

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

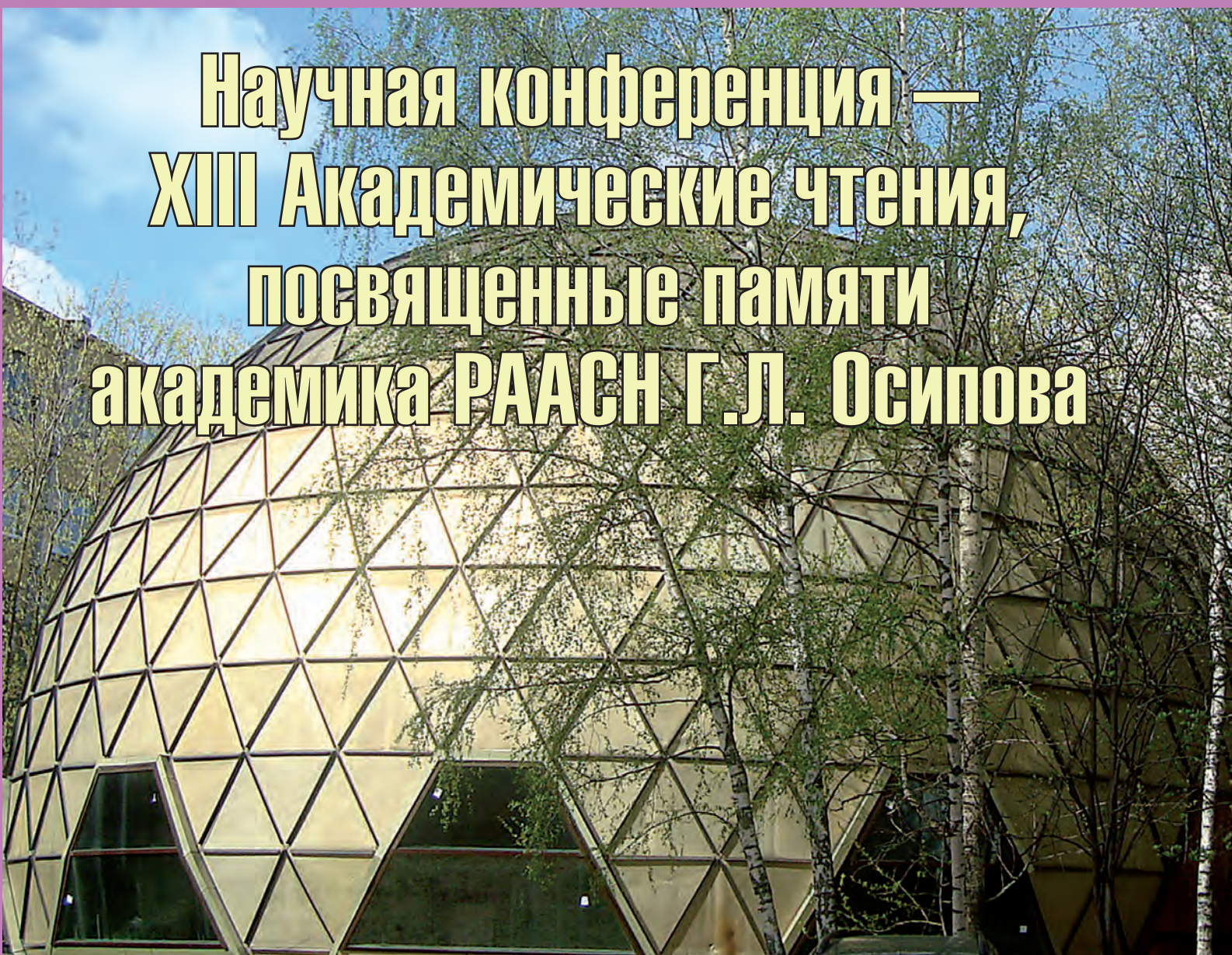
Stroitel'nye Materialy [Construction Materials]

ISSN 0585-430X (Print)

ISSN 2658-6991 (Online)



НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ ИЗДАЕТСЯ С 1955 г. WWW.RIFSM.RU WWW.JOURNAL-CM.RU ИЮНЬ 2022 г. (803)



Научная конференция —  
XIII Академические чтения,  
посвященные памяти  
академика РААСН Г.Л. Осипова

*«Актуальные вопросы строительной физики.  
Энергосбережение.  
Надежность строительных конструкций  
и экологическая безопасность»*



# ООО «БлокПластБетон» — ВЕДУЩИЙ ПРОИЗВОДИТЕЛЬ ТЕПЛОГО БЕТОНА



**Быстровозводимые энергоэффективные дома.** Преимущества технологии строительства из крупноформатных полистиролбетонных панелей с системой паз-гребень по сравнению с обычной каменной кладкой заключаются в скорости, качестве, безопасности и надежности. Такие дома не требуют утепления и прослужат более ста лет. Подробнее с технологией можно ознакомиться в статье, опубликованной в этом номере журнала.



**Стеновые полистиролбетонные блоки** – технологичный энергоэффективный строительный материал. Он позволяет возводить теплые и долговечные здания без применения дополнительных утеплителей. Применение полистиролбетонных изделий позволяет существенно экономить при строительстве. Стеновые блоки из теплого бетона предназначены для устройства теплоэффективных наружных стен зданий различного назначения в жилищном, гражданском и промышленном строительстве. Полистиролбетон включен в национальный перечень энергоэффективных материалов промышленного производства.



**Полистиролбетонные армированные перемычки** применяются в кладке наружных стен над оконными, дверными и другими проемами. Используются в кладке ограждающих конструкций зданий не только из полистиролбетона, но и из других ячеистых бетонов, кирпича, теплой керамики и т. п. Выполняют как конструкционную, так и теплоизоляционную функции, несут нагрузку от собственной массы и массы блоков, лежащих над перекрываемыми проемами. Широкий размерный ряд, невысокая стоимость и короткий производственный цикл позволяют получить дополнительную экономию времени и средств при строительстве.



**Сухая полистиролбетонная смесь ТЕПЛЫЙ БЕТОН** выпускается в строгом соответствии с нормативной документацией. Благодаря отработанной рецептуре готовую полистиролбетонную смесь можно с легкостью приготовить и использовать в любых условиях строительства для утепления, шумоизоляции, стяжки и изготовления конструктивных элементов. Выпускается смесь различной плотности от  $D150 \text{ кг/м}^3$  до  $D600 \text{ кг/м}^3$ .

*Специалисты ООО «БлокПластБетон»  
выполняют строительно-монтажные работы «под ключ»  
и оказывают услуги по проектированию.*

*Проекты отличаются точной проработкой всех конструктивных систем и планировочных решений. Специалисты нашей компании готовы разработать проект дома с учетом всех пожеланий и возможностей заказчиков.*

*Дома из энергоэффективных крупноформатных полистиролбетонных панелей могут выполняться в любом архитектурном стиле.*

## ООО «БлокПластБетон»

Московская область, г. Королев, ул. Марины Цветаевой, 1

Наши специалисты знакомят вас с производимыми материалами и услугами, предоставят полную консультацию, ответят на все вопросы

Тел.: 8 (498) 719-09-99  
e-mail: info@bpb.su

8 (495) 988-50-61  
www.blokplastbeton.ru

Учредитель: ООО РИФ «СТРОЙМАТЕРИАЛЫ»,  
Адрес: 125319, г. Москва, ул. Черняховского,  
д. 9, корп. 1, кв. 1  
Издатель: ООО РИФ «СТРОЙМАТЕРИАЛЫ»  
Адрес: 125319, г. Москва, ул. Черняховского,  
д. 9, корп. 1, кв. 1  
Свид. о регистрации ПИ № 77–1989  
ISSN 0585-430X (Print) ISSN 2658-6991 (Online)  
Входит в Перечень ВАК, РИНЦ,  
Russian Science Citation Index  
на платформе Web of Science  
Адрес редакции: Россия, 127434, г. Москва,  
Дмитровское ш., д. 9, стр. 3

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

# СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ®

№ 6

Основан в 1955 г.

(803) Июнь 2022 г.

Тел.: (499) 976-22-08, (499) 976-20-36 mail@rifsm.ru; www.rifsm.ru; www.journal-cm.ru

**Научная конференция – XIII Академические чтения, посвященные памяти академика РААСН Осипова Г.Л., «Актуальные вопросы строительной физики. Энергосбережение. Надежность строительных конструкций и экологическая безопасность»**

С.Н. КАРПЕНКО, И.Г. ЧЕПИЗУБОВ, Г.А. МОИСЕЕНКО

**Изменение модулей деформации муфтовых соединений арматуры при циклическом нагружении ..... 4**

В.И. РИМШИН, М.Н. СЕМЕНОВА, И.Л. ШУБИН, А.Л. КРИШАН, М.А. АСТАФЬЕВА

**Исследования несущей способности внецентренно сжатых сталебетонных колонн ..... 8**

В.Н. ЯРМАКОВСКИЙ, Д.З. КАДИЕВ

**Физико-химические основы создания особо легких бетонов новых модификаций с высокими показателями теплотехнического качества ..... 15**

Р.С. ПОУДЕЛ, И.В. БЕССОНОВ, А.Д. ЖУКОВ, П.К. ГУДКОВ, Э.А. ГОРБУНОВА, Е.Д. МИХАЙЛИК

**Цифровые методы оптимизации составов бетонного полотна ..... 20**

И.В. БЕССОНОВ, А.Д. ЖУКОВ, П.М. ЖУК, Б.А. ДЕМИССИ, И.С. ГОВРЯКОВ, А.М. МИНАЕВА

**Вулканический туф как активная минеральная добавка для портландцемента ..... 25**

П.П. ПАСТУШКОВ, В.Г. ГАГАРИН, Д.А. ИЛЬИН, И.Ф. НАГАЕВ

**Новые результаты по исследованиям изменения теплопроводности с течением времени плит из пенополиизоцианурата (PIR) современного производства ..... 30**

