street, 355009, Stavropol, Russian Federation)

### Influence of the Content and Grain Composition of Light Porous Fillers on Physical and Mechanical Properties of Bitumen-Mineral Compositions

It is shown that the perspective development direction and improvement of bitumen-mineral compositions on the basis of light porous mineral fillers is the differentiated selection of their grain structures. The influence of various fractions and content of porous filler on physical and mechanical properties of hot fine-grained asphalt concrete and the bitumen-mineral compositions has been analyzed comparatively. It is revealed that the most effective light porous filler for significant decrease of density and weight of the bitumen-mineral road paving is a mineral filler on the basis of expanded clay gravel. Structures of bitumen-mineral compositions with reduced density and weight, high strength rates, heat resistance, heat stability and good water resistance are developed. It is established that the greatest influence on physical and mechanical properties and structure of the offered bitumen-mineral compositions have fractions of expanded clay gravel with grains of 10–5 mm size.

**Keywords:** bitumen content, bitumen-mineral composition, grain composition, expanded clay, light porous filler.

**For citation:** Borisenko Yu.G., Rudak S.V., Borisenko O.A. Influence of the content and grain composition of light porous fillers on physical and mechanical properties of bitumen-mineral compositions. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials], 2018. No. 6, pp. 53–56. (In Russian).

Совершенствование материалов покрытий нежестких дорожных одежд — одна из актуальных задач в дорожном строительстве. Перспективным направлением решения этой проблемы является разработка новых легких, высокопрочных и недорогих конструктивных материалов на основе органических вяжущих. Снижение массы и плотности материалов дорожных покрытий позволит снизить расчетные нагрузки на основание и массу всей конструкции дорожного покрытия в целом. Достичь этого возможно за счет применения в их составах природных и искусственных легких пористых заполнителей. Кроме того, наличие легких пористых заполнителей в материале дорожного покрытия позволит обеспечить снижение внутренних температурных напряжений (т. е. повысить термостабильность и трещиностойкость), снизить теплопроводность, повысить деформативность и демпфирующую способность.

Имеющийся опыт применения пористых и легких пористых материалов в битумоминеральных композициях [1–8] выявил следующее: использование вулканических стекол и пемзы, вспученных перлита и вермикулита и других подобных пород в составах битумоминеральных композиций существенно снижает плотность и массу композита, обеспечивает низкую теплопроводность, но наряду с этим снижает прочность, водостой-

кость, водо- и паропроницаемость, значительно повышает битумоемкость. Анализ исследований битумоминеральных композиций на основе керамзита (керамзитового гравия или отсевов его дробления) в битумоминеральных смесях [1, 7 и др.] показал, что применение именно этого легкого пористого минерального заполнителя в битумоминеральных композициях наиболее перспективно и рационально. Благодаря своей структуре керамзит (в сравнении с другими пористыми материалами) в совокупности обладает положительными качествами — малой плотностью и массой, низкой теплопроводностью и высокой механической прочностью. Немаловажно и то, что сырье (легкоплавкие глины), пригодное для производства керамзита, имеет широкое распространение и доступность в различных регионах России, технология его производства хорошо отработана, а стоимость в ряде случаев сопоставима со стоимостью высококачественных плотных минеральных заполнителей. Однако применение керамзита в битумоминеральных смесях сдерживается высокой битумоемкостью. В ряде работ [7–10] приведены пути снижения этого показателя, сущность которых сводится к сокращению открытой пористости заполнителя (керамзитового гравия и керамзитового песка) предварительной обработкой пористого материала остаточными

Таблица 1

№ состава	Фракции керамзита (К*) и щебня (Щ**) в составе смеси, мас. %			Размер зерен, мм, не более									
	20–15	15–10	10–5	20	15	10	5	2,5	1,25	0,63	0,315	0,16	0,071
1	К	Щ	Щ	100	95,5	90,2	58,3	45,6	35	25,5	19,1	13,8	5,3
2	Щ	К	Щ	100	89,7	87,6	56,7	44,3	34	24,7	18,5	13,4	5,2
3	Щ	Щ	К	100	88,3	82,4	64,5	50,5	38,7	28,2	21,1	15,3	5,9
4	К	К	Щ	100	95,3	93,1	60,2	47,1	36,1	26,3	19,7	14,2	5,5
5	Щ	К	К	100	87,8	85,3	66,8	52,3	40,1	29,2	21,9	15,8	6,1
6	К	Щ	К	100	94,6	88,3	69,2	54,1	41,5	30,2	22,7	16,4	6,3
7	К	К	К	100	94,4	91,7	71,8	56,2	43,1	31,4	23,5	17	6,5
8	Щ	Щ	Щ	100	90	85	55	43	33	24	18	13	5

**Примечание:** К\* – керамзитовый гравий, Щ\*\* – гранитный щебень.

Таблица 2

Используемый наполнитель	Фракция наполнителя	Насыпная плотность, кг/м <sup>3</sup>	Прочность при сдавливании в цилиндре, МПа
Гранитный щебень (ГУП СК «Кочубеевский карьер», Ивановское месторождение, Ставропольский край)	20–15	1100	–
	15–10	1200	–
	10–5	1300	–
Керамзитовый гравий (ОАО «Комбинат производственных предприятий», г. Ипатово, Ставропольский край)	20–15	600	100
	15–10	600	100
	10–5	700	100

продуктами нефтепереработки или модификацией битумных вяжущих этими продуктами, что существенно усложняет технологию производства и стоимость конечного продукта. Однако наличие песчаных фракций (5–0,315 мм) отсевов дробления керамзита в предложенных смесях не позволяет существенно снизить битумность композиций в силу не только высокой их открытой пористости, но и высокой удельной поверхности. Еще одним направлением снижения битумности является совершенствование подбора минерального состава смеси. Развитие этого направления имеет наибольшие практические перспективы.

Существенно снизить битумность битумо-минеральных композиций на основе легких пористых наполнителей позволит включение в их составы только крупных фракций керамзитового гравия, соответствующих фракциям щебня (20–15, 15–10 и 10–5 мм), которые обладают пониженными показателями открытой пористости и удельной поверхности, в сравнении с более мелкими фракциями керамзита, соответствующими фракциям песка (менее 5 мм), и тем более с отсевами его дробления. Таким образом, из состава композиций следует исключить керамзитовый песок и отсевы его дробления и применять вместо него, как и в стандартных асфальтобетонах, песок или отсевы дробления плотных горных пород.

Влияние фракционного состава и каждой фракции керамзита на свойства таких битумо-минеральных композиций требует изучения, так как этот вопрос является одним из ключевых и определяющих при разработке и оптимизации минеральных составов смесей.

Авторы исследовали горячие мелкозернистые битумо-минеральные композиции на основе керамзита, так как в настоящее время для дорожных покрытий наиболее широко применяются горячие плотные мелкозернистые асфальтобетоны типов Б и В. Были разработаны составы горячих битумо-минеральных композиций непрерывной гранулометрии типа Б, в которых заменяли крупные фракции плотного наполнителя (20–5 мм) на аналогичные фракции керамзитового гравия (составы № 1–7, табл. 1). В предложенных составах битумо-

Таблица 3

Наименование показателя	Норма по ГОСТ 22245–90 для БНД 60/90	Фактическое значение
Глубина проникновения иглы, 0,1 мм: при 25°C, при 0°C	61–90 не менее 20	65 22
Температура размягчения по КиШ, °C	не ниже 47	50
Растяжимость, см при 25°C, при 0°C	не менее 55 не менее 3,5	> 150 3,8
Температура хрупкости, °C	не выше минус 15	минус 18
Температура вспышки, °C	не ниже 230	270

неральных композиций варьировали содержание крупных фракций легкого пористого наполнителя. Замену фракции плотного наполнителя на пористый осуществляли исходя из равенства объемов долей проектируемых зерновых составов и зернового состава-прототипа на плотном наполнителе. Для этого определяли насыпную плотность каждой фракции щебня и соответствующей фракции керамзитового гравия. Для сравнения была взята стандартная мелкозернистая асфальтобетонная смесь-прототип типа Б (ГОСТ 9128–2013) на плотном минеральном наполнителе (состав № 8, табл. 1). В табл. 1 приведены зерновые составы экспериментальных битумо-минеральных композиций.

В разработанных составах битумо-минеральных смесей использовали: легкий пористый наполнитель – керамзитовый гравий марки 600 фракции 20–5 мм; гранитный щебень и отсевы его дробления фракции 20–0,16 мм; активированный известняковый минеральный порошок МП-1. В качестве вяжущего применяли дорожный нефтяной битум марки БНД 60/90. Свойства керамзитового гравия, щебня и битума представлены в табл. 2 и 3.

Из предложенных битумо-минеральных смесей изготавливали образцы-цилиндры 71,4×71,4 мм и испытывали согласно ГОСТ 12801–98. Для установления



Таблица 4

№ состава	Содержание битума в смеси $C_1$ , мас. %	Содержание битума в смеси $C_{об}$ , об. %	Масса заменяемого щебня, %	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Прочность при сжатии, МПа			Коэффициенты водостойкости		Водонасыщение $W$ , мас. %	Коэффициент термостабильности $k_{тс}$
					$R_0$	$R_{20}$	$R_{50}$	$k_b$	$k_{вд}$		
1	5,5	12,91	10	2,34	9,85	4,60	1,73	0,97	0,76	3,8	0,17
2	5,5	12,76	5	2,38	9,45	4,69	1,68	0,98	0,76	2,5	0,18
3	6	13,81	30	2,1	9,98	5,32	1,92	0,95	0,78	7,2	0,19
4	5,5	13,06	15	2,29	10,07	5,99	2,03	0,91	0,77	3,5	0,2
5	6,5	14,28	35	1,95	9,65	5,31	2,11	0,96	0,77	7,6	0,22
6	6,5	14,68	40	1,94	9,8	5,64	2,17	0,95	0,77	7,3	0,22
7	6,5	14,64	45	1,87	11,3	6,06	2,36	0,95	0,77	8,8	0,17
8	5,5	12,67	–	2,43	11,02	5,2	2,06	0,98	0,78	1,5	0,19
Требования ГОСТ 9128–2009 для асфальтобетона тип Б, I марка; IV, V дорожно-климатические зоны			5–6,5	–	≤13	≥2,5	≥1,3	≥0,85	≥0,75	1,5–4	–

оптимального содержания битума в композициях ориентировались на максимальные прочностные характеристики (прочность при сжатии  $R_0$ ,  $R_{20}$  и  $R_{50}$ ) и приемлемые показатели водостойкости ( $k_b$ ,  $k_{вд}$  и водонасыщения  $W$ ). Физико-механические свойства предложенных составов битумо-минеральных композиций и состава-прототипа на плотном заполнителе с оптимальным содержанием битума представлены в табл. 4.

В результате исследований было установлено, что замена только одной фракции щебня на керамзит в составе композиции практически не влияет на содержание битума в смеси (составы № 1, 2) и лишь в смеси с фракцией керамзита 10–5 (состав № 3) содержание битума выше на 0,5 мас. %, что можно объяснить высоким содержанием данной фракции (17,9 мас. %). С другой стороны, наличие такого количества керамзитового гравия в смеси обеспечило: снижение плотности композиции в сравнении с прототипом (состав № 8) на 13,5%; высокую прочность при сжатии ( $R_{20}$ ) и теплостойкость ( $R_{50}$ ); водостойкость, сравнимую с  $k_b$  и  $k_{вд}$  прототипа. Показатель водонасыщения  $W$  состава № 3 не соответствует требованиям ГОСТ 9128–2013. Однако, как известно, при применении пористых заполнителей в асфальтобетонах и битумо-минеральных композициях повышенное водонасыщение (8–10 мас. %) не следует считать недостатком. Замена крупных фракций щебня на керамзит в составах № 1 и 2 незначительно повлияла на свойства композиций. Несколько снились прочность и теплостойкость; водостойкость практически соответствует водостойкости состава-прототипа; водонасыщение соответствует требованиям ГОСТа; плотность снизилась совсем незначительно – на 2–4 мас. %. Это обусловлено тем, что содержание фракций керамзита 20–15 и 15–10 в этих составах незначительно (4,5 и 2,1 мас. % соответственно).