Х.А. ЩИРЖЕЦКИЙ, А.В. ПЕРЕТОКИН

**Расчет индекса фанатской поддержки при акустическом проектировании крупных спортивных сооружений ..... 35**

Д.В. ЧУГУНКОВ, Е.А. ЖУРАВЛЕВ, М.Ю. ЛЕШКО

**Применение объемных элементов звукопоглощения в диссипативных пластинчатых глушителях шума ..... 41**

Х.А. ЩИРЖЕЦКИЙ, В.М. АЛЕШКИН

**Аналитический расчет меры высоты — нового объективного критерия акустики храмовых зданий и сооружений ..... 47**

## Материалы и технологии

Е.В. РУМЯНЦЕВ, А.Х. БАЙБУРИН

**Особенности применения самоуплотняющихся мелкозернистых бетонных смесей при зимнем бетонировании стыков ..... 51**

Д.Г. ЗЮКИН

**Крупноформатные полистиролбетонные панели — залог успешного строительства ..... 58**

В.В. СТРОКОВА, В.В. НЕЛЮБОВА, Н.О. ХМАРА, А.И. БУКОВЦОВА, Ю.В. ДЕНИСОВА

**Вспученный перлитовый песок как эффективная добавка к вяжущему ..... 61**

Г.В. КУЗНЕЦОВА, Н.Н. УСМАНОВ, Д.И. МИФТАХОВА, Н.Э. КАДЫРОВА

**Исследование влияния группы песка на структуру песочных смесей в производстве прессованных изделий ..... 67**

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»  
Address: 1, 9 Bldg. 1, Chernyakhovskogo Street,  
Moscow, 125319, Russian Federation  
Publisher: «STROYMATERIALY»  
Advertising-Publishing Firm, OOO  
Address: 1, 9 Bldg. 1, Chernyakhovskogo Street,  
Moscow, 125319, Russian Federation  
Registration certificate PI № 77–1989  
ISSN 0585-430X (Print) ISSN 2658-6991 (Online)  
Included in the list of journals of the Higher  
Attestation Commission (Russia), Russian Science  
Citation Index on the platform Web of Science  
Editorial address: 9/3 Dmitrovskoye Highway,  
127434, Moscow, Russian Federation

Monthly scientific-technical and industrial journal

# STROITEL'NYE MATERIALY®

№ 6

Founded in 1955 (803) June 2022

Tel.: (499) 976-22-08, (499) 976-20-36 mail@rifsm.ru; www.rifsm.ru; www.journal-cm.ru

**Scientific Conference – XIII Academic readings dedicated to the memory  
of Academician of RAACS Osipov G.L. "Actual problems of building physics.  
Energy saving. Reliability of building structures and environmental safety"**

S.N. KARPENKO, I.G. CHEPIZUBOV, G.A. MOISEENKO

**Changing the Deformation Modules of the Coupling Joints of Reinforcement During Cyclic Loading ..... 4**

V.I. RIMSHIN, M.N. SEMENOVA, I.L. SHUBIN, A.L. KRISHAN, M.A. ASTAFIEVA

**Studies of the Bearing Capacity of Non-Centrally Compressed Steel-Tube Concrete Columns. .... 8**

V.N. YARMAKOVSKY, D.Z. KADIEV

**Physical-Chemical Bases for the Creation of Extra-Light Concretes of New Modifications  
with High Rates of Thermal Engineering Quality ..... 15**

R.S. POUDEL, I.V. BESSONOV, A.D. ZHUKOV, P.K. GUDKOV, E.A. GORBUNOVA, E.D. MIHAYLIK

**Digital Methods for Optimizing Textile Concrete Technology ..... 20**

I.V. BESSONOV, A.D. ZHUKOV, P.M. ZHUK, B.A. DEMISSI, I.S. GOVRYAKOV, A.M. MINAEVA

**Volcanic Tuff as an Active Mineral Additive for Portland Cement ..... 25**

P.P. PASTUSHKOV, V.G. GAGARIN, D.A. IL'IN, I.F. NAGAEV

**New Results on Research on Changes in Thermal Conductivity Over Time of Plates Made  
of Polyisocyanurate Foam (PIR) of Modern Production ..... 30**

Kh.A. SHCHIRZHETSKII, A.V. PERETOKIN

**Calculation of the Fan Support Index in the Acoustic Design of Large Sports Facilities ..... 35**

D.V. CHUGUNKOV, E.A. ZHURAVLEV, M.Yu. LESHKO

**The Use of Volumetric Sound Absorption Elements in Dissipative Plate Noise Silencers. .... 41**

Kh.A. SHCHIRZHETSKII, V.M. ALESHKIN

**Analytical Calculation of the Height Measure – a New Objective Criterion  
for the Acoustics of Temple Buildings and Structures ..... 47**

## Materials and technologies

E.V. RUMYANTSEV, A.Kh. BAYBURIN

**The Features of Using Self-Compacting Fine-Grained Fresh Concrete during Winter Concreting of Joints. .... 51**

D.G. ZYUKIN

**Large-Format Polystyrene Concrete Panels – the Key to Successful Construction. .... 58**

V.V. STROKOVA, V.V. NELYUBOVA, N.O. KHMARA, A.I. BUKOVSOVA, Yu.V. DENISOVA

**Expanded Perlite Sand as an Effective Binder Additive ..... 61**

G.V. KUZNETSOVA, N.N. USMANOV, D.I. MIFTAHOVA, N.E. KADYROVA

**Investigation of the Influence of the Sand Group on the Structure of Sand Mixtures  
in the Production of Pressed Products. .... 67**

**Главный редактор:**

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

**Председатель редакционного совета:**

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

**АЙЗЕНШТАДТ А.М.,**  
д-р хим. наук, профессор (Архангельск)

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

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

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

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

**ЕРОФЕЕВ В.Т.,**  
д-р техн. наук, профессор, академик РААСН (Саранск)

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

**КОТЛЯР В.Д.,**  
д-р техн. наук, профессор (Ростов-на-Дону)

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

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

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

**МУРТАЗАЕВ С.-А.Ю.,**  
д-р техн. наук, профессор (Грозный)

**НЕДОСЕКО И.В.,**  
д-р техн. наук (Уфа)

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

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

**РУДАКОВ О.Б.,**  
д-р хим. наук, профессор (Воронеж)

**ТРАВУШ В.И.,**  
д-р техн. наук, академик РААСН (Москва)

**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)

**ШЕБЛ С.М.,**  
д-р наук, профессор (Египет)

**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)

**Ю ЖЯНГМЯО,**  
д-р философии (Китай, Гуанчжоу)

**Editor-in-chief**

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

**Chairman of Editorial Board**

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

**AYZENSHTADT A.,**  
Doctor of Sciences (Chemistry), Professor (Arkhangelsk)

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

**BURYANOV A.,**  
Doctor of Science (Engineering), Director of the Russian Association of gypsum (Moscow)

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

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

**EROFEEV V.,**  
Doctor of Science (Engineering), Professor, Academician of RAACS (Saratov)

**KOROLEV E.,**  
Doctor of Science (Engineering), Professor (St. Petersburg)

**KOTLYAR V.,**  
Doctor of Science (Engineering), Professor (Rostov-on-Don)

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

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

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

**MURTAZAEV S.-A.,**  
Doctor of Science (Engineering), Professor (Grozniy)

**NEDOSEKO I.,**  
Doctor of Science (Engineering) (Ufa, Bashkortostan)

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

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

**RUDAKOV O.B.,**  
Doctor of Sciences (Chemistry), professor (Voronezh)

**TRAVUSH V.,**  
Doctor of Science (Engineering), academician of RAACS (Moscow)

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

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

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

**SHEBL S.M.,**  
Doctor of Science, Professor (Egypt)

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

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

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

**YU JIANGMIAO,**  
PhD / Associate Professor (China, Guangzhou)

С.Н. КАРПЕНКО, д-р техн. наук (niisf\_lab9@mail.ru), И.Г. ЧЕПИЗУБОВ, канд. техн. наук (niisf\_lab9@mail.ru), Г.А. МОИСЕЕНКО, ведущий инженер (gecklock@yandex.ru)

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

## Изменение модулей деформации муфтовых соединений арматуры при циклическом нагружении

В настоящее время в практику расчета и проектирования железобетонных конструкций по двум группам предельных состояний все в большей степени начинает входить диаграммный метод наиболее точный. В основу этого метода должны закладываться реальные диаграммы деформирования арматуры и бетона при расчете железобетонных конструкций. Это относится в том числе к расчету железобетонных элементов в местах установки стыковых соединений арматуры. Однако данный вопрос требует дополнительных исследований как с экспериментальной, так и с теоретической точки зрения, в частности необходимо выявить влияние циклического нагружения на диаграммы деформирования арматуры. Кроме того, требует исследований вопрос построения универсальной зависимости для диаграмм деформирования различных классов арматуры и ее стыковых соединений в секущих модулях. Такой вид зависимости представляется наиболее приемлемым для диаграммного метода расчета. В настоящей статье рассматривается изменение модулей деформации муфтовых стыковых соединений арматуры и цельных арматурных стержней при среднецикловом нагружении (до 100000 циклов) в линейной стадии деформирования арматуры класса А500 в диапазоне изменения напряжений от 150 до 300 МПа. Анализируются экспериментальные исследования, проведенные в НИИ строительной физики. Предложено развитие диаграммной методики расчета муфтовых соединений арматуры с учетом полученных изменений их модулей деформации.

**Ключевые слова:** арматура, муфтовое соединение арматуры на резьбе, циклическое нагружение, модуль деформации, диаграммная методика.

**Для цитирования:** Карпенко С.Н., Чепизубов И.Г., Моисеенко Г.А. Изменение модулей деформации муфтовых соединений арматуры при циклическом нагружении // *Строительные материалы*. 2022. № 6. С. 4–7. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-803-6-4-7>

S.N. KARPENKO, Doctor of Sciences (Engineering) (niisf\_lab9@mail.ru), I.G. CHEPIZUBOV, Candidate of Sciences (Engineering) (niisf\_lab9@mail.ru), G.A. MOISEENKO, Lead Engineer (gecklock@yandex.ru)  
Research Institute of Building Physics Russian Academy Architecture and Construction sciences (21, Lokomotivny Driveway, Moscow, 127238, Russian Federation)

### Changing the Deformation Modules of the Coupling Joints of Reinforcement During Cyclic Loading

Currently, the practice of calculating and designing reinforced concrete structures for two groups of limit states is increasingly beginning to include the diagrammatic method, which is considered the most accurate. This method should be based on real diagrams of reinforcement and concrete deformation when calculating reinforced concrete structures. The above applies, among other things, to the calculation of reinforced concrete elements in the places of installation of coupling joints of reinforcement. However, this issue requires additional research both from an experimental and theoretical point of view, in particular, it is necessary to identify the effect of cyclic loading on the deformation diagrams of the reinforcement. In addition, the issue of constructing a universal dependence for deformation diagrams of various classes of reinforcement and its coupling joints in secant modules requires research. This type of dependence seems to be the most acceptable for the diagram calculation method. This article discusses the change in the deformation modules of coupling joints of reinforcement and solid reinforcement rods under medium cycle loading (up to 100,000 cycles) in the linear stage of deformation of class A500 reinforcement in the stress range from 150 MPa to 300 MPa. The experimental studies conducted at the Research Institute of Construction Physics are analyzed. The development of a diagrammatic methodology for calculating coupling joints is proposed, taking into account the changes in their deformation modules.