Более значительное влияние на свойства битумо-минеральных композиций оказывает замена двух и более фракций плотного заполнителя на легкий пористый. Важно, что битумоемкость предложенных композиций не выходит за рамки требований ГОСТ 9128–2013 (5,5–6,5 мас. %). Установлено, что даже при замене трех фракций плотного заполнителя (фракции 20–15, 15–10 и 10–5 мм) на керамзитовый гравий содержание вяжущего в смеси соответствует рекомендованному ГОСТом и составляет 6,5 мас. %. Наиболее существенное снижение плотности композиции на 23 мас. % зафиксировано при замене на керамзит всех трех крупных фракций (28,2 мас. %). Плотность композиции № 7 составила

1,87 против 2,43 кг/м<sup>3</sup> состава-прототипа № 8. Прочность и теплостойкость предложенной композиции значительно выше аналогичных показателей прототипа и других композиций (составы № 1–6). Выявлена также повышенная (на 16%) в сравнении с прототипом термостабильность  $k_{тс}$  составов с более высоким содержанием керамзитового гравия (составы № 5–7), что свидетельствует о повышении тепло- и трещиностойкости материала. Водостойкость этих композиций хоть и несколько ниже прототипа, но полностью удовлетворяют требованиям ГОСТа.

Замена двух крупных фракций в составах № 5 (15–10 и 10–5 мм) и № 6 (20–15 и 10–5 мм) обеспечивает снижение плотности в среднем на 20 %, показатели прочности и теплостойкости выше аналогичных показателей прототипа на плотном заполнителе, показатели водостойкости  $k_b$  и  $k_{вд}$  практически соответствуют водостойкости композиции № 7 с максимальным содержанием керамзита. Достаточно близкие по значениям и сопоставимые показатели физико-механических свойств составов № 5–7 обуславливаются сопоставимым содержанием керамзита в их композициях (21; 24,5 и 28,2 мас. % соответственно).

Анализ результатов проведенных исследований показывает, что определяющее влияние на структуру композита оказывает фракция керамзитового гравия 10–5 мм, содержание которой в смеси наиболее высокое.

Физико-механические показатели состава № 4, в котором наиболее крупные фракции плотного заполнителя 20–15 и 15–10 мм заменены на пористый, показали, что наличие керамзитового гравия положительно влияет на повышение прочности и теплостойкости материала, но оказывает незначительное влияние на снижение его плотности.

#### Выводы

1. Применение легких пористых заполнителей в битумо-минеральных композициях является перспективным направлением в развитии дорожно-строительных материалов, что позволяет снизить плотность и массу дорожного покрытия, а также существенно снизить расчетные нагрузки на основание дорожной конструкции.

Показано, что наиболее эффективным пористым заполнителем для таких композиций является керамзитовый гравий, который в сравнении с другими искусственными и природными пористыми заполнителями (вспученный вермикулит, вспученный перлит, вулканическая пемза и т. д.) обладает преимуществами: ма-

лой плотностью и массой, низкой теплопроводностью и высокой механической прочностью, имеет широкое распространение и доступность сырья в различных регионах России.

2. На основании проведенных экспериментальных исследований доказано, что снижение битумоемкости битумо-минеральных композиций на основе пористых заполнителей возможно за счет регулирования минерального состава смесей, в частности путем замены крупных фракций щебня (20–5 мм) на пористый заполнитель. Предложенные битумо-минеральные композиции на основе легкого пористого заполнителя (керамзитового гравия) характеризуются битумоемкостью, соответствующей нормативным требованиям ГОСТ 9128–2009.

3. Выявлены пути регулирования свойств битумо-минеральных композиций, модифицированных легкими пористыми заполнителями. Наибольшее влияние на физико-механические свойства и структуру оказывает керамзитовый гравий фракций 10–5 мм, что обусловлено высоким содержанием этой фракции в композициях (18–20 мас. %). Установлено, что композиции с повышенным содержанием керамзита обладают высокими прочностными показателями, теплостойкостью, термостабильностью при хорошей водостойкости. Плотность таких битумо-минеральных композиций ниже на 20–23% плотности стандартных прототипов на плотном минеральном заполнителе и составляет 1,87–1,95 кг/м<sup>3</sup>.

**Список литературы**

1. Печеный Б.Г. Битумы и битумные композиции. М.: Химия, 1990. 256 с.
2. Гезенцвей Л.Б., Горельшев Н.В., Богуславский А.М., Королев И.В. Дорожный асфальтобетон. М.: Транспорт, 1985. 350 с.
3. Высоцкая М.А., Кузнецов Д.А., Барабаш Д.Е. Особенности структурообразования битумо-минеральных композиций с применением пористого сырья // *Строительные материалы*. 2014. № 1–2. С. 68–71.
4. Высоцкая М.А., Кузнецов Д.А., Федоров М.Ю. Оценка качества битумо-минеральных композитов с применением пористых наполнителей // *Дороги и мосты*. 2012. № 27/1. С. 241–250.
5. Иноземцев С.С., Королев Е.В. Выбор минерального носителя наноразмерной добавки для асфальтобетона // *Вестник МГСУ*. 2014. № 3. С. 158–167.
6. Борисенко Ю.Г., Казарян С.О., Селимов М.А., Борисенко О.А. Физико-химические основы применения пористых минеральных порошков в битумо-минеральных композициях // *Дороги и мосты*. 2016. № 35/1. С. 263–281.
7. Борисенко Ю.Г., Лынный В.В., Борисенко О.А., Гордиенко Е.В. Пути снижения битумоемкости битумо-минеральных композиций с заполнителем на основе керамзита // *Строительные материалы*. 2013. № 5. С. 24–26.
8. Патент РФ 2603310. *Дорожная одежда* / Борисенко Ю.Г., Казарян С.О. Заявл.25.05.2015. Оpubл. 27.11.2016. Бюл. № 33.
9. Патент РФ 2504612. *Дорожная одежда* / Борисенко Ю.Г., Лынный В.В., Борисенко А.Ю. Заявл. 05.06.2012. Оpubл. 20.01.2014. Бюл. № 2.
10. Патент РФ 2470048. *Битумо-минеральная смесь* / Печеный Б.Г., Галдина В.Д. Заявл. 30.05.2011. Оpubл. 20.12.2012. Бюл. № 35.

**References**

1. Pechenyi B.G. Bitумы i bitumnye kompozitsii [Bitumens and bituminous compositions]. Moscow: Khimiya. 1990. 256 p.

2. Gezentsvei L.B., Gorelyshev N.V., Boguslavskii A.M., Korolev I.V. *Dorozhnyi asfal'tobeton* [Road asphalt concrete]. Moscow: Transport. 1985. 350 p.
3. Vysotskaya M.A., Kuznetsov D.A., Barabash D.E. Peculiarities of structure formation of bitumen-mineral compositions with the use of porous raw materials. *Stroitel'nye Materialy* [Construction materials]. 2014. No. 1–2, pp. 68–71. (In Russian).
4. Vysotskaya M.A., Kuznetsov D.A., Fedorov M.Yu. Quality assessment the of bitumen-polymer compositions with use of porous fillers. *Dorogi i Mosty*. 2012. No. 27/1, pp. 241–250. (In Russian).
5. Inozemtsev S.S., Korolev E.V. The choice of the mineral carrier of nanodimensional additive for asphalt concrete. *Vestnik MGSU*. 2014. No. 3, pp. 158–167. (In Russian).
6. Borisenko Yu.G., Kazaryan S.O., Selimov M.A., Borisenko O.A. Physico-chemical basis for the use of porous mineral powders in bituminous mineral compositions. *Dorogi i Mosty*. 2016. No. 35/1, pp. 263–281. (In Russian).
7. Borisenko Yu.G., Lынный V.V., Borisenko O.A., Gordienko E.V. Ways to reduce bitumen content of bitumen mineral compositions with a filler on the basis of claydite. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2013. No. 5, pp. 24–26. (In Russian).
8. Patent RF 2603310. *Dorozhnaya odezhda* [Road surfacing]. Borisenko Yu.G., Kazaryan S.O. Declared 25.05.2015. Published 27.11.2016. Bulletin No. 33. (In Russian).
9. Patent RF 2504612. *Dorozhnaya odezhda* [Road surfacing]. Borisenko Yu.G., Lынный V.V., Borisenko A.Yu. Declared 05.06.2012. Published 20.01.2014. Bulletin No. 2. (In Russian).
10. Patent RF 2470048. *Bitumomineral'naya smes'* [Bituminous mineral mixture]. Pechenyi B.G., Gal'dina V.D. Declared 30.05.2011. Published 20.02.2012. Bulletin No. 35. (In Russian).

**22–25 января 2019 | Красноярск**



**ПРИГЛАШАЕМ ПРИНЯТЬ УЧАСТИЕ В  
XXVII СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОЙ ВЫСТАВКЕ  
СТРОИТЕЛЬСТВО  
АРХИТЕКТУРА**

**ВЕДУЩАЯ СТРОИТЕЛЬНАЯ И ИНТЕРЬЕРНАЯ ВЫСТАВКА  
СИБИРИ И ДАЛЬНЕГО ВОСТОКА**

**Итоги 2018**  
5 146 посетителей, 3 320 специалистов отрасли,  
1 700 компаний.  
175 экспонентов из России, Китая,  
Южной Кореи, Беларуси.

Совместно с выставкой строительной и складской техники  
**«ТехСтройЭкспо. Дороги»**

Официальная поддержка:



Организатор:



МВДЦ «Сибирь», ул. Авиаторов, 19  
+7 (391) 200-44-00      www.krasfair.ru

# Проект Terex-lime:

## три новые печи для получения жестко-, средне- и мягкообожженной высококачественной извести

для ООО «Центр-известняк» — предприятие ГК «Терех»



Предприятия ГК «TEREX» более 15 лет занимаются добычей и переработкой минерального сырья: известняков и керамических глин. На московском рынке необожженных известняков TEREX является признанным лидером. Более 1200 сотрудников работают для создания и поставки материалов в различные отрасли промышленности. Компания представлена в четырех регионах ЦФО РФ – Московской, Калужской, Смоленской и Тульской областях. Каждый год компания внедряет новые проекты.

В 2012 г. компания приобрела и начала разрабатывать Восточный участок Пореченского месторождения известняков в Тульской области. Запасы превосходного сырья составляют 40 млн м<sup>3</sup>. Этого достаточно для 50 лет бесперебойной работы. Известняки месторождения отличаются высокой химической чистотой ( $\geq 96\% \text{CaCO}_3$ ,  $\leq 1\% \text{MgCO}_3$ ,  $\leq 1\% \text{SiO}_2$ ) и уникальные условия залегания.

Для эффективной переработки и обжига известняка в проекте TEREX-Lime руководством группы компаний было принято решение приобрести самое современное и высокотехнологичное оборудование, что явилось основополагающим фактором при выборе универсальной технологии компании Мерц (Maerz Ofenbau AG).

В конце 2012 г. между компаниями TEREX и Мерц был подписан контракт на поставку трех высокоэффективных одношахтных печей для обжига извести типа H4-1 для получения жестко- и среднеобожженной извести. Каждая печь производительностью 200 т/сут работает на природном газе и позволяет обжигать известняк размером частиц 20–70 мм.

Уже на первом совещании в январе 2013 г. были озвучены четкие временные рамки и сжатые сроки запуска завода, и команда инженеров Мерц сразу же приступила к работе по проектированию электрической и механической частей проекта TEREX-Lime.

Выполнение проекта TEREX-Lime велось по строгому графику, который контролировалось руководством ГК «TEREX» и менеджером проекта компании Мерц.

В августе 2015 г. была введена в эксплуатацию первая печь для обжига извести, в сентябре этого же года – вторая печь. А годом позже – в сентябре 2016 г. запущена третья печь.

В настоящее время все три печи работают на полную мощность, что позволяет производить более 200 тыс. т в год высококачественной жестко-, средне- и мягкообожженной извести 1-го сорта.