**Keywords:** reinforcement, threaded coupling joint of reinforcement, cyclic loading, modulus of deformation, diagram method.

**For citation:** Karpenko S.N., Chepizubov I.G., Moiseenko G.A. Changing the deformation modules of the coupling joints of reinforcement during cyclic loading. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2022. No. 6, pp. 4–7. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-803-6-4-7>

В настоящее время на строительных площадках Российской Федерации все большее применение находят механические соединения арматуры при помощи муфт на резьбе взамен ранее применявшихся соединений стержней внахлестку или соединений арматуры с помощью ванной сварки. Поставщиками таких муфт выступают как различные зарубежные фирмы (LENTON, «Dextra», «Hebei Yada reinforcing Bar Connecting Technology Co.»), так и российские производители (CONCON, «Энерпром», «Rollcon»). При этом многие железобетонные конструкции в процессе эксплуатации зданий и сооружений испыты-

вают воздействие периодически изменяющихся нагрузок (снеговых, ветровых, нагрузок от подвижного транспорта), т. е. работают в условиях циклического нагружения. Циклическому нагружению могут подвергаться железобетонные конструкции в определенных заводских условиях.

Работа железобетонных конструкций при циклическом нагружении изучалась во многих исследованиях. Различные аспекты поведения железобетонных конструкций под циклической и усталостной нагрузкой рассматривались в [1–9]. Применение диаграммного подхода при малоцикловом нагруже-

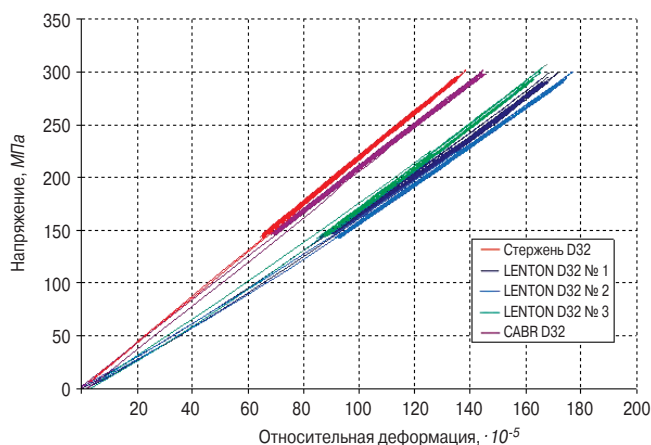


Рис. 1. Опытные диаграммы деформирования арматурного стержня и муфтовых соединений при циклическом нагружении

Fig. 1. Experimental diagrams of deformation of the reinforcing bar and coupling joints under cyclic loading

нии железобетонных конструкций использовалось в [10–11]. В работе [12] были обобщены результаты экспериментальных исследований работы муфтовых соединений арматуры в сравнении с цельным стержнем. В исследовании [13] рассматривалась работа муфтовых соединений при малоцикловом нагружении. Однако картина влияния фактора средне- и многоциклического нагружения на деформативность муфтовых соединений арматуры еще требует изучения и дополнения.

Согласно требованиям российских норм несущая способность конструкций с резьбовыми механическими соединениями арматуры не должна быть ниже несущей способности аналогичных конструкций, армированных цельными стержнями. Выполнимость этого требования позволяет осуществить диаграммная методика определения прочности резьбовых механических соединений. Диаграммы деформирования резьбовых механических соединений отличаются от диаграмм деформирования цельных арматурных стержней, что сказывается на несущей способности железобетонных конструкций с резьбовыми механическими соединениями. Диаграммная методика позволяет определить коэффициенты условия работы, понижающие прочность и повышающие деформативность резьбового механического соединения. Значения этих коэффициентов необходимо учитывать при проектировании.

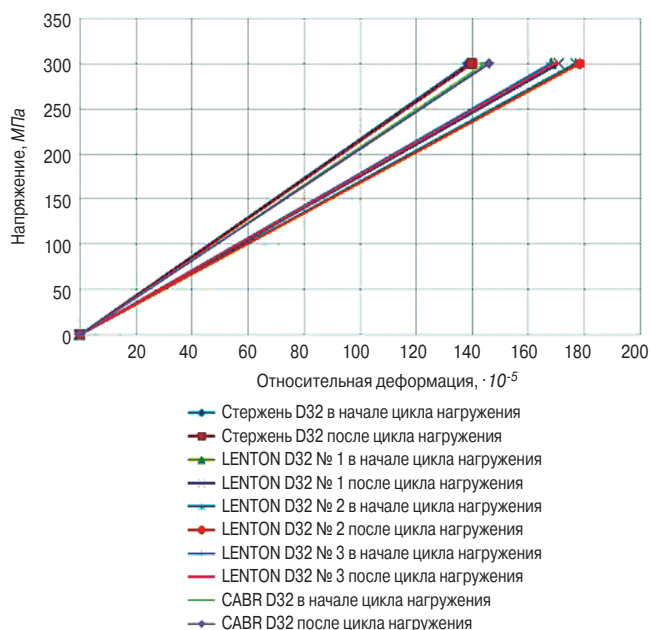


Рис. 2. Расчетные диаграммы деформирования арматурного стержня и муфтовых соединений при циклическом нагружении

Fig. 2. Calculated diagrams of deformation of the reinforcing bar and coupling joints under cyclic loading

Целью представленной работы явилось определение различий диаграмм деформирования резьбовых механических соединений по сравнению с диаграммами деформирования цельных арматурных стержней с учетом изменения модулей деформации при циклическом нагружении и уточнении на основании этого диаграммной методики оценки прочности железобетонных конструкций с резьбовыми механическими соединениями арматуры при воздействии циклического нагружения.

#### Описание и анализ экспериментальных исследований

Анализ экспериментальных исследований муфтовых стыков арматуры дает возможность оценить качество резьбовых механических соединений на основе сопоставления диаграмм деформирования резьбового механического соединения и целого стержня; выявить резервы прочности стыков арматуры при помощи муфт на резьбе путем сопоставления их диаграмм с диаграммами деформирования цельных стержней; определить характеристики резьбовых механических соединений, их преимущества и недостатки. Представим анализ экспериментальных ис-

Таблица 1  
Table 1

Значения модулей деформации в начале и в конце циклов нагружения  
Values of deformation modules at the beginning and at the end of loading cycles

Диаметр арматуры	Наименование образца	Модули деформации образцов в начале циклического нагружения ( $E_{s1}$ ) в МПа	Модули деформации образцов после 100000 циклов нагружения ( $E_{s2}$ ) в МПа
∅32 A500	Арматурный стержень	$2,165 \cdot 10^5 (E_s)$	$2,147 \cdot 10^5$
	LENTON № 1	$1,781 \cdot 10^5$	$1,755 \cdot 10^5$
	LENTON № 2	$1,699 \cdot 10^5$	$1,683 \cdot 10^5$
	LENTON № 3	$1,792 \cdot 10^5$	$1,771 \cdot 10^5$
	CABR	$2,075 \cdot 10^5$	$2,055 \cdot 10^5$

Таблица 2  
Table 2

Отношение модулей стыковых соединений к начальному модулю стержня  
The ratio of butt joint modules to the initial module of the rod

Диаметр арматуры	Наименование образца	Отношение модулей к начальному модулю арматуры	
		в начале циклического нагружения	в конце циклического нагружения
∅32 500	Арматурный стержень	1	0,992
	LENTON № 1	0,823	0,81
	LENTON № 2	0,785	0,777
	LENTON № 3	0,828	0,777
	CABR	0,958	0,949

следований при среднецикловом нагружении до 100000 циклов [14], включающих диаграммы деформирования цельных стержней арматуры А500С с  $R_{Sm}=500$  МПа и аналогичных стержней с муфтовыми соединениями LENTON и CABR, которые нашли широкое применение в Российской Федерации. Характер деформирования цельного стержня и стыковых соединений в процессе циклического нагружения представлен на рис. 1.

Работа состоит из двух этапов. На первом этапе определяются модули деформации цельного арматурного стержня и муфтовых соединений в начале циклического нагружения, а на втором этапе эти определения повторяются на каждом цикле нагружения. Значения модулей деформации приведены в табл. 1. При этом приводятся модули деформации в начале циклов нагружения ( $E_{s1}$ ) и в конце циклов нагружения ( $E_{s2}$ ). Для исследования используется арматура А500С диаметром 32 мм в соответствии с ГОСТ 34028–2016 «Прокат арматурный для железобетонных конструкций. Технические условия», три вида стыковых соединений LENTON (образцы № 1, 2 и 3) и стыковое соединения CABR.

Расчетные диаграммы деформирования, построенные по указанным в табл. 1 модулям для начала и конца циклического нагружения, представлены на рис. 2.

Отношения модулей в двух вариантах – в начале и в конце циклов нагружения – стыковых соединений к начальному модулю цельного стержня приведены в табл. 2.

Согласно табл. 2 наибольшее уменьшение модуля деформации муфтовых соединений по сравнению с модулем цельного стержня происходит в начале циклического нагружения. Для муфтовых соединений LENTON модуль уменьшается на 17,7–21,5% по сравнению с начальным модулем арматуры, а после циклического нагружения это изменение составляет 19–22,3%. Для муфтовых соединений CABR указанное уменьшение модуля составляет 4,2–5,1%. Таким образом, наибольшее изменение модуля для муфтовых стыков арматуры происходит в начале циклического нагружения. В процессе циклического нагружения это изменение является незначительным (около 1–4%) и зависит от фирменного знака стыкового соединения.

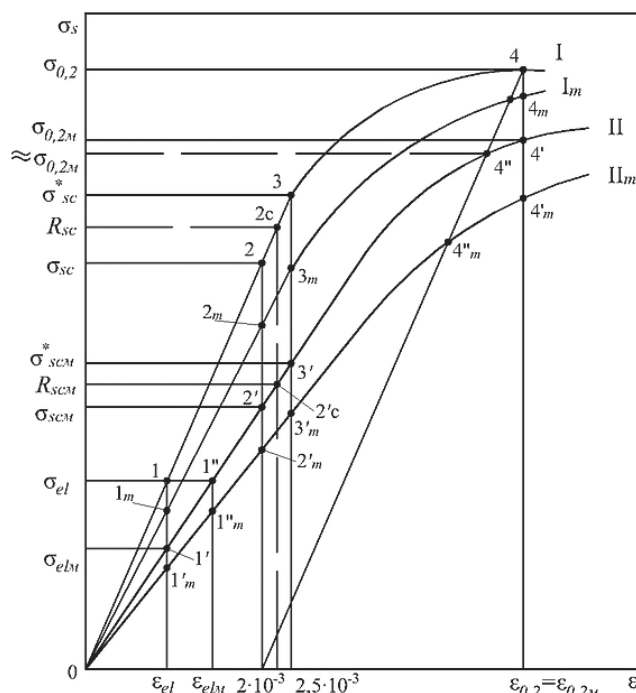


Рис. 3. Полные диаграммы деформирования арматуры при однократном (I) и циклическом ( $I_m$ ) нагружении, а также муфтовых соединений при аналогичных нагружениях (II и  $II_m$ )  
Fig. 3. Complete diagrams of reinforcement deformation under single (I) and cyclic ( $I_m$ ) loading, as well as coupling connections under similar loads (II and  $II_m$ )

#### Развитие диаграммного метода расчета

Представленные выше экспериментальные исследования относятся к среднецикловым нагружениям в упругой стадии деформирования арматуры. При многоцикловых нагружениях влияние циклического нагружения на деформации будет возрастать. Также указанное влияние циклического нагружения будет возрастать, если верхний уровень напряжений будет приближаться к началу развития пластических деформаций. В связи с этим для общего диаграммного метода расчета конструкций необходимо иметь четыре вида диаграмм (рис. 3). Первый вид диаграмм строится для исходного состояния арматуры (диаграмма I на рис. 3), второй – для стыкового соединения до начала циклического нагружения (диаграмма II на рис. 3), третий и четвертый виды диаграмм ( $I_m$  и  $II_m$  на рис. 3) строятся с учетом соответствующего циклического нагружения.



### Вывод

При расчете железобетонных конструкций, подвергающихся многократному циклическому воздействию диаграммным методом, должны использоваться четыре вида диаграмм: диаграммы цельного стержня до циклического и в конце циклического воздействия, а также аналогичные диаграммы деформирования муфтовых соединений арматуры до начала и в конце циклического воздействия. Анализ экспериментальных исследований свидетельствует, что при среднецикловых нагрузениях диаграммы циклического нагружения могут отождествляться с исходными диаграммами арматуры и стыковых соединений.

### Список литературы / References

- Liang J., Nie X., Masud M., Li J., Mo Y. L. A study on the simulation method for fatigue damage behavior of reinforced concrete structures. *Engineering Structures*. 2017. No. 150, pp. 25–38.
- Luo X., Tan Z., Chen Y. F., Wang Y. Comparative study on fatigue behavior between unbounded prestressed and ordinary reinforced reactive powder concrete beams. *Materialpruefung. Materials Testing*. 2019. No. 4 (61), pp. 323–328.
- Mirsayapov Ilshat T. Detection of stress concentration regions in cyclic loading by the heat monitoring method. *Mechanics of Solids*. 2010. No. 1 (45), pp. 133–139.
- Song L., Fan Z., Hou J. Experimental and analytical investigation of the fatigue flexural behavior of corroded reinforced concrete beams. *International Journal of Concrete Structures and Materials*. 2019. No. 1 (13).
- Zhang G., Zhang Y., Zhou Y. Fatigue tests of concrete slabs reinforced with stainless steel bars. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2018. No. 1.
- Мирсаяпов И.Т. Усталостное сопротивление изгибаемых элементов действию поперечных сил при средних пролетах среза // *Бетон и железобетон*. 2006. № 3. С. 23–25.
- Mirsayapov I.T. Fatigue resistance of bending elements to the action of transverse forces at average cross-section spans. *Beton i Zhelezobeton [Concrete and reinforced concrete]*. 2006. No. 3, pp. 23–25. (In Russian).
- Мирсаяпов И.Т., Тамразян А.Г. К разработке научных основ теории выносливости железобетонных конструкций // *Промышленное и гражданское строительство*. 2017. № 1. С. 50–56.
- Mirsayapov I.T., Tamrazyan A.G. On develop the scientific basis of the theory of endurance of reinforced concrete structures. *Promishlennoye i grajdanskoye stroitelstvo*. 2017. No. 1, pp. 50–56. (In Russian).
- Mirsayapov I.T. A study of stress concentration zones under cyclic loading by thermal imaging method. *Strength of Materials*. 2009. No. 3 (41), pp. 339–344.
- Zhang C., Duan P., Zheng B., Li M. Numerical analysis of diaphragm fatigue of reinforced concrete simply supported T-beams. *Journal of Engineering Science and Technology Review*. 2018. No. 5 (11), pp. 193–201.
- Ерышев В.А., Тошин Д.С. Диаграмма деформирования бетона при многократных повторных нагружениях // *Известия вузов. Строительство и архитектура*. 2005. № 10. С. 109–114.
- Yeryshev V.A., Toshin D.S. Diagram of concrete deformation under multiple repeated loadings. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo i Arhitektura*. 2005. No. 10, pp. 109–114. (In Russian).
- Карпенко Н.И., Ерышев В.А., Латышева Е.В. К построению диаграмм деформирования бетона повторными нагрузками сжатия при постоянных уровнях напряжений // *Строительные материалы*. 2013. № 6. С. 48–52.
- Karpenko N.I., Yeryshev V.A., Latysheva E.V. On the construction of diagrams of concrete deformation by repeated compression loads at constant stress levels. *Stroitel'nye Materialy [Construction Materials]*. 2013. No. 6, pp. 48–52. (In Russian).
- Карпенко С.Н., Чепизубов И.Г., Шифрин К.С. О результатах проверки прочности муфтовых соединений арматуры на резьбе по диаграммной методике // *Промышленное и гражданское строительство*. 2008. № 11. С. 44–46.
- Karpenko S.N., Chepizubov I.G., Shifrin K.S. On the results of checking the strength of the coupling joints of reinforcement on the thread according to the diagram method. *Promyshlennoe i grajdanskoye stroitel'stvo*. 2008. No. 11, pp. 44–46. (In Russian).
- Карпенко С.Н., Чепизубов И.Г., Андрианов А.А. Определение деформативности муфтовых соединений арматуры при среднецикловом нагружении (до 100000 циклов). *Фундаментальные исследования РААСН по научному обеспечению развития архитектуры, градостроительства и строительной отрасли Российской Федерации в 2012 году: Сборник научных трудов*. Волгоград, 2013. С. 361–363.
- Karpenko S.N., Chepizubov I.G., Andrianov A.A. Determination of deformability of the coupling joints of reinforcement under medium cycle loading (up to 100,000 cycles). *Fundamental research of the RAASN on scientific support for the development of architecture, urban planning and the construction industry of the Russian Federation in 2012. Collection of scientific papers*. Volgograd. 2013, pp. 361–363. (In Russian).
- Карпенко С.Н., Чепизубов И.Г. Определение деформативности и прочности муфтовых соединений арматуры при циклическом нагружении. *Вестник Отделения строительных наук Российской академии архитектуры и строительных наук*. 2009. № 3. С. 147–151.
- Karpenko S.N., Chepizubov I.G. Determination of deformability and strength of the coupling joints of reinforcement under cyclic loading. *Bulletin of the Department of Construction Sciences of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences*. 2009. No. 3, pp. 147–151. (In Russian).

УДК 691.328

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-803-6-8-14>

В.И. РИМШИН<sup>1,2</sup>, д-р техн. наук (v.rimshin@niisf.ru);  
М.Н. СЕМЕНОВА<sup>1</sup>, инженер (lor267gg@yandex.ru);  
И.Л. ШУБИН<sup>1</sup>, д-р техн. наук (shuig@mail.ru);  
А.Л. КРИШАН<sup>3</sup>, профессор, д-р техн. наук (kris\_al@mail.ru);  
М.А. АСТАФЬЕВА<sup>3</sup>, канд. техн. наук (skymanika@mail.ru)

<sup>1</sup> Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук (127238, г. Москва, Локомотивный пр., 21)

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

<sup>3</sup> Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова (455000, г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38)

## Исследования несущей способности внецентренно сжатых сталетрубобетонных колонн

Широкое применение конструкций из сталетрубобетонных колонн (СТБК) в настоящее время сдерживается отсутствием достоверного метода расчета их несущей способности, адекватно учитывающего основные особенности напряженно-деформированного состояния бетонного ядра и стальной оболочки. Мировые тенденции в области разработки методов расчета прочности СТБК аналогичны. Предлагаемые методы расчета несущей способности нормативных документов ряда стран – Австралии, Бразилии, Индии, Канады, КНР, США, Японии и др., а также общеевропейские нормы, по существу, основаны на эмпирических формулах. Поэтому они имеют существенные ограничения по области применения. Во-первых, эти формулы справедливы только для тяжелого бетона. Для композитных элементов из других видов бетона, например мелкозернистых, они дают недостоверные результаты. Во-вторых, их использование часто приводит к значительным погрешностям при определении несущей способности сжатых элементов с большими размерами поперечного сечения (500 мм и более). Кроме того, отсутствует возможность выполнить расчеты внецентренно сжатых композитных элементов, имеющих какие-либо отличия от «классической» конструкции. Вследствие этого проблема разработки теоретических основ оценки силового сопротивления СТБК с учетом основных особенностей напряженно-деформированного состояния бетона и стали актуальна. Для достижения поставленной цели выполнены экспериментальные исследования несущей способности внецентренно сжатых лабораторных образцов СТБК круглого поперечного сечения, изготовленных из бетона средней и высокой прочности.

**Ключевые слова:** конструкции, сталебетонные колонны, деформированное состояние, несущая способность, внецентренно сжатый образец, бетонное ядро, стальная оболочка.

**Для цитирования:** Римшин В.И., Семенова М.Н., Шубин И.Л., Кришан А.Л., Астафьева М.А. Исследования несущей способности внецентренно сжатых сталетрубобетонных колонн // *Строительные материалы*. 2022. № 6. С. 8–14.