Учитывая спрос на высококачественную известь в строительной отрасли Российской Федерации и стран ближнего зарубежья, проект TEREX-Lime уже признан успешным для обеих сторон.

**Maerz Ofenbau AG**

Richard Wagner-Strasse, 28, 8027 Zurich, Switzerland

Phone: +41-44-287 27 27

Fax: +41-44-201 36 34

E-mail: [info@maerz.com](mailto:info@maerz.com)

[www.maerz.com](http://www.maerz.com)



# X юбилейная международная конференция «Нанотехнологии в строительстве: NTC-2018»

13–17 апреля 2018 г. в Хургаде (Египет) состоялась X Международная конференция «Нанотехнологии в строительстве: NTC-2018», которую организовали Национальный исследовательский центр жилищного и гражданского строительства (НБРС), Министерство жилищного и городского хозяйства Египта, Египетско-русский университет (ЕРУ) и Ижевский государственный технический университет им. М.Т. Калашникова. Традиционно конференция прошла при информационной поддержке журнала «Строительные материалы»®.

The 10<sup>th</sup> Jubilee International Conference on “Nano-Technology in Construction: NTC 2018”, organized by the Housing and Building National Research Center (NBRC), Ministry of Housing, Utilities and Urban Development of Egypt, Egyptian-Russian University (ERU) and the Kalashnikov Izhevsk State Technical University, was held on 13–17 April, 2018 in Hurghada (Egypt). Traditionally, the conference was held under the information support of the “Construction Materials” Journal.



О том, что с каждым годом конференция вызывает все больший интерес, свидетельствует увеличившееся число участников – более 250 ученых из университетов и научных организаций, руководителей и ведущих специалистов министерств и ведомств из десяти стран: Египта, Ирака, Ливии, Омана, Судана, Иордании, России, Чехии, Канады, Италии – приехали, чтобы обсудить вопросы применения нанотехнологий. Спонсорами мероприятия выступили Housing&Development Bank, New Urban Communities Authority, Urban Training Institute, CMB Group, Mena Group. За три рабочих дня было заслушано и обсуждено более 150 докладов. Деловая программа была насыщена научными дискуссиями.

В этом году в состав российской делегации вошли ученые из Ижевского государственного технического университета им. М.Т. Калашникова, Казанского государственного архитектурно-строительного университета, Уфимского государственного нефтяного технического университета. Приятно отметить, что интерес к конференции проявили коллеги, представляющие промышленность строительных материалов России – ООО «Завод герметизирующих материалов» (г. Дзержинск).

Российский научно-технический журнал «Строительные материалы»® как информационный партнер конференции уже по традиции подготовил специальный выпуск с подборкой статей на английском и русском языках, который всегда вызывает неподдельный интерес иностранных коллег, что является явным признанием востребованности и необходимости в таком виде сотрудничества, как международный обмен опытом в работах по изучению наноматериалов.

Интерес участников ежегодно вызывают доклады российских ученых. Декан инженерно-строительного факультета ИжГТУ, организатор конференции, д-р техн. наук **Г.Н. Первушин** представил стратегию развития международной деятельности Ижевского уни-

Every year the conference attracts more and more interest which is evidenced by an increasing number of participants – more than 250 scientists from universities and scientific organizations, heads and leading specialists of ministries and agencies from 10 countries: Egypt, Iraq, Libya, Oman, Sudan, Jordan, Russia, Czech Republic, Canada, Italy came to discuss the issues of nano-technologies application. Sponsors of the event were Housing&Development Bank, New Urban Communities Authority, Urban Training Institute, CMB Group, Mena Group. Over 150 reports were heard and discussed during three working days. The business program was full of scientific discussions.

This year the Russian delegation included scientists from the Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Kazan State University of Architecture and Engineering, Ufa State Petroleum Technological University. It is pleasant to note that colleagues representing the building materials industry of Russia – LLC “Sealing Materials Plant (the city of Dzerzhinsk) showed interest in the conference.

The Russian scientific-technical journal “Construction Materials”, as an information partner of the conference, traditionally prepared a special issue with a selection of articles in English and Russian which always arouses a genuine interest of foreign colleagues. This is a clear recognition of the demand and need for such a form of cooperation as an international exchange of





верситета, рассказал о его истории, о взаимном сотрудничестве с Египетско-русским университетом. В своем выступлении **Г.И. Яковлев** (ИжГТУ) представил результаты исследований влияния углеродных нанотрубок на структуру и свойства конструкционных композиционных материалов на основе портландцемента. Он резюмировал, что добавление дисперсии углеродных нанотрубок в сочетании с мелкодисперсными минеральными добавками приводит к структурированию связующей матрицы и созданию плотного бездефектного слоя гидратных образований на поверхности твердых фаз.

Введению дисперсных нанотрубок в поливинилхлоридные композиции и закономерностям их взаимодействия был посвящен доклад д-ра техн. наук **В.Г. Хозина** (КазГАСУ). Полный текст статьи читайте в журнале «Строительные материалы» (Хозин В.Г., Низамов Р.К., Абдрахманова Л.А. Закономерности совмещения поливинилхлоридных композиций с дисперсиями углеродных нанотрубок // Строительные материалы. 2018. № 1–2. С. 33–38).

Большой интерес участников вызвало выступление директора по НИР и развитию ООО «Завод герметизирующих материалов» **Т.А. Артамоновой**. Она представила результаты исследований введения углеродных нанотрубок в производимые предприятием герметизирующие материалы. Полный текст статьи читайте на стр. 63–66.

Опыту разработки и применения сверхвысокопрочных бетонов было по-

experience in the works devoted to the study of nano-materials.

Every year, the reports of Russian scientists are of interest to the participants. The Dean of the Faculty of Civil Engineering of IzhSTU, co-organizer of the conference, Doctor of Technical Sciences **G.N. Pervushin** presented a development strategy of international activity of the Izhevsk University, spoke about its history, about the mutual cooperation with the Egyptian-Russian University. In his speech, **G.I. Yakovlev** (IzhSTU) presented the results of studies of the effect of carbon nano-tubes on the structure and properties of structural composite materials on the basis of Portland cement. He concluded that the addition of dispersion of carbon nano-tubes in combination with finely dispersed mineral additives leads to the structuring of the binder matrix and the creation of a dense defectless layer of hydrate formations on the surface of solid phases.

The report of Doctor of Technical Sciences **V.G. Khozin** (KSUAE) was devoted to the introduction of disperse nano-tubes in polyvinylchloride compositions and regularities of their interaction. Read the full text of the article in the journal "Construction Materials" (Khozin V.G., Nizamov R.K., Abdrakhmanova L.A. Regularities of combining polyvinyl chloride composites with carbon nano-tubes dispersions. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2018. No. 1–2, pp. 33–38).

Great interest of the participants was caused by the speech of **T.A. Artamonova**, Director for research and development of LLC "Sealing Materials Plant". She





священо выступление профессора **Х. Марзука** (Канада) (Hesham Marzouk, Ryerson University, Canada). Он отметил, что разработка данного вида бетонов считается одним из самых перспективных технологических направлений в области материалов, подходящих для структурной инженерии, они обладают исключительными свойствами и долговечностью. А при введении в СВГПБ армирующих волокон улучшаются показатели по растрескиванию и растяжению, что позволяет получать материал с превосходной пластичностью.

Сравнение влияния добавок карбоната натрия и наноклоаина (NK) на свойства железобетона было представлено в докладе **Саид И. Заки** (Египет) (Saaid I. Zaki, HBRC). Добавки в бетон вводились в различных соотношениях. Результаты эксперимента показали, что добавление наноматериалов практически не уменьшило текучести бетона, но ранняя прочность при сжатии была значительно увеличена при оптимальной дозировке добавок (нано- $\text{CaCO}_3$  1% и NK 7%).

Интерес с точки зрения организации архитектурного пространства вызывает исследование **М.А. Элनावи** (Египет) (Mohamed Alaa Elnawawy, Helwan University). Он представил маскирующие материалы на основе наночастиц – так называемый материал с отрицательным показателем преломления. Он основан на трансформационной оптике, описывает процесс экрани-

presented the results of studies of introducing carbon nano-tubes in the sealing materials produced by the plant. Read the full article on page 63–66.

The presentation of Professor **Hesham Marzouk** (Ryerson University, Canada) was devoted to the experience in development and application of ultra high-performance concretes (UHPC). He noted that the development of this type of concretes is one of the most perspective technological directions in the field of materials suitable for structural engineering, they have exceptional properties and durability. And introducing reinforcing fibers in UHPC improves cracking and stretching indicators which makes it possible to produce the material of excellent plasticity

A comparison of the effect of additives of calcium carbonate and nano-kaolin (NK) on the properties of reinforced concrete was presented in the report of **Saaid I. Zaki** (HBRC, Egypt). Additives in concrete were introduced in different ratios. The results of the experiment show that the addition of nano-materials did not reduce practically the flowability of concrete, but early compressive strength increased significantly at optimal dosing of additives (nano- $\text{CaCO}_3$  – 1% and NK – 7%)

The study of **Mohamed Alaa Elnawawy** (Helwan University, Egypt) arouses interest from the point of view of the organization of architectural space. He presented masking materials on the basis of nano-particles, the so-called





рования чего-либо с точки зрения управления электромагнитным излучением. При покрытии объекта таким материалом он становится как будто невидимым. Это может быть важно в городской среде для скрытия неприятных взгляду высоковольтных башен и т. д.

Об исследовании физико-механических свойств бетона, содержащего наночастицы графена, рассказала **Л. Боднарова** (Чехия) (Lenka Bodnarova, Brno University of Technology, Czech Republic). В ходе исследования было выявлено, что изменения микроструктуры цементных композитов сильно зависят от концентрации графеноидов и времени гидратации.

Однако, как и раньше, конференция охватила намного больший спектр применения наноматериалов и нанотехнологий, чем строительная отрасль. Были представлены доклады о применении нанотехнологий в энергетике, медицине, металлургии и т. д. Влиянию времени спекания на микроструктуру, коэффициент теплового расширения, плотность, твердость и прочность при сжатии (Cu-WC-TiC-Co / Graphene) нанокompозитов было посвящено выступление **Омаймы Эль-Кадди** (Египет) (Omaima El-Kady, Central Metallurgical Research and Development Institute, Egypt).

В завершение научного мероприятия было отмечено, что X Международная конференция прошла успешно. Рассмотренные темы и направления исследований актуальны не только в Египте, но и в мировом научном сообществе.

Редакция журнала «Строительные материалы»<sup>®</sup> поздравляет организаторов конференции с круглой датой, благодарит за многолетнее плодотворное сотрудничество и желает дальнейшего процветания и достижения всех поставленных целей и задач.

material with a negative refraction index (NIM). It is based on transformation optics, describes the process of screening something from the point of view of control over electromagnetic radiation. When covering the object with such a material, it becomes as if it is invisible. This can be important in an urban environment to hide an unpleasant look of high-voltage towers, etc.

**Lenka Bodnarova** (Brno University of Technology, Czech Republic) told about the research in physical-mechanical properties of concrete containing nanoparticles of graphene. In the course of the research it was revealed that changes in the micro-structure of cement composites strongly depend on the concentration of graphenoids and time of hydration.

However, as before, the conference covered a much larger range of application of nano-materials and nano-technologies than just the construction industry. The reports on the use of nano-technologies in power engineering, medicine, metallurgy, etc. were presented. The speech of **Omaima El-Kady** (Central Metallurgical Research and Development Institute, Egypt) was devoted to the effect of sintering time on microstructure, thermal expansion coefficient, density, hardness, and compression strength (Cu-WC-TiC Co/Graphene) of nano-composites.

At the end of the scientific event it was noted that the 10th International Conference was successful. The considered topics and directions of research are actual not only in Egypt but also in the world scientific community.

The Editorial Board of the "Construction Materials" Journal congratulates the conference organizers on the jubilee, thanks for the long-term cooperation and wishes further prosperity and achievement of all the set goals and objectives.