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-803-6-8-14>

V.I. RIMSHIN<sup>1,2</sup>, Doctor of Sciences (Engineering) (v.rimshin@niisf.ru );  
M.N. SEMENOVA<sup>1</sup>, Engineer (lor267gg@yandex.ru);  
I.L. SHUBIN<sup>1</sup>, Doctor of Sciences (Engineering) (shuig@mail.ru);  
A.L. KRISHAN<sup>3</sup>, Doctor of Sciences (Engineering) (kris\_al@mail.ru );  
M.A. ASTAFIEVA<sup>3</sup>, Candidate of Sciences (Engineering) (skymanika@mail.ru)

<sup>1</sup> Research Institute of Building Physics, Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (21, Lokomotivny Driveway, Moscow, 127238, Russian Federation)

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

<sup>3</sup> Novos Magnitogorsk State Technical University (38, Lenin Avenue, Magnitogorsk, 455000, Russian Federation)

### Studies of the Bearing Capacity of Non-Centrally Compressed Steel-Tube Concrete Columns

The widespread use of structures made of steel-tube concrete columns (STBC) is currently constrained by the lack of a reliable method for calculating their bearing capacity, adequately taking into account the main features of the stress-strain state of the concrete core and steel shell. World trends in the development of methods for calculating the strength of STBR are similar. The proposed methods for calculating the bearing capacity of the normative documents of a number of countries – Australia, Brazil, India, Canada, China, the USA, Japan, etc., as well as common European standards are essentially based on empirical formulas. Therefore, they have significant limitations on the scope of application. Firstly, these formulas are valid only for heavy concrete. For composite elements made of other types of concrete (for example, fine-grained), they give unreliable results. Secondly, their use often leads to significant errors in determining the bearing capacity of compressed elements with large cross-sectional dimensions (500 mm or more). In addition, it is not possible to perform calculations of non-centrally compressed composite elements that have any differences from the “classical” design. As a result, the problem of developing theoretical foundations for assessing the strength resistance of STBC, taking into account the main features of the stress-strain state of concrete and steel, is very relevant. To achieve this goal, experimental studies of the bearing capacity of non-centrally compressed laboratory samples of round cross-section STBC made of medium and high strength concrete were carried out.

**Keywords:** structures, steel-concrete columns, deformed state, bearing capacity, eccentric compressed sample, concrete core, steel shell.

**For citation:** Rimshin V.I., Semenova M.N., Shubin I.L., Krishan A.L., Astafieva M.A. Studies of the bearing capacity of non-centrally compressed steel-tube concrete columns. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2022. No. 6, pp. 8–14. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-803-6-8-14>

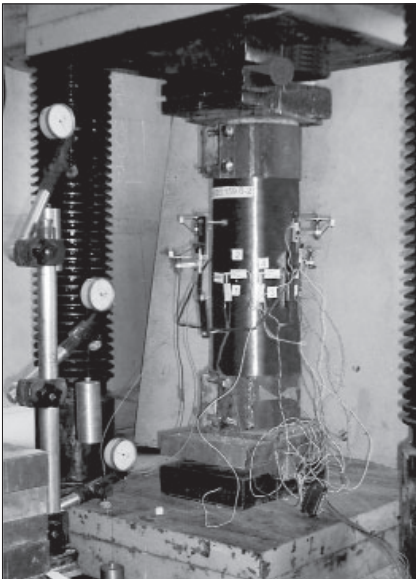


Рис. 1. Общий вид образца при испытании на внецентренное сжатие

Fig. 1. General view of the sample during the eccentric compression test

Основные результаты испытаний на внецентренное сжатие образцов из высокопрочного бетона  
The main results of tests for eccentric compression of samples made of high-strength concrete

№ серии	Серия, образец	$e_0/d$	$R_b$ , МПа	$N_{el}$ , кН	$N_u$ , кН	$N_{cp}$ , кН	$n_{el}$	$m_c$
1	O80.1-1	0,125	83,6	970	1800	1450	0,54	1,24
	O80.1-2		84	1100	1900	1455	0,58	1,3
	O80.1-3		85,5	970	1867	1462	0,52	1,28
2	O80.2-1	0,25	83,6	720	1367	1208	0,53	1,13
	O80.2-2		84	750	1433	1214	0,52	1,18
	O80.2-3		85,5	700	1500	1222	0,47	1,22
3	O80.3-1	0,375	83,6	500	1100	412	0,45	1,14
	O80.3-2		84	500	950	368	0,53	1,12
	O80.3-3		85,5	550	1100	400	0,5	1,15
4	H80.1-1	0,125	82,9	1200	1933	1503	0,62	1,28
	H80.1-2		86,4	1200	1967	1522	0,61	1,29
	H80.1-3		85,8	1200	2000	1515	0,6	1,32
5	H80.2-1	0,25	82,9	850	1400	1224	0,61	1,14
	H80.2-2		86,4	800	1550	1243	0,52	1,25
	H80.2-3		85,8	900	1530	1235	0,59	1,24
6	H80.3-1	0,375	82,9	600	1067	959	0,56	1,11
	H80.3-2		86,4	600	1150	974	0,52	1,18
	H80.3-3		85,8	550	1050	966	0,52	1,1

В настоящее время ведется разработка теоретических принципов оценки силового сопротивления сжатых трубобетонных элементов на базе общепринятых положений механики твердого тела [1–24]. Для достижения поставленной цели выполнены экспериментальные исследования несущей способности внецентренно сжатых лабораторных образцов СТБК круглого поперечного сечения, изготовленных из бетона средней и высокой прочности. Часть образцов выполнена из напрягающего бетона.

Для исследований при внецентренном сжатии изготовлено шесть серий опытных образцов. Основу каждой серии составляли три образца-близнеца. Экспериментальные образцы круглого сечения с наружным диаметром 159 мм и длиной 640 мм. Отношение диаметра элемента к длине примерно равно 1/4. Три серии образцов (O80.1, O80.2 и O80.3 – для исследований при относительных эксцентриситетах  $e_0/d = 0,125, 0,25$  и  $0,375$  соответственно) изготавливались из высокопрочного тяжелого бетона класса В80, а три серии аналогичных образцов (H80.1, H80.2 и H80.3) – из напрягающего бетона марки  $S_{p1,5}$  и класса В80. Внешний вид образцов в момент испытания на внецентренное сжатие приведен на рис. 1.

Основные результаты экспериментальных исследований внецентренно сжатых трубобетонных образцов приведены в таблице.

Величина  $N_{cp}^{th}$  при внецентренном сжатии подсчитывалась согласно указаниям СП 63.13330.2018 по предельным усилиям, воспринимаемым бетонным ядром и внешней стальной оболочкой в предположении, что они работают в составе железобетонной конструкции, где отсутствует эффект обоймы.

Основным результатом проведенных опытов следует считать заметный прирост прочности предвари-

тельно обжатых образцов по сравнению с прочностью аналогичных образцов-близнецов классической конструкции.

Данный прирост в среднем составил:

- при  $e_0/d = 0,13$  – 7 %;
- при  $e_0/d = 0,26$  – 7 %.
- при  $e_0/d = 0,375$  – 4 %.

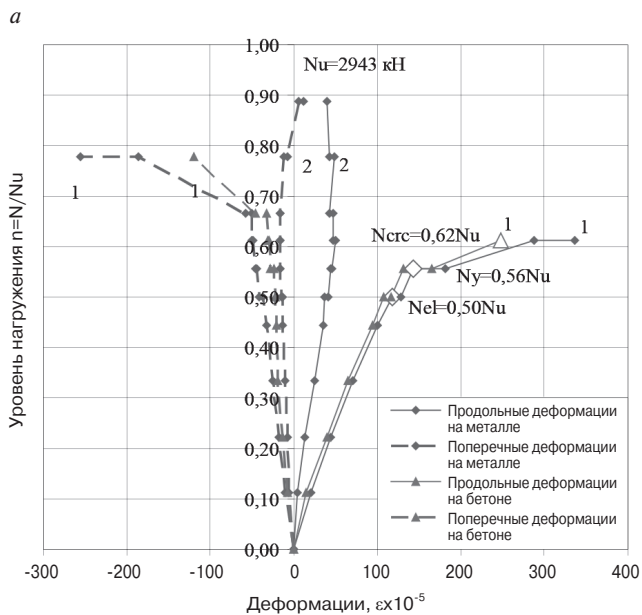
Таким образом, для всех исследованных случаев внецентренного сжатия подтверждена целесообразность практического использования СТБК усовершенствованной конструкции.

Работу при кратковременном статическом нагружении внецентренно сжатых трубобетонных образцов можно условно разделить на четыре стадии.

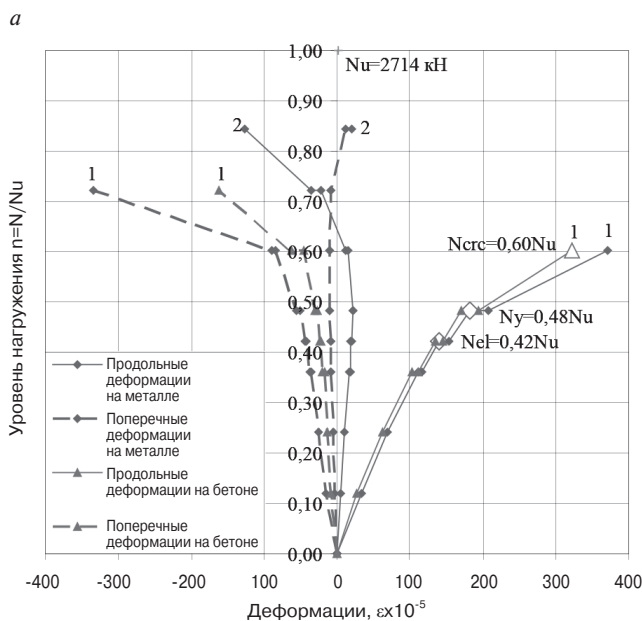
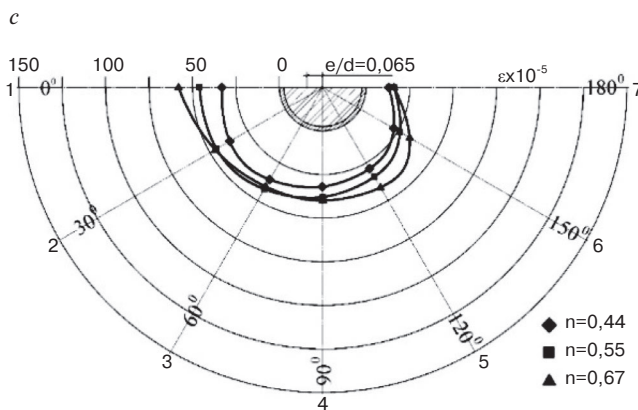
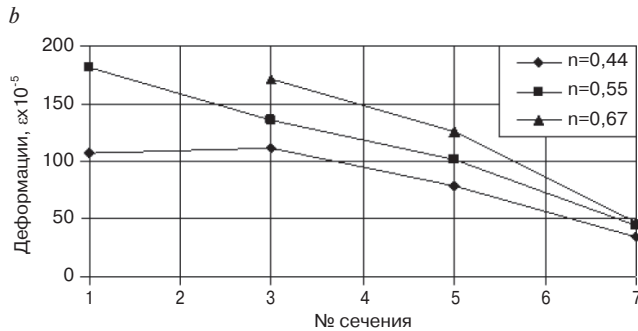
На первой стадии наблюдалась упругая работа бетонного ядра и внешней стальной оболочки. Участки диаграммы « $n - \varepsilon$ » для этой стадии работы исследуемых трубобетонных элементов близки к прямолинейным (рис. 2–4). На этом этапе при увеличении нагрузки наблюдалось практически пропорциональное приращение прогибов среднего по высоте поперечного сечения образцов.