*До встречи на следующей конференции «Нанотехнологии в строительстве», которая состоится в апреле 2019 года!*

*Следите за уточненной информацией о сроках и месте проведения на страницах нашего журнала.*

\*\*\*

*See you at the next conference on "Nano-Technology in Construction" which will be held in April 2019!*

*Follow the updated information about the dates and place on the pages of our journal.*



# KazBuild

ufi  
Approved  
Event

Главная международная  
строительная и интерьерная  
выставка Казахстана

4-6 сентября 2018

Атакент, Алматы, Казахстан

подробная информация:  
[www.kazbuild.kz](http://www.kazbuild.kz)



25  
YEARS



KazBuild  
Almaty



20-21  
сентября  
2018 г.

Республика Беларусь

г. Минск

Оргкомитет:

140050, Московская обл.,

п. Красково,

ул. К. Маркса, д. 117,

РГА

Телефон:

+7 8-916-501-36-56

E-mail: [rga-service@mail.ru](mailto:rga-service@mail.ru)

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

Российская гипсовая ассоциация  
Московский государственный строительный университет  
Научно-исследовательский институт строительной физики

## Девятая Международная конференция «Повышение эффективности производства и применения гипсовых материалов и изделий»

Тематика конференции:

- технический прогресс в области гипсовых материалов и изделий (исследования, производство и применение)
- ангидритовые вяжущие
- гипсовые материалы в малоэтажном строительстве
- привлекательность и механизмы инноваций в гипсовой отрасли
- современное оборудование для производства гипсовых вяжущих, материалов и изделий на их основе
- лаборатории, менеджмент качества, экологический менеджмент и их роль в обеспечении качества и долговечности гипсовых материалов
- нормативно-техническая документация в соответствии с современными требованиями
- обучение и переподготовка специалистов в области производства и применения гипсовых материалов и изделий

Генеральный информационный спонсор: журнал

СТРОИТЕЛЬНЫЕ  
МАТЕРИАЛЫ®



Г.А. САВЧЕНКОВА, директор, Т.А. АРТАМОНОВА, заместитель директора по НИР и развитию (abris@zgm.ru), О.В. ШАШУНЬКИНА, начальник НТЦ

ООО «Завод герметизирующих материалов» (606008, г. Дзержинск, Нижегородская обл., ул. Менделеева, корп. 1058)

## Исследование свойств наномодифицированного материала серии Абрис

Приведены результаты исследований свойств наномодифицированного изоляционного материала серии Абрис, представляющего собой полимерную композицию на основе синтетических каучуков, минеральных наполнителей, пластификатора и углеродных нанотрубок. Установлено, что наиболее сильное влияние углеродные нанотрубки в полимерной композиции на основе синтетических каучуков оказывают на электрические свойства и механическую прочность наномодифицированного материала. Полученные данные показывают перспективность проведения дальнейших работ с углеродными нанотрубками с целью повышения эффективности материалов и изделий, поглощающих электромагнитное излучение.

**Ключевые слова:** полимерная композиция, углеродные нанотрубки, прочность, электропроводность, защита от электромагнитного излучения.

**Для цитирования:** Савченкова Г.А., Артамонова Т.А., Шашунькина О.В. Исследование свойств наномодифицированного материала серии Абрис // *Строительные материалы*. 2018. № 6. С. 63–66.

G.A. SAVCHENKOVA, Director, T.A. ARTAMONOVA, Deputy Director for research and development, (abris@zgm.ru), O.V. SHASHUNKINA, Head of the Scientific and technical center  
ООО «Sealing Materials Plant» (1058, Mendeleeva Street, Dzerzhinsk, 606008, Nizhny Novgorod Region, Russian Federation)

### Research in Properties of a Nano-Modified Material of Abris Series

Results of the study of properties of the nano-modified material of Abris series, which is a polymer composition on the basis of synthetic rubbers, mineral fillers, a plasticizer, and carbon nano-tubes, are presented. It is established that the most strong influence of carbon nano-tubes in the polymer composition on the basis of synthetic rubbers is on the electrical properties and mechanical strength of the nano-modified material. The data obtained show the perspectivity of conducting further works with nano-tubes with the purpose to increase the efficiency of materials and products absorbing the electro-magnetic radiation.

**Keywords:** polymeric composition, carbon nano-tubes, strength, electrical conductivity, protection against electro-magnetic radiation.

**For citation:** Savchenkova G.A., Artamonova T.A., Shashunkina O.V. Research in properties of a nano-modified material of Abris series. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2018. No. 6, pp. 63–66. (In Russian).

Среди различных путей улучшения свойств полимерных строительных материалов наиболее эффективным может стать тонкодисперсное нанонаполнение, направленное на улучшение структуры и свойств самой полимерной матрицы [1–5].

В последние годы наблюдается значительный прогресс в области исследований и разработки полимерных нанокомпозитов. Применение для модификации полимеров наночастиц различной природы в крайне небольших количествах (до 5 мас. %) позволило существенно улучшить целый ряд свойств полимерных композиций — деформационно-прочностные, газобарьерные свойства, огнестойкость, электрическую и теплопроводность [6].

Согласно различным исследованиям углеродные нанотрубки (УНТ) выделяют как наиболее перспективный вид модификатора, позволяющий создавать материалы с принципиально новыми или значительно улучшенными свойствами [7–9]. Открытые в 90-х гг. XX в. УНТ обладают сами по себе уникальными характеристиками: большой прочностью в сочетании с высокими значениями упругой деформации, хорошей электропроводностью и адсорбционными свойствами, способностью к холодной эмиссии электронов и аккумулярованию газов, химической и термической стабильностью и т. д. Внедренные в полимерную матрицу УНТ обеспечивают ее электро- и теплопроводность, их можно рассматривать как нанопроводники. УНТ увеличивают проводимость в сотни раз сильнее обычных добавок, используемых для повышения проводимости материалов. Благодаря введению даже в очень малых количествах УНТ формируется объемная электропроводная структура, проводимость которой гораздо выше, чем при использовании традиционных сажевых добавок [10].

Fine filling and nano filling, aimed at improving the structure and properties of the polymer matrix itself can be the most effective ways among the various ways to improve the properties of polymer construction materials [1–5].

In recent years, there has been significant progress in the research and development of polymer nanocomposites. Application for modification of polymers of nanoparticles of different nature in extremely small quantities (up to 5 wt. %) made it possible to significantly improve a number of properties of polymer compositions — deformation-strength, gas barrier properties, fire resistance, electrical and thermal conductivity [6].

According to various studies in recent years, carbon nanotubes (CNTs) are identified as the most promising type of filler, allowing the creation of materials with fundamentally new or significantly improved properties [7–9]. Discovered in the 90-ies of the last century CNTs possess unique characteristics: high strength in combination with high values of elastic deformation, good electrical conductivity and adsorption properties, and the ability to cold emission of electrons and the accumulation of gases, chemical and thermal stability, etc. Introduced into the polymer matrix CNT provide its electrical and thermal conductivity, they can be considered as nanowire. CNT increases conductivity hundreds of times stronger than conventional additives used to increase the conductivity of materials. Due to this, CNT forms a volumetric conductive structure with the introduction even in very small quantities, which allows to achieve the conductivity of polymers with a significantly smaller share of CNT compared to traditional soot additives [10].

It is known that polymer composites (PC) with conductive fillers are attractive for problems of electromagnetic protection. The ability of the medium to absorb electromag-

Показатель Indicator	Характеристики материала Абрис РЗтп-01 Parameters of Abris RZtp-01				
Содержание УНТ, мас. % The content of CNTS, % (by weight)	–	1	2	3	6
Технология изготовления Manufacturing technology	Смешение на вальцах Mixing in rollers				
Условная прочность при растяжении, МПа Conditional tensile strength, MPa	0,83	0,91	0,988	1,2	2,97
Относительное удлинение при разрыве, % Elongation at break, %	92	67	60	48	28
Гибкость, 20°C, радиус закругления бруса 15 мм Flexibility, 20°C, the radius of curvature of the beam 15 mm	Трещин нет No cracks	Трещин нет No cracks	Трещин нет No cracks	Микротрещины Micro cracks	Трещины Cracks
Плотность, г/см <sup>3</sup> Density, g/cm <sup>3</sup>	2,4	2,37	2,35	2,36	2,37
Значение свинцового эквивалента при напряжении на рентгеновской трубке 100 кВ, мм Pb. Толщина материала 2 мм The value of lead equivalent at the voltage on the x-ray tube 100 kV, mm Pb. Material thickness 2 mm	0,29	–	–	–	0,28
Диэлектрическая проницаемость ε при 20°C Dielectric permittivity, ε, at 20°C	5,91	7	9,39	13,81	-1,35
Тангенс угла диэлектрических потерь The tangent of an angle dielectric losses	0,02	0,038	0,126	0,499	138,7
Удельное объемное электрическое сопротивление при 20°C, Ом·см Specific volumetric electrical resistance at 20°C, Ohm.cm	1,3×10 <sup>4</sup>	1×10 <sup>4</sup>	2,8×10 <sup>4</sup>	1,8×10 <sup>4</sup>	1,2×10 <sup>3</sup>

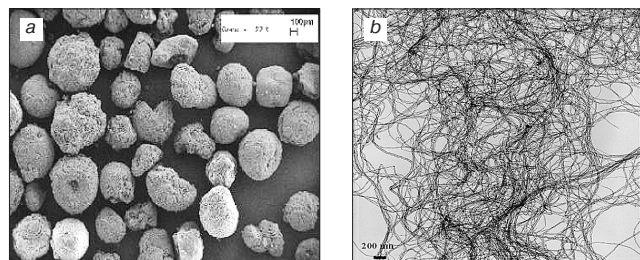
Известно, что полимерные композиты (ПК) с проводящими наполнителями являются перспективными для задач электромагнитной защиты. Способность среды поглощать электромагнитное излучение определяется ее электрическими и магнитными свойствами, к которым относятся удельная электропроводность, диэлектрическая и магнитная проницаемость. Поглощение электромагнитной энергии происходит за счет диэлектрических, магнитных потерь и потерь на проводимость, которые пытаются максимизировать для достижения максимума эффективности экранирования [11, 12].

ООО «Завод герметизирующих материалов» специализируется на выпуске продукции, предназначенной для защиты различных объектов от негативного воздействия окружающей среды. В линейке выпускаемой продукции наряду с герметиками представлена продукция с радио- и радиационно-защитными свойствами: материал для защиты от электромагнитных излучений Абрис ЭМИ ТУ 2291-013-52471462–2009 и радиационно-защитный материал Абрис РЗ ТУ 6990-012-52471462–2009.

Целью настоящей работы явилось исследование физико-механических, электрофизических, защитных свойств полимерного композиционного материала серии Абрис с углеродными нанотрубками в зависимости от их содержания.

В качестве наноконпонента применялись многослойные углеродные нанотрубки корпорации Arkema (Франция), полученные методом плазменно-дугового низкотемпературного пиролиза. Углеродные нанотрубки (рисунок, а) представляют собой агрегаты в виде пористых глобул размерами 400–900 мкм. Единичные УНТ длиной от 1 до 15 мкм имеют внешний диаметр от 10 до 15 нм (рисунок, б). Средняя насыпная плотность гранулята составляет 50–150 кг/м<sup>3</sup> [13].

В качестве полимерной матрицы для получения образцов использовали композиции на основе синтетических каучуков общего назначения. В систему вводили минеральные наполнители. Композиции, состоящие из синтетических каучуков, пластификатора, минеральных наполнителей и углеродных нанотрубок смешивали на



Внешний вид гранул многослойных УНТ при увеличении ×100 (а); скопление УНТ при увеличении ×5·10<sup>4</sup> (б)  
Appearance of granules of multilayer CNTs at an increase of ×100 (a), and the accumulation of CNTs with an increase of ×5·10<sup>4</sup> (b)

netic radiation is determined by its electrical and magnetic properties, which include electrical conductivity, dielectric permittivity and magnetic permeability. The absorption of electromagnetic energy is due to dielectric, magnetic and conductivity losses, which are trying to maximize the maximum screening efficiency [11, 12].

“Sealing Materials Plant” LLC specializes in materials production intended for protection of various objects from negative impact of environment. We produce both sealants and products having radiation – protective properties: material for protection against electromagnetic radiation Abris EMI TU 2291-013-52471462–2009 and radiation-protective material Abris RZ TU 6990-012-52471462–2009. The aim of this work is to study the physical, mechanical, electro-physical, protective properties of polymer composite materials Abris with carbon nanotubes depending on their content.

As a nanocomponent, multilayer carbon nanotubes of Arkema Co. (France), which were obtained by plasma arc low-temperature pyrolysis, were used. Carbon nanotubes (Fig. a) are aggregates in the form of porous globules with dimensions of 400–900 μm. Single CNTs with a length of 1 to 15 μm have an outer diameter of 10 to 15 nm (Fig. b). The average bulk density of the granulate is 50–150 kg/m<sup>3</sup> [13].

вальцах по стандартной технологии. Испытания образцов изготовленных полимерных композитов, модифицированных УНТ, и оценка их технических и технологических параметров выполнялись стандартными методами. Полученные результаты представлены в таблице.

Проведенные исследования показали следующее:

- свойства полимерных композиций на основе синтетических каучуков общего назначения можно существенно изменять путем введения углеродных нанотрубок;
- по мере увеличения содержания углеродных нанотрубок в полимерной композиции на основе синтетических каучуков увеличивается их армирующее действие и электропроводность композиции;
- введение 6% углеродных нанотрубок в состав радиационно-защитного материала Абрис РЗтп-01 привело к значительному упрочнению состава – более чем в два раза, однако при этом снизились деформационные свойства композитов, при проведении испытаний на гибкость появились трещины;
- наиболее сильное влияние углеродные нанотрубки оказывают на электрические свойства наномодифицированного радиационно-защитного материала Абрис РЗтп-01, увеличивая электропроводность материала. При увеличении содержания углеродных нанотрубок до 6% увеличиваются показатели тангенса угла диэлектрических потерь, диэлектрическая проницаемость и на порядок уменьшается показатель удельного объемного электрического сопротивления;
- показатель «свинцовый эквивалент» наномодифицированного радиационно-защитного материала Абрис РЗтп-01, характеризующий поглощение рентгеновского излучения, остался на уровне штатного.

Исследования показали перспективность проведения дальнейших работ с углеродными нанотрубками с целью повышения эффективности материалов, поглощающих электромагнитные излучения, а также разработки изделий комплексной радио- и радиационной защиты персонала и техники, работающих в условиях повышенного фона ионизирующего и электромагнитного излучения.

#### Список литературы

1. Шадрухин Д.А., Абдрахманова Л.А. Наномодификация карбамидного пенопласта // *Полимеры в строительстве*: Научный интернет-журнал. 2017. № 1 (5). С. 37–42.
2. Хозин В.Г., Старовойтова И.А., Майсурадзе Н.В., Зыкова Е.С., Халикова Р.А., Корженко А.А., Тринеева В.В., Яковлев Г.И. Наномодифицирование полимерных связующих для конструктивных композитов // *Строительные материалы*. 2013. № 2. С. 4–10.
3. Хозин В.Г., Низамов Р.К., Абдрахманова Л.А. Закономерности совмещения поливинилхлоридных композиций с дисперсиями углеродных нанотрубок // *Строительные материалы*. 2018. № 1–2. С. 33–38.
4. Старовойтова И.А., Хозин В.Г., Корженко А.А., Халикова Р.А., Зыкова Е.С. Структурообразование в органо-неорганических связующих, модифицированных концентратами многослойных углеродных нанотрубок // *Строительные материалы*. 2014. № 1–2. С. 12–20.
5. Хозин В.Г., Абдрахманова П.А., Низамов Р.К. Общая концентрационная закономерность эффектов наномодифицирования строительных материалов // *Строительные материалы*. 2015. № 2. С. 25–33.
6. Хакимуллин Ю.Н., Курбангалеева А.Р. Нанокompозиты на основе эластомеров // *Вестник Казанского технологического университета*. 2011. № 12. С. 78–81.

The compositions based on general-purpose synthetic rubbers were used as a polymer matrix for obtaining samples. Mineral fillers were introduced into the system. Compositions consisting of synthetic rubbers, plasticizer, mineral fillers and carbon nanotubes were mixed on rollers using standard technology. Tests of samples of the made polymeric composites modified by UNT, and an assessment of their technical and technological parameters were carried out by standard methods. The results are presented in the table.

Studies have shown that:

- the properties of polymer compositions based on General purpose synthetic rubbers can be significantly changed by introducing carbon nanotubes;
- as the content of carbon nanotubes in the polymer composition based on synthetic rubbers increases, their reinforcing effect and the conductivity of the composition increases.
- the introduction of a 6% carbon nanotubes to the radiation protective material Abris RZtp-01 has led to a significant hardening of the composition, more than 2 times, but at the same time decreased the deformation properties of the composites, when tested for flexibility, cracks;
- the strongest influence of the carbon nanotubes affect the electrical properties of nano-modified radiation-shielding material Abris RZtp-01. With an increase of carbon nanotubes up to 6% to the content, the performance of the dielectric loss tangent increases, the dielectric permeability decreases and the volume electrical resistance index decreases by an order of magnitude;
- the indicator “lead equivalent” nano-modified radiation-shielding material Abris RZtp-01 characterizing the absorption of x-ray radiation remained at the level of the staff.

The study indicators the prospects of further work with carbon nanotubes in order to improve the efficiency of materials that absorb electromagnetic radiation, as well as the development of complex radio products, and radiation protection of personnel and equipment operating in high background ionizing and electromagnetic radiation.

#### References

1. Shadruhin D.A., Abdrahmanova L.A. Nanomodification of carbamide foam. *Polimery v stroitel'stve*: scientific Internet journal. 2017. No. 1 (5), pp. 37–42. (In Russian).
2. Khozin V.G., Starovoitova I.A., Maisuradze N.V., Zykova E.S., Khalikova R.A., Korzhenko A.A., Trineeva V.V., Yakovlev G.I. Nanomodification of polymer binders for constructional composites. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materialy]. 2013. No. 2, pp. 4–10. (In Russian).
3. Khozin V.G., Nizamov R.K., Abdrahmanova L.A. Regularities of combining polyvinyl chloride composites with carbon nanotubes dispersions. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materialy]. 2018. No. 1–2, pp. 33–38. (In Russian).
4. Starovoitova I.A., Khozin V.G., Korzhenko A.A., Khalikova R.A., Zykova E.S. Structure formation in organic-inorganic multiwall carbon nanotubes modified binders. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2014. No. 1–2, pp. 12–20. (In Russian).
5. Khozin V.G., Abdrahmanov P.A., Nizamov R.K. Common concentration pattern of effects of construction materials nanomodification. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2015. No. 2, pp. 25–33. (In Russian).
6. Hakimullin Yu.N., Kurbangaleeva A.R. Nanocomposites based on elastomers. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*. 2011. No. 12, pp. 78–81. (In Russian).



7. Яковлев Г.И., Первушин Г.Н., Корженко А., Бурьянов А.Ф., Керене Я., Маева И.С., Хазеев Д.Р., Пудов И.А., Сеньков С.А. Применение дисперсий многослойных углеродных нанотрубок при производстве силикатного газобетона автоклавного твердения // *Строительные материалы*. 2013. № 2. С. 25–29.
8. Simone Musso, Jean-Marc Tulliani, Giuseppe Ferro, Alberto Tagliaferro Influence of carbon nanotubes structure on the mechanical behavior of cement composites // *Composites Science and Technology*. 2009. Vol. 69. Is. 11–12, pp. 1985–1990.
9. Thanongsak Nochaiya, Arnon Chaipanich Behavior of multi-walled carbon nanotubes on the porosity and microstructure of cement-based materials // *Applied Surface Science*. 2011. Vol. 257. Is. 6, pp. 1941–1945.
10. Абрамов Г.В., Гаврилов А.Н., Пологно Е.А. Наноструктурированные полимеры с наполнителем из нанотрубок: современное состояние вопроса. *Материалы XVII Международной научно-практической конференции студентов и молодых ученых «Современные техника и технологии»*. Томск. 2011. С. 361–362.
11. Гульбин В.Н., Колпаков Н.С., Горкавенко В.В., Чердынцев В.В. Разработка и исследование радио- и радиационно-защитных композиционных материалов // *Нанотехнологическое общество России*. <http://www.rusnor.org/pubs/articles/13666.htm>
12. Латыпова А.Ф., Калинин Ю.Е. Анализ перспективных радиопоглощающих материалов // *Вестник ВГТУ*. 2012. № 6. С. 70–76.
13. Пудов И.А. Наномодификация портландцемента водными дисперсиями углеродных нанотрубок. Дисс... канд. техн. наук. Казань. 2013. 185 с.
7. Yakovlev G.I., Pervushin G.N., Korzhenko A., Buryanov A.F., Keriene Ya., Maeva I.S., Chazeev D.R., Pudov I.A., Senkov S.A. Applying multi-walled carbon nanotubes dispersions in producing autoclaved silicate cellular concrete. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2013. No. 2, pp. 25–29. (In Russian).
8. Simone Musso, Jean-Marc Tulliani, Giuseppe Ferro, Alberto Tagliaferro Influence of carbon nanotubes structure on the mechanical behavior of cement composites. *Composites Science and Technology*. 2009. Vol. 69. Is. 11–12, pp. 1985–1990.
9. Thanongsak Nochaiya, Arnon Chaipanich Behavior of multi-walled carbon nanotubes on the porosity and microstructure of cement-based materials. *Applied Surface Science*. 2011. Vol. 257. Is. 6, pp. 1941–1945.
10. Abramov G.V., Gavrilov A.N., Pologno E.A. Nanostructured polymers filled with nanocarbon tubes: the current state of the matter. *Materials of the XVII International Scientific and Practical Conference of Students and Young Scientists "Modern Techniques and Technologies"*. Tomsk. 2011, pp. 361–362. (In Russian).
11. Gul'bin V.N., Kolpakov N.S., Gorkavenko V.V., Cherdynceev V.V. Development and study of radio- and radiation-protective composite materials // Nanotechnological Society of Russia. <http://www.rusnor.org/pubs/articles/13666.htm>
12. Latypova A.F., Kalinin Yu.E. Analysis of promising radio-absorbing materials. *Vestnik VSTU*. 2012. No. 6. pp. 70–76. (In Russian).
13. Pudov I.A. Nanomodification of Portland cement with aqueous dispersions of carbon nanotubes. Cand. Diss. (Engineering). Kazan. 2013. 185 p. (In Russian).

▶ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫЕ ВЫСТАВКИ

УралСтройИндустрия / Деревообработка / Недвижимость / Interior & Design expo

## СТРОИТЕЛЬНЫЙ БИЗНЕС-ФОРУМ

25-28 СЕНТЯБРЯ

УФА 2018



ОРГАНИЗАТОРЫ:



ПОДДЕРЖКА:



СОДЕЙСТВИЕ:



[www.stroybvk.ru](http://www.stroybvk.ru)  
 (347) 246-42-37, 246-42-38  
 e-mail: [stroy@bvkexpo.ru](mailto:stroy@bvkexpo.ru)

[stroybvk](#) [stroyexpo.ufa](#)  
 #БВК #стройБВК

**ВАНХ ЭКСПО**  
 г.Уфа, ул. Менделеева, 158

С.А. ЖДАНОК<sup>1</sup>, д-р физ.-мат. наук (seo@art-pte.com); Е.Н. ПОЛОНИНА<sup>2</sup>, инженер,  
С.Н. ЛЕОНОВИЧ<sup>2</sup>, д-р техн. наук, иностранный академик РААСН,  
Б.М. ХРУСТАЛЕВ<sup>2</sup>, д-р техн. наук, Е.А. КОЛЕДА<sup>2</sup>, инженер

<sup>1</sup> ООО «Передовые исследования и технологии» (223058, Республика Беларусь, Минский р-н, д. Лесковка, ул. Совхозная, 1, к. 16)

<sup>2</sup> Белорусский национальный технический университет (220013, Республика Беларусь, г. Минск, пр. Независимости, 65)

## Повышение прочности бетона пластифицирующей добавкой на основе наноструктурированного углерода

Изучены технологические свойства бетонных смесей, модифицированных пластифицирующей добавкой на основе наноструктурированного углерода. Исследовано влияние добавки на основные свойства тяжелого бетона класса С25/30. Приведены результаты исследований, свидетельствующие об активном участии углеродных нанотрубок: повышение эксплуатационных характеристик бетона, а также возможности снижения количества вводимого цемента до 10%. Добавка обладает свойствами, ускоряющими темп набора прочности, что позволяет решать задачи ранней распалубки без использования пропарки, а также увеличивает конечную прочность изделия в среднем на 30%. Проведенные испытания показали, что рассматриваемая добавка позволяет быстрее решать задачи по набору прочностных характеристик, экономя электроэнергию. Пластифицирующая добавка на основе наноструктурированного углерода может найти применение в товарных бетонах (с высокой степенью подвижности, морозостойкости и водонепроницаемости) и жестких тяжелых бетонах.