При внецентренном сжатии нагрузки, соответствующие пределу упругой работы трубобетонных образцов, оказались ниже по сравнению со случаем осевого сжатия. Степень этого снижения в основном определялась наличием предварительного напряжения бетонного ядра и величиной относительного эксцентриситета (таблица). Из данных таблицы можно выявить закономерность, что для эксцентриситетов в пределах ядра сечения предел упругой работы снижается несколько интенсивнее в образцах с предварительно обжатым бетонным ядром.

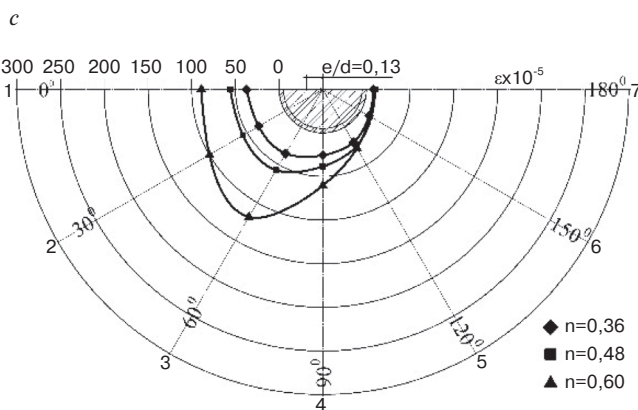
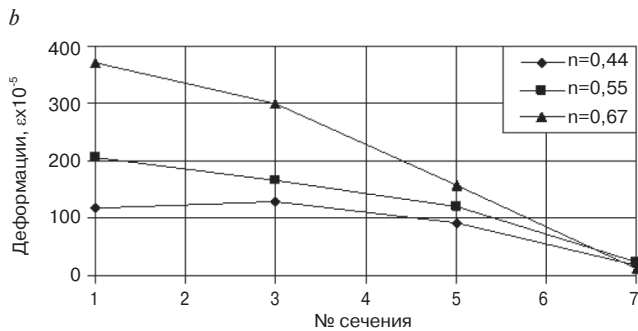
Значения относительного предела упругой работы для образцов с предварительно обжатым ядром



**Рис. 2.** Характерные зависимости для серии О80-1: *a* – продольных и окружных деформаций от уровня нагружения (1, 2 – более и менее сжатые зоны); *b* – продольных деформаций по сечениям 1–7 от уровня нагружения; *c* – окружных деформаций по сечениям 1–7 от уровня нагружения



**Рис. 3.** Характерные зависимости для серии О80-2: *a* – продольных и окружных деформаций от уровня нагружения (1, 2 – более и менее сжатые зоны); *b* – продольных деформаций по сечениям 1–7 от уровня нагружения; *c* – окружных деформаций по сечениям 1–7 от уровня нагружения

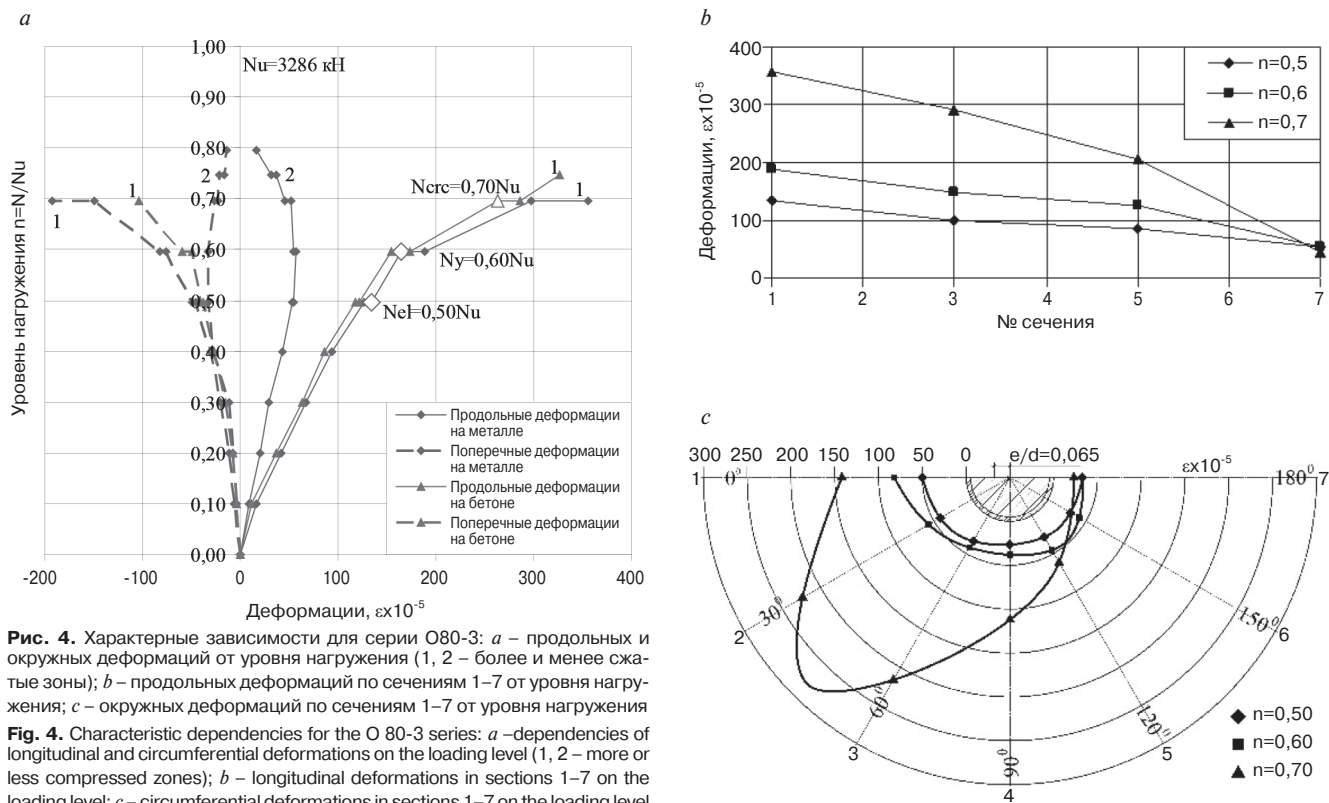


выше аналогичного показателя для классических трубобетонных элементов:

- при  $e_o/d = 0,13$  – на 11 %;
- при  $e_o/d = 0,26$  – на 12 %;
- при  $e_o/d = 0,375$  – на 8 %.

В упругой стадии работы внецентренно сжатых трубобетонных образцов под нагрузкой при  $e_o/d = 0,13$

их поперечное сечение в продольном направлении полностью сжато и следует гипотезе плоских сечений. Отмечаемые в опытах отклонения находились в пределах точности измерения деформаций. В конце упругой стадии работы внецентренно сжатого элемента, в зоне наименьшего сжатия в продольном направлении происходило замедление (прекращение)



прироста деформаций сжатия при  $e_0/d = 0,13$  или появление деформаций растяжения при больших относительных эксцентриситетах.

На второй стадии (условно названной упруго-пластической) наблюдался переход металла оболочки в наиболее сжатой зоне в текучее состояние. Практически всегда этому предшествовало начало процесса микротрещинообразования в бетонном ядре. Об этом свидетельствует изменение характера приращения окружных и продольных деформаций бетона, а также фиксируемое уменьшение скорости прохождения ультразвука через бетонное ядро.

На этой стадии работы сжатых трубобетонных образцов зависимости деформаций и прогибов от нагрузки становились нелинейными. Причем у трубобетонных образцов из обычного бетона по сравнению с предварительно обжатыми образцами наблюдалось более интенсивное приращение поперечных деформаций ( $\Delta \epsilon_{non}$ ). Интенсивность нарастания  $\Delta \epsilon_{non}$  увеличивалась с ростом эксцентриситета и была неравномерна по поперечному сечению внецентренно сжатого трубобетонного образца.

Максимальные величины окружных деформаций стальной оболочки, которые удалось зафиксировать, были равны:

- при  $e_0/d = 0,13$   $\epsilon_{non} = 270 \cdot 10^{-5}$ ;
- при  $e_0/d = 0,26$   $\epsilon_{non} = 285 \cdot 10^{-5}$ ;
- при  $e_0/d = 0,375$   $\epsilon_{non} = 295 \cdot 10^{-5}$ .

Величины относительных нагрузок, при которых интенсивность напряжений во внешней стальной оболочке достигала предела текучести, для предварительно обжатых образцов СТБК всегда была выше по сравнению с необжатыми образцами: упругопласти-

ческая стадия работы образцов СТБК заканчивалась при достижении продольными деформациями величин порядка  $(170–280) \cdot 10^{-5}$ .

На третьей стадии (пластической) происходило резкое нарастание деформаций элемента, как в продольном, так и в поперечном направлениях (рис. 2–4). В пластической стадии работы трубобетонных образцов электротензорезисторы выходили из строя и не позволяли зарегистрировать предельные величины их деформаций.

К моменту разрушения максимальные (зафиксированные по показаниям индикаторов часового типа в наиболее сжатой зоне) значения продольных деформаций образцов достигали порядка 6–10% их начальной длины.

В ходе экспериментов удалось выяснить, что в сжатых трубобетонных элементах величина  $e_0/d = 0,125$  является примерной границей между случаями больших и малых эксцентриситетов. В пластической стадии в зоне, наиболее удаленной от линии действия сжимающей нагрузки, при относительных эксцентриситетах  $e_0/d = 0,25$  и  $0,375$  в продольном направлении наблюдались значительные деформации растяжения. Примерно такие же результаты были получены в опытах В.Л. Шаброва на трубобетонных элементах с большими диаметрами поперечного сечения.