**Ключевые слова:** углеродные нанотрубки, бетонная смесь, тяжелый бетон, модифицирование, свойства.

**Для цитирования:** Жданок С.А., Полонина Е.Н., Леонович С.Н., Хрусталева Б.М., Коледа Е.А. Повышение прочности бетона пластифицирующей добавкой на основе наноструктурированного углерода // *Строительные материалы*. 2018. № 6. С. 67–72.

S.A. ZHDANOK<sup>1</sup>, Doctor of Sciences (Physics and Mathematics); E.N. POLONINA<sup>2</sup>, Engineer,  
S.N. LEONOVICH<sup>2</sup>, Doctor of Sciences (Engineering), Foreign Member of RAACS (Russian Academy of Architecture and Construction Sciences),  
B.M. KHRUSTALEV<sup>2</sup>, Doctor of Sciences (Engineering), E.A. KOLEDA<sup>2</sup>, Engineer

<sup>1</sup> ООО "Advanced Research and Technologies" (room 16, 1, Sovkhoznyaya Street, Leskovka, Minsk District, 223058, Republic of Belarus)

<sup>2</sup> Belarusian National Technical University (Belarus, 220013, Minsk, Nezavisimosty Avenue, 65)

### Strength Enhancement of Concrete with a Plasticizer on the Basis of Nano-Structured Carbon

Technological properties of concrete mixtures modified with a plasticizer on the basis of nano-structured carbon are studied. The effect of the additive on the basic properties of heavy concrete of C25/30 class is investigated. The results of the research indicating the active participation of carbon nano-tubes, increasing the performance characteristics of concrete, as well as the possibility of reducing the amount of cement introduced to 10% are presented. The plasticizer has properties that accelerate the rate of strength gain, which makes it possible to solve the problems of early stripping without the use of steaming, and also increases the final strength of the product by an average of 30%. The tests conducted have shown that the additive under consideration makes it possible to solve the problems of a set of strength characteristics faster saving electricity. The plasticizer on the basis of nano-structured carbon can find the use in the ready mixtures (with high level of mobility, frost resistance, and water proofing) to stiff heavy concretes.

**Keywords:** carbon nano-tubes, concrete mixture, heavy concrete, modification, properties.

**For citation:** Zhdanok S.A., Polonina E.N., Leonovich S.N., Khrustalev B.M., Koleda E.A. Strength enhancement of concrete with a plasticizer on the basis of nano-structured carbon. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2018. No. 6, pp. 67–72. (In Russian).

Бетон на основе портландцемента используется в строительстве около 200 лет и по-прежнему требует улучшения свойств. В настоящее время существует необходимость защиты бетона от вредных воздействий окружающей среды. Поэтому на рынке существует множество добавок, которые придают бетонным смесям и бетонам соответствующие свойства.

Строительные материалы и конструкции, которые производятся на основе современных принципов модифицирования структуры, обладают повышенными характеристиками прочности и долговечности. К таким модификаторам относят наноструктурирующие добавки, которые позволяют уплотнить не только структуру цементного камня, но и композита в целом.

В качестве наночастиц в бетонах используют углеродные нанотрубки, фуллерены разных модификаций и другие упорядоченные однослойные и многослойные углеродные материалы [1–4]. Равномерное распределение углеродных наночастиц оказывает большое влияние на свойства бетонной смеси и как следствие, на физико-механические свойства конструкционного бетона [5–7]. Эффективность введения углеродных наноматериалов (УНМ) в цемент и цементные композиции в целом основывается на использовании высокого

уровня энергии поверхности частиц УНМ, которые могут служить центрами кристаллизации, ускоряя процесс образования кристаллогидратов и обеспечивая повышение набора прочности цементного камня. Другим вариантом эффективности УНМ является эффект армирования [8, 9].

В настоящей статье рассмотрены результаты проведенных испытаний на тяжелом бетоне и установлена оптимальная дозировка пластифицирующей добавки на основе наноструктурированного углерода [10–13] и ее влияние на свойства бетонных смесей и физико-механические свойства тяжелого бетона.

В качестве вяжущего вещества в исследованиях использован портландцемент марки М500Д0 (Д20) (ГОСТ 10178–85) ОАО «Красносельскстройматериалы» активностью  $R_{II}=34,1$  МПа; коэффициент нормальной густоты 25,75%.

Мелкий заполнитель — песок природный (ГОСТ 8736–93) с модулем крупности  $M_k=2$ , насыпной плотностью  $\rho_n=1600$  кг/м<sup>3</sup>, истинной плотностью  $\rho_n<2800$  кг/м<sup>3</sup>.

Крупный заполнитель — щебень гранитный фракции 5–20 мм, насыпной плотностью  $\rho_n=1400$  кг/м<sup>3</sup>, истинной плотностью  $\rho_n\sim 2700$  кг/м<sup>3</sup>.

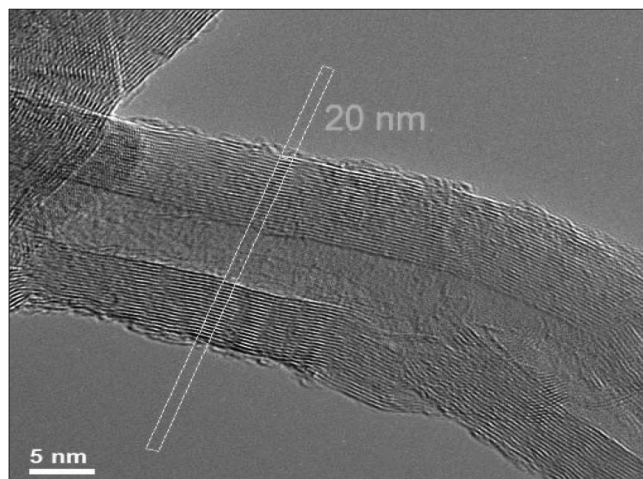
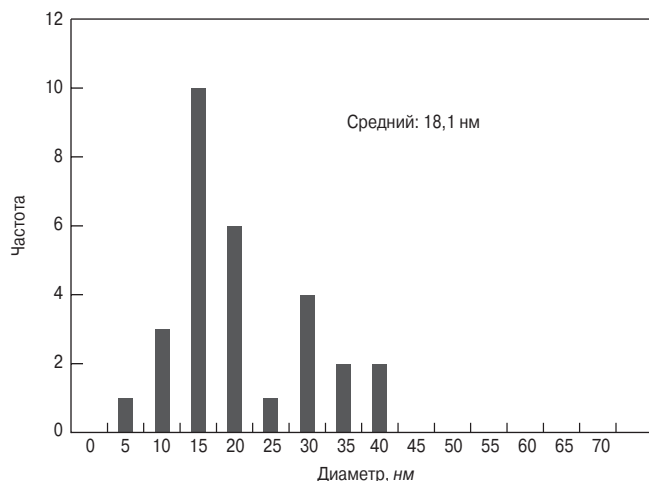


Рис. 1. Гистограмма распределения углеродных нанотрубок по диаметру

Таблица 1

Показатель	Значение
Внешний вид	Непрозрачная, однородная жидкость от темно-коричневого до черного цвета
Массовая доля сухого остатка, %, не менее	37
Плотность, г/см <sup>3</sup>	1,1±0,1
Водородный показатель 15% водного раствора при 20°C, pH	7±1
Содержание хлор-ионов, %, не более	0,05

Таблица 2

Состав	Расход материалов, кг на 1 м <sup>3</sup> бетонной смеси			
	Цемент	Щебень фр. 5–20 мм	Песок	Вода
B30 (C25/30)W8 F500	445	1035	820	210



Рис. 2. Определение удобоукладываемости бетонной смеси по осадке конуса

Таблица 3

Наименование объекта испытаний, показатели, технические требования	Состав	Показатель удобоукладываемости	Содержание компонентов в составе
Подвижная смесь			
B30 (C25/30)W8 F500	1.1	П4–П5 (OK=16–20; 21–25 см)	Контрольный (бездобавочный, удобоукладываемость П4–П5)
	1.2		R 1% (с содержанием добавки в количестве 1% от массы цемента)
	1.3		R 1% – Ц 10% (с содержанием добавки в количестве 1% от массы цемента – 10% цемента)
	1.4		R 0,8% (с содержанием добавки в количестве 0,8% от массы цемента)
Жесткая смесь			
B30 (C25/30)W8 F500	1.5	П1 (OK=1–4 см)	Контрольный 2 (бездобавочный, удобоукладываемость П1)
	1.6		R 1% П1 (с содержанием добавки в количестве 1% от массы цемента, удобоукладываемостью П1)

**Примечание.** R – пластифицирующая добавка на основе наноструктурированного углерода; Ц – цемент.

Вода для затворения и последующего твердения бетона, соответствующая требованиям СТБ 1114–98 и ГОСТ 23732–2011.

Пластифицирующая добавка в бетон на основе наноструктурированного углерода по ТУ ВУ 691460594.002–2016, обладающая характеристиками, приведенными в табл. 1.

Характеристика углеродных нанотрубок, входящих в состав добавки, представлена на рис. 1 [14].

При исследовании были изготовлены опытные образцы тяжелого бетона B30 (C25/30)W8 F500, расход материалов представлен в табл. 2.

С целью установления влияния наномодификатора на технологические свойства бетонных смесей были подобраны оптимальные дозировки данной добавки, которые представлены в табл. 3. В исследованных составах варьировались следующие параметры:

– показатель удобоукладываемости (П1, П4–П5);

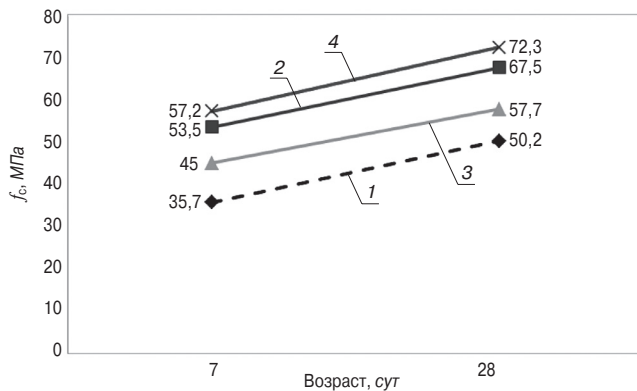


Рис. 3. Кинетика набора прочности бетона: 1 – состав 1.1; 2 – состав 1.2; 3 – состав 1.3; 4 – состав 1.4

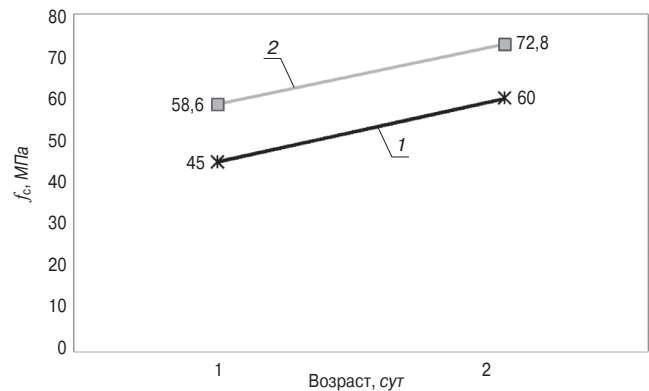


Рис. 4. Кинетика набора прочности бетона: 1 – состав 1.5; 2 – состав 1.6

– количество добавки (0,8 и 1% от массы цемента);

– расход цемента (445 кг/м<sup>3</sup>; 400 кг/м<sup>3</sup>).

Для составов 1.1–1.4 были исследованы технологические характеристики, такие как подвижность и сохраняемость удобоукладываемости (рис. 2), результаты которых представлены в табл. 4.

Для определения характеристик применялись стандартные методы испытания, изложенные в соответствующих нормативных документах.

Исследование влияния пластифицирующей добавки на технологические свойства и характеристики бетонных смесей позволили сделать следующие выводы:

1. Сохраняемость удобоукладываемости бетонной смеси составляет 120 мин при количестве вводимой добавки от 0,8 до 1%;

2. Введение пластифицирующей добавки позволяет снизить водоцементное отношение (до В/Ц=0,22), не ухудшая технологических свойств смеси.

С целью всестороннего изучения влияния пластифицирующей добавки на свойства тяжелого бетона В30 (С25/30)W8 F500 для составов 1.1–1.6 была определена прочность при сжатии в возрасте 7 и 28 сут (табл. 5, рис. 3, 4).

Анализ кинетики набора прочности свидетельствует, что образцы всех составов 1.1–1.6 в возрасте 28 сут соответствуют классу С25/30.

Для подвижных смесей составов 1.1–1.4 (удобоукладываемость П4–П5) модифицирование пластифицирующей добавкой позволило увеличить прочность при сжатии ( $f_c$ ) в возрасте 28 сут по сравнению с бездобавочным составом соответственно: для состава 1.2 – на 34% (67,5 МПа); для состава 1.3 – на 14% (57,7 МПа); для состава 1.4 – на 44% (72,3 МПа); при этом произошел набор прочности к 7 сут хранения у образцов, содержащих пластифицирующую добавку на основе наноструктурированного углерода до 60%.

Зафиксировано оптимальное количество добавки на основе наноструктурированного углерода – 0,8% от массы цемента, при котором прочность при сжатии составляет 72,3 МПа.

Для жестких смесей состав 1.5–1.6 (удобоукладываемость П1) модифицирование пластифицирующей добавкой позволило достичь прочности при сжатии в возрасте: 7 сут, равное 58,6 МПа; 28 сут – 72,8 МПа, что

выше прочности контрольного образца на 30 и 21% соответственно.

Для проведения следующих видов испытаний: определения прочности бетона на осевое растяжение в возрасте 28 сут  $f_{ct}$ ; определения марки по морозостойкости F; определения марки по водонепроницаемости W; определения водопоглощения по массе  $W_m$  – были повторно исследованы свойства бетонной смеси (табл. 6)

Таблица 4

Свойства бетонной смеси	Значение показателей			
	Состав 1.1	Состав 1.2	Состав 1.3	Состав 1.4
Водоцементное отношение	0,47	0,22	0,26	0,24
Расход вяжущего, кг/м <sup>3</sup>	445	445	400	445
Подвижность бетонной смеси, ОК, см	20	21	21	21
Марка по удобоукладываемости	П4–П5			
Сохраняемость удобоукладываемости, ч	0,5	2	2	2
Средняя плотность бетонной смеси, кг/м <sup>3</sup>	2370	2285	2185	2285

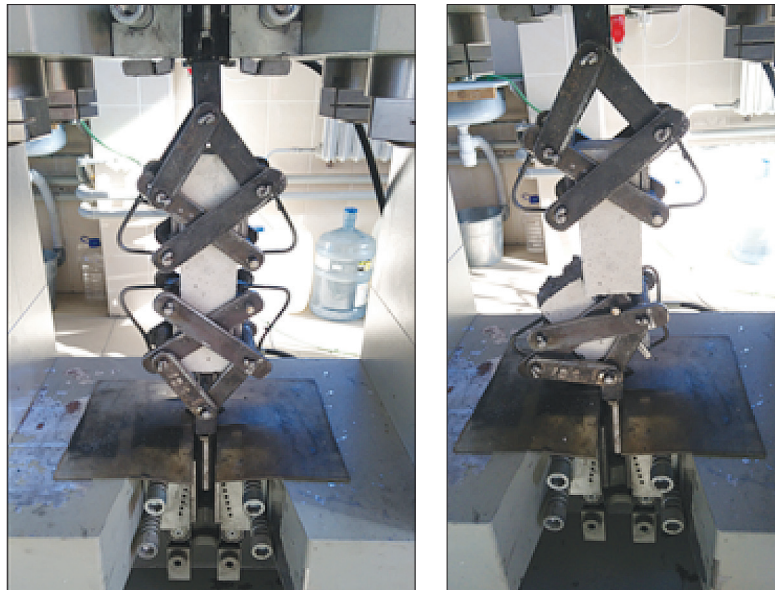


Рис. 5. Испытание опытного образца (призмы) на осевое растяжение разрывной машиной Controls 70

Таблица 5

Наименование состава / № состава	Расход материалов, кг на 1 м <sup>3</sup> бетонной смеси						Вода, кг	В/Ц	ОК, см	Прочность при сжатии, $f_c$ , МПа	
	Цемент, кг	Песок, кг	Щебень, кг	Наноструктурированная добавка		7 сут				28 сут	
				%	кг						
В30 (С25/30)W8 F500	1.1	445	820	1035	–	–	210	0,47	20	35,7	50,2
	1.2	445	820	1035	1	4,45	100	0,22	21	53,5	67,5
	1.3	400	820	1035	1	4,45	105	0,26	21	45	57,7
	1.4	445	820	1035	0,8	3,56	105	0,24	21	57,2	72,3
	1.5	445	820	1035	–	–	145	0,32	3	45	60
	1.6	445	820	1035	1	4,45	95	0,21	3	58,6	72,8

Таблица 6

Свойства бетонной смеси	Значение показателей					
	Контрольный	R 1%	R 0,7%	R 0,6%	R 0,5%	R 0,4%
Водоцементное отношение	0,47	0,22	0,35	0,35	0,37	0,39
Расход вяжущего, кг/м <sup>3</sup>	445	445	445	445	445	445
Подвижность бетонной смеси, ОК, см	20	21	23	23	22	22
Марка по удобоукладываемости	П4–П5					
Сохраняемость удобоукладываемости, ч	0,5	2	2	2	1,5	1
Средняя плотность бетонной смеси, кг/м <sup>3</sup>	2370	2285	2280	2343	2394	2439

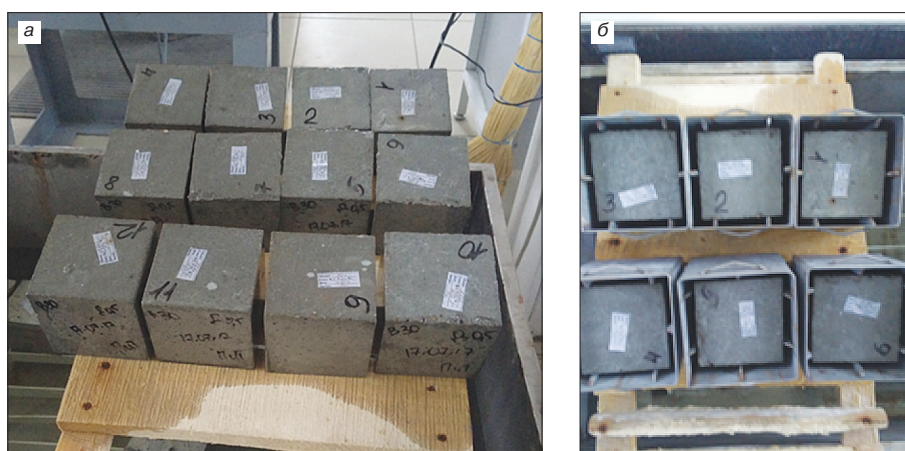


Рис. 6. Испытание опытных образцов (кубов) на морозостойкость: а – вид образцов после насыщения в ванне для насыщения и оттаивания ВДОБО; б – вид образцов перед помещением их в морозильную камеру

для уточнения количества вводимой добавки.

Было произведено шесть лабораторных замесов с различным содержанием добавки (в количестве 0,4–0,7% и 1% от массы цемента), объем одного замеса составлял 7 л. Загрузка лабораторной бетономешалки происходила в следующей очередности: крупный и мелкий заполнители, цемент. Далее происходило перемешивание сухих компонентов до однородной массы. Вода вводилась в смесь двумя этапами: в первый этап вместе с водой было введено необходимое количество добавки, а во втором этапе – оставшееся количество воды для получения подвижности П4–П5.

Таблица 7

Состав	Расход материалов, кг на 1 м <sup>3</sup> бетонной смеси						Прочность при сжатии $f_c$ , МПа	
	Цемент, кг	Песок, кг	Щебень, кг	Пластифицирующая добавка		7 сут	28 сут	
				%	кг			
Состав 1.7	445	820	1035	0,5	2,225	44,5	60,4	

Таблица 8

Объект испытаний	Нормированные значения показателей, установленных в ТНПА	Фактическое значение показателей для каждого образца, с					Вывод о соответствии требованиям ТНПА
		1 2	3 4	5 6	Ср. (3 и 4)		
Состав 1.7	W8 (9,5–13,7 с/см <sup>3</sup> )	12,1 111,8	153,6 238,4	288,2 387,8	196		Соответствует W8

При сравнении свойств изготовленных бетонных смесей с позиции сохраняемости удобоукладываемости состав, содержащий пластифицирующую добавку в количестве 0,5% от массы цемента, более предпочтителен, чем другие составы, по показателю плотности и сохраняемости удобоукладываемости в 1,5 ч. Кроме того, при таком содержании добавки бетонная смесь однородна и отсутствует водоотделение.

Следовательно, состав, содержащий добавку на основе наноструктурированного углерода в количестве 0,5% от массы цемента (1.7), показал следующие результаты (табл. 7–8).



Для определения прочности на осевое растяжение бетонных образцов, модифицированных добавкой, были изготовлены образцы-призмы квадратного сечения размерами 70×70×280 мм.

По результатам испытаний значение прочности бетона на осевое растяжение в серии образцов составило 2,62 МПа.

Для определения соответствия бетона состава 1.7 предъявляемой марки по морозостойкости был использован ускоренный метод определения морозостойкости при многократном замораживании и оттаивании в растворе соли по ГОСТ 10060.2–95.

По итогам испытаний можно сделать вывод, что марка по морозостойкости превышает F500, так как потеря прочности составляет 1,4% при нормированной потере прочности 5%.

Водонепроницаемость бетонных образцов определялась на цилиндрах диаметром 150 мм и высотой 150 мм. Для определения марки по водонепроницаемости использовался косвенный метод при помощи устройства для ускоренного определения водонепроницаемости АГАМА-2 РМ по ГОСТ 12730.5–84 (табл. 8).

После проведения испытания косвенным методом, выяснилось, что образцы состава 1.7 соответствуют марке по водонепроницаемости W20, что значительно превышает необходимый параметр W8.

Водопоглощение бетона, модифицированного добавкой на основе наноструктурированного углерода, по результатам испытаний составляет 3%.

Показатели пористости бетона выявили по кинетике их водопоглощения, которую определяли путем непрерывного и дискретного взвешивания предварительно высушенных образцов в процессе их водопоглощения.

Показатели среднего размера пор  $\bar{\lambda}$  и однородности размера пор в бетоне  $\alpha$ , определенные по кинетике во-

допоглощения путем непрерывного и дискретного взвешивания, для образцов состава 1.7 соответственно равны:  $\bar{\lambda}=0,7$  и  $\alpha=0,4$ ;  $\bar{\lambda}=1,25$  и  $\alpha=0,42$ . Объем открытых капиллярных пор бетона в серии образцов  $P_0$  составил 4%.

#### Заключение.

Установлен оптимальный процент ввода добавки на основе наноструктурированного углерода для исследуемого состава 1.7, который обеспечивает необходимые технологические свойства бетонной смеси и физико-механические характеристики бетона, – 0,5%.