Зафиксированные искривления поперечных сечений образцов при высоких уровнях нагружения в зоне наибольшего сжатия были вызваны начавшимися процессами образования гофр, которые приводили к снижению фактических величин деформаций, замеренных ЭТР, имеющих меньшую, чем поперечный размер гофры, базу.

Опыты показали, что на характер изменения прогибов с ростом сжимающих нагрузок оказывали влияние как величины относительного эксцентриситета  $e_0/d$ , так и наличие предварительного обжатия у испытуемых образцов. С ростом  $e_0/d$  величина прогиба при одном и том же уровне загрузки была, как правило, больше. С другой стороны, полученные зависимости свидетельствуют о том, что жесткость трубобетонных элементов с предварительно обжатым ядром выше, чем у традиционных трубобетонных конструкций. Так, при относительном уровне загрузки  $n = N/N_u = 0,8$  (примерная граница между упругопластической и пластической стадиями) прогибы предварительно обжатых образцов в среднем были на 30–45 % меньше, чем у необжатых.

Разрушение внецентренно сжатых трубобетонных элементов (четвертая стадия) начиналось с образования гофров в зоне наибольшего продольного сжатия и заканчивалось ускоренным нарастанием кривизны элемента в плоскости действия изгибающего момента от эксцентриситета с дальнейшим развитием гофров в области, примыкающей к зоне наибольшего сжатия. Причем для исследованных эксцентриситетов приложения сжимающей нагрузки характер и вид разрушения трубобетонных образцов как с обжатым, так и с необжатым бетонным ядром были аналогичны (рис. 5–8).

Для изучения деструктивных процессов в бетонном ядре с части разрушенных внецентренно сжатых образцов были сняты стальные оболочки. Визуально видимая концентрация трещин и раздробление бетона наблюдались в зоне образования складок, т. е. в

наиболее сжатой зоне элемента. Бетон в точности повторял форму гофр, которые были ориентированы перпендикулярно к продольной оси элемента и образовывались на стальной оболочке в результате ее местной потери устойчивости. Это свидетельствует о том, что бетонное ядро в трубобетонных конструкциях приобретает свойства псевдопластичного тела. При этом структура бетона была существенно нарушена. Бетон в местах образования гофр крошился даже при незначительных механических воздействиях.

Статистическая обработка полученных опытных данных позволила оценить влияние относительного эксцентриситета на снижение прочности коротких СТБК. Это влияние описывается следующей зависимостью:

$$N = N_0(1 - 0,95 \sqrt{e_0/d}),$$

где  $N$  – прочность внецентренно сжатого элемента;  $N_0$  – прочность центрально-сжатого элемента.

В целом выполненные эксперименты на внецентренное сжатие подтвердили высокие эксплуатационные образцы качества СТБК, прежде всего их несущую способность и жесткость. При этом опыты показали, что применение напрягающего бетона за счет создания предварительного обжатия ядра приводит к стабильному повышению прочности и заметному росту предела упругой работы центрально-сжатых СТБК. С увеличением эксцентриситета сжимающей силы эффективность предварительного обжатия снижается, и при  $e_0/d = 0,375$  она практиче-



Рис. 5. Разрушенный образец серии H80.1  
Fig. 5. Destroyed sample of the H80.1 series

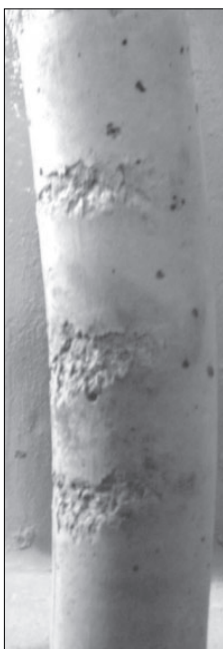


Рис. 6. Бетонное ядро образца серии H80.1 после механических воздействий  
Fig. 6. Concrete core of the H80.1 series sample after mechanical impacts



Рис. 7. Разрушенный образец серии H80.2  
Fig. 7. Destroyed sample of the H80.1 series

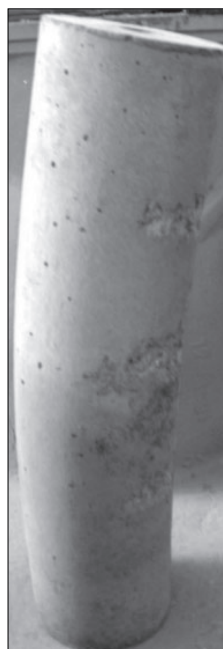


Рис. 8. Бетонное ядро образца серии H80.1 после механических воздействий  
Fig. 8. Concrete core of the H80.1 series sample after mechanical impacts

ски ощутима лишь для предела упругой работы (рост порядка 7%).

Анализ результатов проведенных и ранее опубликованных экспериментальных исследований свидетельствует о том, что первое предельное состояние коротких СТБК при действии  $M$  и  $N$  наступает вследствие достижения прочности нормального сечения.

При расчете СТБК по прочности нормальных сечений следует учитывать случайный эксцентриситет  $e_a$  сжимающей продольной силы, определяемый с учетом положений СП 63.13330.2018 и EN 1994-1-1:2004 Eurocod 4.

#### Список литературы / References

1. Патент РФ 2725162. *Способ определения параметров трещиностойкости бетона в изделии* / Шубин И.Л., Римшин В.И., Варламов А.А., Давыдова А.М. Заявл. 21.10.2019. Опубл. 30.06.2020.
1. Patent RF 2725162. *Sposob opredeleniya parametrov treshchinostoikosti betona v izdelii* [Method for determining the parameters of crack resistance of concrete in a product]. Shubin I.L., Rimshin V.I., Varlamov A.A., Davydova A.M. Declared 21.10.2019. Published 30.06.2020. (In Russian).
2. Костюченко Я.Б., Шафрановская Т.Ю., Варламов А.А., Римшин В.И., Быков Г.С. Несущая способность сталеполистиролбетонной плиты // *БСТ*. 2020. № 9 (1033). С. 46–47.
2. Kostyuchenko Ya.B., Shafranovskaya T.Yu., Varlamov A.A., Rimshin V.I., Bykov G.S. Bearing capacity of steel-polystyrene concrete slab. *BST*. 2020. No. 9 (1033), pp. 46–47. (In Russian).
3. Римшин В.И., Кецо Е.С., Трунтов П.С., Кузина И.С., Быков Г.С. Результаты расчета усиления строительных конструкций здания методом конечных элементов // *Вестник Вологодского государственного университета. Сер. Технические науки*. 2020. № 4 (10). С. 67–78.
3. Rimshin V.I., Ketsko E.S., Truntov P.S., Kuzina I.S., Bykov G.S. Results of calculation of reinforcement of building structures by the finite element method. *Vestnik Vologodskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskie nauki*. 2020. No. 4 (10), pp. 67–78. (In Russian).
4. Варламов А.А., Теличенко В.И., Римшин В.И. Модели материалов по теории деградации // *Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности*. 2019. № 4 (382). С. 59–65.
4. Varlamov A.A., Telichenko V.I., Rimshin V.I. Models of materials on the theory of degradation. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Tekhnologiya tekstil'noi promyshlennosti*. 2019. No. 4 (382), pp. 59–65. (In Russian).
5. Меркулов С.И., Римшин В.И., Акимов Э.К. Огнестойкость бетонных конструкций с композитной стержневой арматурой // *Промышленное и гражданское строительство*. 2019. № 4. С. 50–55.
5. Merkulov S.I., Rimshin V.I., Akimov E.K. Fire resistance of concrete structures with composite rod reinforcement. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2019. No. 4, pp. 50–55. (In Russian).
6. Кришан А.Л., Римшин В.И., Астафьева М.А., Трошкина Е.А. Расчет предельных осевых деформаций бетонного ядра сжатых трубобетонных элементов // *Жилищное строительство*. 2019. № 6. С. 39–42.
6. Krishan A.L., Rimshin V.I., Astafyeva M.A., Troshkina E.A. Calculation of marginal axial deformations of the concrete core of compressed pipe-concrete elements. *Zhilishchnoe Stroitel'stvo* [Housing Construction]. 2019. No. 6, pp. 39–42. (In Russian).
7. Римшин В.И., Варламов А.А., Курбатов В.Л., Анпилов С.М. Развитие теории деградации бетонного композита // *Строительные материалы*. 2019. № 6. С. 12–17.
7. Rimshin V.I., Varlamov A.A., Kurbatov V.L., Anpilov S.M. Development of the theory of degradation of concrete composite. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2019. No. 6, pp. 12–17. (In Russian).
8. Варламов А.А., Римшин В.И. Человек. Информация. Деградация // *Биосферная совместимость: человек, регион, технологии*. 2019. № 3 (27). С. 44–53.
8. Varlamov A.A., Rimshin V.I. Man. information. Degradation. *Biosferная совместimost': chelovek, region, tekhnologii*. 2019. No. 3 (27), pp. 44–53. (In Russian).
9. Патент РФ 2672697. *Способ для разделения сыпучих материалов по фракциям методом метания смеси частиц с одинаковой скоростью и устройство для его осуществления* / Курбатов В.Л., Фурсов А.В., Римшин В.И. Заявл. 13.10.2017.
9. Patent RF 2672697. *Sposob dlya razdeleniya sypushikh materialov po fraktsiyam metodom metaniya smesi chastits s odinakovoi skorost'yu i ustroystvo dlya ego osushchestvleniya* [A method for separating bulk materials into fractions by throwing a mixture of particles at the same speed and a device for its implementation] Kurbatov V.L., Fursov A.V., Rimshin V.I. Zayavl. 13.10.2017. (In Russian).
10. Римшин В.И., Варламов А.А. Объемные модели упругого поведения композита // *Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности*. 2018. № 3 (375). С. 63–68.
10. Rimshin V.I., Varlamov A.A. Volumetric models of elastic behavior of composite *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Tekhnologiya tekstil'noi promyshlennosti*. 2018. No. 3 (375), pp. 63–68. (In Russian).
11. Римшин В.И., Кузина Е.С., Шубин И.Л. Анализ структур в водоподготовке и санитарии для их укрепления // *Журнал физики: Конференция. Серия. Международная научная конференция по моделированию и методам структурного анализа 2019, ММСА 2019*. 2020. С. 012074.
11. Rimshin V.I., Kuzina E.S., Shubin I.L. Analysis of the structures in water treatment and sanitation facilities for their strengthening. *Journal of Physics: Conference Series. International Scientific Conference on Modelling and Methods of Structural Analysis 2019, MMSA 2019*. 2020. C. 012074.
12. Калов Е.Н., Ерофеев В.Т., Зоткина М.М., Дергунова А.В., Моисеев В.В., Римшин В.И.