Для модифицированного бетона прочность при сжатии составила  $f_c=60,4$  МПа, прочность при растяжении  $f_{ct}=2,62$  МПа, марка по водонепроницаемости достигла W20, марка по морозостойкости превышает F500.

Анализ кинетики набора прочности свидетельствует:

- для подвижных смесей (удобоукладываемость П4–П5) модифицирование пластифицирующей добавкой позволило увеличить прочность при сжатии в возрасте 28 сут по сравнению с бездобавочным составом на 44% (72,3 МПа).
- для жестких смесей модифицирование позволило достичь прочности при сжатии в возрасте: 7 сут, равное 58,6 МПа, а в 28 сут – 72,8 МПа, что выше прочности контрольного образца на 30 и 21% соответственно.

Экспериментально доказана эффективность введения в тяжелый конструкционный бетон пластифицирующей добавки на основе наноструктурированного углерода.

Подтверждена возможность снижения цемента (до 10%) при обеспечении прочности бетона выше контрольного образца на 14,9%.

#### Список литературы

1. Эльрефаи А.Э.М.М., Пудов И.А., Яковлев Г.И., Сеньков С.А., Бурьянов А.Ф. Комбинирование добавок различного генезиса для повышения эффективности модификации цементных бетонов // *Строительные материалы*. 2017. № 1–2. С. 26–30.
2. Лукутцова Н.П., Матвеева Е.Г., Пыкин А.А., Чудакова О.А. Наномодифицированный мелкозернистый бетон. *Надежность и долговечность строительных материалов, конструкций и оснований фундаментов: Материалы V Международной научно-технической конференции*. Волгоград. 23–24 апреля 2009 г. С. 166–170.
3. Ваучский М.Н. Направленное формирование упорядоченной надмолекулярной кристаллогидратной структуры гидратированных минеральных вяжущих // *Вестник гражданских инженеров*. 2005. № 2. С. 44–47.
4. Патент РФ на изобретение № 2233254. *Композиция для получения строительных материалов* / Пономарев А.Н., Ваучский М.Н., Никитин В.А., Захаров И.Д., Прокофьев В.К., Добрица Ю.В., Заренков В.А., Шнитковский А.Ф. Заявл. 26.10.2000. Опубл. 27.07.2004.
5. Урханова Л.А., Хардаев П.К., Лхасаранов С.А. Модифицирование цементных бетонов нанодисперсными добавками // *Строительство и реконструкция*. 2015. № 3. С. 167–175.
6. Урханова Л.А., Буянтуев С.Л., Лхасаранов С.А., Хмелев А.Б., Урханова А.А. Модификация цемента и бетона углеродными наноматериалами, полученными из угольного кека // *Строительные материалы*. 2017. № 1–2. С. 19–25.
7. Хрусталеv Б.М., Яглов В.Н., Ковалев Я.Н., Романюк В.Н., Бурак Г.А., Меженцев А.А., Гуриненко Н.С.

#### References

1. Elrefaei A.E.M.M., Pudov I.A., Yakovlev G.I., Senkov S.A., Buryanov A.F. Combining additives of various genesis for enhancing modification of concrete. *Stroitel'nye Materialy* [Construction materials]. 2017. No. 1–2, pp. 26–30. (In Russian).
2. Lukuttsova, N.P., Matveeva E.G., Pykin A.A., Chudakova O.A. Nanomodified fine-grained concrete. *Reliability and durability of building materials, structures and foundations of foundations: materials of the V International Scientific and Technical Conference*. Volgograd. 2009. April 23–24, pp. 166–170. (In Russian).
3. Vauchskiy M.N. Directional formation of an ordered supramolecular crystal hydrate structure of hydrated mineral binders. *Vestnik Grazhdanskikh Inzhenerov*. 2005. No. 2, pp. 44–47. (In Russian).
4. Patent of the Russian Federation for invention No. 2233254. *Kompozitsiya dlya polucheniya stroitel'nykh materialov* [Composition for the production of building materials] Ponomarev A.N., Vauchsky M.N., Nikitin V.A., Zakharov I.D., Prokofiev V.K., Dobritsa Yu.V., Zarenkov V.A., Shnitkovskiy A.F. Declared. 10.26.2000. Published 27.07.2004. (In Russian).
5. Urkhanova, L.A. Khardaev P.K., Lkhasaranov S.A. Modification of cement concretes with nanodispersed additives. *Stroitel'stvo i Rekonstruktsiya*. 2015. No. 3, pp. 167–175. (In Russian).
6. Urkhanova L.A., Buiantuev S.L., Lkhasaranov S.A., Khmelev A.B., Urkhanova A.A. Modification of cement and concrete with carbon nanomaterials obtained from coal cake. *Stroitel'nye Materialy* [Construction materials]. 2017. No. 1–2, pp. 19–25. (In Russian).
7. Khrustalev B.M., Yaglov V.N., Kovalev YA.N., Romanuk V.N., Burak G.A., Mezhenstev A.A., Gurinen-



- Наномодифицированный бетон // *Наука и техника*. 2015. № 6. С. 3–8.
- Гритель Г.Б., Глазкова С.В. Перспективы наноструктурированного бетона в строительстве // *Бетон и железобетон*. 2011. № 6. С. 40–44.
  - Бурмистров И.Н., Ильиных И.А., Мазов И.Н., Кузнецов Д.В., Юдинцева Т.И., Кусков К.В. Физико-механические свойства композитных бетонов, модифицированных углеродными нанотрубками // *Современные проблемы науки и образования*. 2013. № 5. С. 80.
  - Патент № 2839 РБ, МПК В82В 3/00 *Установка для получения углеродных наноматериалов* / Жданок С.А., Крауклис А.В., Самцов П.П., Волжанкин В.М.; Опубл. 30.06.2006.
  - Жданок С.А. Нанотехнологии в строительном материаловедении: реальность и перспективы // *Вестник БНТУ*. 2009. № 3. С. 5–22.
  - Эберхардштайнер Й., Жданок С., Хрусталева Б., Батяновский Э., Леонович С., Самцов П. Изучение влияния наноразмерных добавок на механическое поведение цементных блоков // *Наука и техника*. 2012. № 1. С. 52–55.
  - Patent 10010 RB, МПК SO1B31/00. Method of obtaining of carbon nanomaterial. Zhdanok S.A., Solntsev A.P., Krauklis A.V. Published 31.03.2005.
  - Eberhardsteiner J., Zhdanok S., Khroustalev B., Batsianouski E., Leonovich S., Samtsou P. Characterization of the influence of carbon nanomaterials on the mechanical behavior of cement stone // *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2011. Vol. 84. No. 4, pp. 697–704.
  - ko N.S. Nanommodified concrete. *Nauka i Tekhnika*. 2015. No. 6, pp. 3–8. (In Russian).
  - Gritel' G.B., Glazkova S.V. Prospects of nanostructured concrete in construction/ *Beton i Zhelezobeton*. 2011. No. 6, pp. 40–44. (In Russian).
  - Burmistrov I.N., Il'inykh I.A., Mazov I.N., Kuznetsov D.V., Yudinseva T.I., Kuskov K.V. Physico-mechanical properties of composite concrete modified with carbon nanotubes. *Sovremennye Problemy Nauki i Obrazovaniya*. 2013. No. 5, p. 80. (In Russian).
  - Patent №2839 RB, IPC B82B 3/00 *Ustanovka dlya polucheniya uglerodnykh nanomaterialov* [Apparatus for manufacturing carbon nanomaterials]. Zhdanok S.A., Krauklis A.V., Samtsov P.P., Volzhankin V.M. Published 30.06.2006.
  - Zhdanok S.A. Nanotechnologies in Building Materials Science: reality and prospects. *Vestnik BNTU*. 2009. No. 3, pp. 5–22. (In Russian).
  - Eberhardsteiner J., Zhdanok S., Khroustalev B., Batsianouski E., Leonovich S., Samtsou P. Study of influence of nano-size additives on mechanical behaviour of cement stone. *Nauka i Tekhnika*. 2012. No. 1, pp. 52–55. (In Russian).
  - Patent 10010 RB, МПК SO1B31/00. Method of obtaining of carbon nanomaterial. Zhdanok S.A., Solntsev A.P., Krauklis A.V. Published 31.03.2005.
  - Eberhardsteiner J., Zhdanok S., Khroustalev B., Batsianouski E., Leonovich S., Samtsou P. Characterization of the influence of carbon nanomaterials on the mechanical behavior of cement stone. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2011. Vol. 84. No. 4, pp. 697–704.

г. Веймар (Германия)  
12–14 сентября 2018 г.



20. **ibausil** 12.-14.09.2018 in Weimar

F.A. Finger-Institut für Baustoffkunde | Bauhaus-Universität Weimar

Институт строительных материалов  
им. Ф.А. Фингера (FIB) университета  
Bauhaus-Universität г. Веймар (Германия)  
организует 20-й Международный конгресс  
по строительным материалам

Международный конгресс по строительным материалам IBAUSIL проводится в г. Веймаре с 1964 г. и за это время стал авторитетным форумом для научного обмена между исследователями университетов и промышленных предприятий с востока и запада.

### Основные темы конгресса

- Неорганические вяжущие вещества;
- Бетоны и долговечность бетонов;
- Стеновые строительные материалы / содержание сооружений / переработка материалов.

Официальные языки конференции – немецкий, английский

Заявки об участии с докладами в конгресс принимаются до **1 ноября 2017 г.**

Подробности вы найдете на сайте: [www.ibausil.de](http://www.ibausil.de)

[www.ibausil.de](http://www.ibausil.de)

[www.ibausil.de](http://www.ibausil.de)

[www.ibausil.de](http://www.ibausil.de)

[www.ibausil.de](http://www.ibausil.de)

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ СТРОИТЕЛЬНЫЙ  
УНИВЕРСИТЕТ

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

АГЕНТСТВО «КВИНТЕТ»

приглашают принять участие

В 18-й международной конференции  
**ВАЛТИМІХ-2018**

г. Астрахань, «Парк Инн от Рэдиссон Астрахань»  
21 – 23 августа 2018 года



**ДЕЛОВАЯ ПРОГРАММА:**

- Российский рынок ССС: итоги 2017-го, первой половины 2018, прогнозы развития
- Техника для механизации работ с применением сухих строительных смесей
- Средства и методы удешевления рецептур ССС без потери качественных характеристик
- Сухие строительные смеси для ремонта и огнезащиты строительных конструкций
- Рынок гипсовых материалов России: состояние и перспективы
- Основные тенденции в производстве ССС в России и в мире
- Сухие строительные смеси специального назначения
- Строительный рынок РФ: текущее состояние, перспективы развития
- Нормативное обеспечение сухих строительных смесей, исходного минерального сырья и вяжущих
- Новейшие технологии фасовки, паллетирования и упаковки ССС

По всем вопросам, связанным с участием в конференции, обращайтесь:

Мария Сулова (прием заявок на участие в конференции, реклама), [msuslova@baltimix.ru](mailto:msuslova@baltimix.ru)

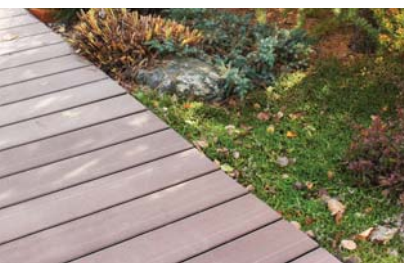
Евгений Беяев (прием на рассмотрение докладов), [ebelyaev@baltimix.ru](mailto:ebelyaev@baltimix.ru)

Тел./факс: +7 (812) 703-10-19

[www.baltimix.ru](http://www.baltimix.ru), [www.baltimix-tour.ru](http://www.baltimix-tour.ru)



Постройте лучшую  
загородную террасу!



**SAVEWOOD**

Лучше, чем дерево



**крупнейший российский производитель  
изделий из древесно-полимерного композита**

террасная доска | сайдинг | декоративные ограждения | заборы | ступени | универсальные профили

+7 (499) 281 61 94  
info@savewood.ru  
www.savewood.ru

г. Москва,  
ул. Озерная, 42