- Plasticized epoxy composites for manufacturing of composite reinforcement. *Journal of Physics: Conference Series*. «International Conference on Engineering Systems 2020». 2020. С. 012031.
13. Kuzina E.S., Rimshin V.I. Calculation method analysis for structure strengthening with external reinforcement. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. International Science and Technology Conference «FarEastCon 2019»*. 2020. С. 022004.
  14. Eryshev V.A., Karpenko N.I., Rimshin V.I. The parameters ratio in the strength of bent elements calculations by the deformation model and the ultimate limit state method. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. International Science and Technology Conference «FarEastCon 2019»*. 2020. С. 022076.
  15. Merkulov S.I., Rimshin V.I., Shubin I.L., Esipov S.M. Modeling of the stress-strain state of a composite external strengthening of reinforced concrete bending elements. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. International Science and Technology Conference «FarEastCon 2019»*. 2020. С. 052044.
  16. Krishan A., Troshkina E., Rimshin V. Experimental research of the strength of compressed concrete filled steel tube elements. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2020. V. 1116 AISC. С. 560–566.
  17. Krishan A.L., Rimshin V.I., Troshkina E.A. Compressed and bending concrete elements with confinement reinforcement meshes. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2020. V. 753. С. 022052.
  18. Krishan A.L., Narkevich M.Yu., Sagadatov A.I., Rimshin V.I. The strength of short compressed concrete elements in a fiberglass shell. *Civil Engineering*. 2020. No. 2 (94), pp. 3–10.
  19. Varlamov A., Rimshin V., Tverskoi S. A method for assessing the stress-strain state of reinforced concrete structures. *E3S Web of Conferences. 2018 Topical Problems of Architecture, Civil Engineering and Environmental Economics, TPACEE 2018*. 2019. С. 02046.
  20. Telichenko V., Rimshin V., Ereemeev V., Kurbatov V. Mathematical modeling of groundwaters pressure distribution in the underground structures by cylindrical form zone. *MATEC Web of Conferences*. 2018. С. 02025.
  21. Krishan A.L., Narkevich M.Yu., Sagadatov A.I., Rimshin V.I. Experimental investigation of selection of warm mode for highperformance self-stressing self-compacting concrete. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Novosibirsk, 2018. С. 012049.
  22. Krishan A.L., Rimshin V.I., Troshkina E.A. Strength of short concrete filled steel tube columns of annular cross section. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Vladivostok, 2018. С. 022062.
  23. Krishan A.L., Rimshin V.I., Astafeva M.A. Deformability of a volume-compressed concrete. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Vladivostok, 2018. С. 022063.
  24. Karpenko N.I., Eryshev V.A., Rimshin V.I. The limiting values of moments and deformations ratio in strength calculations using specified material diagrams. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Vladivostok, 2018. С. 032024.

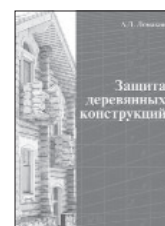
## СПЕЦИАЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

### В издательстве «Стройматериалы» вы можете приобрести книги:

#### Монография «Защита деревянных конструкций»

Автор – Ломакин А.Д.

Рассмотрены вопросы конструкционной и химической защиты деревянных конструкций, используемых в малоэтажном домостроении, при строительстве зданий и сооружений гражданского и промышленного назначения, в том числе, с химически агрессивной средой, а также открытых сооружений (автодорожных и пешеходных мостов, опор ЛЭП и др.). Освещены вопросы защиты от эксплуатационных воздействий и возгорания несущих конструкций из клееной древесины и ЛВЛ и приведено краткое описание наиболее эффективных средств и способов их защиты. Описаны методы оценки защитных свойств покрытий для древесины, методика и результаты натурных климатических испытаний покрытий на образцах и фрагментах конструкций. Приведены методика и результаты мониторинга влажностного состояния несущих клееных деревянных конструкций в процессе эксплуатации.



#### Монография «Производство деревянных клееных конструкций»

Автор – заслуженный деятель науки России, д-р техн. наук Ковальчук Л.М.

В книге рассмотрены основные вопросы технологии изготовления ДКК, показаны области их применения, описаны материалы для их изготовления. Особое внимание уделено вопросам оценки качества, методам испытаний, приемке и сертификации клееных конструкций. В книге приведен полный перечень отечественных и зарубежных нормативных документов, регламентирующих производство и применение ДКК.



Заявки направляйте в редакцию по e-mail: [mail@rifsm.ru](mailto:mail@rifsm.ru),

по тел.: (499) 976-22-08, 976-20-36.

Оформляйте заказ на сайте [www.rifsm.ru](http://www.rifsm.ru)



УДК 691.32

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-803-6-15-19>

В.Н. ЯРМАКОВСКИЙ, канд. техн. наук, гл. научный сотрудник, почетный член РААСН, эксперт РАН, член Международной федерации по конструкционным бетонам «International Federation for Structural Concrete» (*fib*) ([yarmakovsky@yandex.ru](mailto:yarmakovsky@yandex.ru)), Д.З. КАДИЕВ, мл. научный сотрудник ([kadievdavid@mail.ru](mailto:kadievdavid@mail.ru))

Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук (127238, г. Москва, Локомотивный пр., 21)

## Физико-химические основы создания особо легких бетонов новых модификаций с высокими показателями теплотехнического качества

Анализ современных представлений о механизме основных теплообменных процессов в капиллярно-пористых строительных материалах, в том числе и в особо легких бетонах (ОЛБ), показывает, что при оценке, регулировании и прогнозировании их теплопроводности следует исходить из того, что теплопередача в них как в многофазной дисперсной системе осуществляется посредством либо только кондуктивной теплопроводности ( $T_k$ ), которая является основным механизмом теплообмена для такого капиллярно-пористого материала, как легкий бетон, либо совместно  $T_k$  и теплового излучения ( $T_{из}$ ). Анализ данных отечественных и зарубежных исследований по теплопроводности как капиллярно-пористых строительных материалов, так и ОЛБ показывает, что имеется резерв повышения теплозащитных функций наружных ограждающих конструкций зданий, изготавливаемых из таких бетонов, оцениваемый минимум в 30%. В результате анализа и обобщения литературных данных по экспериментальным исследованиям установлены закономерности влияния следующих структурных и технологических факторов на теплопроводность легких бетонов и их компонентов при постоянстве величины плотности бетона: форма зерна крупного пористого заполнителя и содержание стеклофазы в нем; оптимальность структурного фактора, определяемого относительным содержанием мелкого (М) и крупного (К) заполнителей ( $M/(M+K)$ ); использование в ОЛБ активных минеральных добавок. На базе установленных закономерностей определены основные положения технологии теплоизоляционных легких бетонов, обеспечивающей при современном состоянии их производства снижение коэффициента теплопроводности в состоянии равновесной влажности на 20–30% при сохранении величины плотности зерен заполнителей и бетонов, которые определяют их прочностные и деформативные характеристики.

**Ключевые слова:** особо легкие бетоны, физико-химические основы, структурно-технологические модели, капиллярно-пористая структура, теплопроводность, сорбционная влажность, ограждающие конструкции.

**Для цитирования:** Ярмаковский В.Н., Кадиев Д.З. Физико-химические основы создания особо легких бетонов новых модификаций с высокими показателями теплотехнического качества // *Строительные материалы*. 2022. № 6. С. 15–19.

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-803-6-15-19>

V.N. YARMAKOVSKY, Candidate of Sciences (Engineering), Chief Researcher, Honorary Member of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Expert of the Russian Academy of Sciences, member of the International Federation for Structural Concrete (*fib*) ([yarmakovsky@yandex.ru](mailto:yarmakovsky@yandex.ru))  
D.Z. KADIEV, Junior Researcher ([kadievdavid@mail.ru](mailto:kadievdavid@mail.ru))  
Research Institute of Building Physics of the Russian Academy of Architecture and Building Sciences (NIISF RAACS)  
(21, Lokomotivny Driveway, Moscow, 127238, Russian Federation)

### Physical-Chemical Bases for the Creation of Extra-Light Concretes of New Modifications with High Rates of Thermal Engineering Quality

Analysis of modern ideas about the mechanism of the main heat transfer processes in capillary-porous building materials, including extra-lightweight aggregate concretes (ELAC) shows that when assessing, regulating and predicting their thermal conductivity, one should proceed from the moment that heat transfer in them, as in a multiphase dispersed system, is carried out either through conductive thermal conductivity ( $T_C$ ), which is the main heat transfer mechanism for such a capillary-porous material as lightweight aggregate concrete, or together with  $T_C$  and thermal radiation ( $T_R$ ). The data analysis of the domestic and foreign studies on the thermal conductivity of both capillary-porous building materials and ELAC shows that there is a reserve for increasing the heat-shielding functions of the external enclosing structures of buildings made from such concretes, estimated at least 30%. As a result of the analysis and generalization of literature data on experimental studies, the regularities of the influence of the following structural and technological factors on the thermal conductivity of lightweight concretes and their components at a constant density of concrete were established: the grain shape of a large porous aggregate and the glass phase content in it, the optimality of the factor determined by the relative content of fine (F) and coarse (C) aggregates ( $F/(F+C)$ ), the use of active mineral additives in the ELAC. On the basis of the established laws, the main provisions of the technology of heat-insulating lightweight concretes are determined, which, in the current state of their production, reduces the coefficient of thermal conductivity in a state of equilibrium humidity by 20–30% while maintaining the density of aggregates and concretes, which determines their strength and deformation characteristics.

**Keywords:** extra-lightweight aggregate concretes, physical-chemical bases, structural-technological models, capillary-porous structure, thermal conductivity, sorption humidity, enclosing structures.

**For citation:** Yarmakovskiy V.N., Kadiev D.Z. Physical-chemical bases for the creation of extra-light concretes of new modifications with high rates of thermal engineering quality. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2022. No. 6, pp. 15–19. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-803-6-15-19>

**Влияние структуры легкого бетона, вида пористости и типа заполнителя на его теплопроводность**

Основываясь на результатах исследований В.Н. Богословского [1], И.С. Камерера [2] и Б.Н. Кауфмана [3] по влиянию характера связи между собой твердых составных частей строительного материала на его теплопроводность, можно полагать, что основные разновидности структуры бетона (зернистая и ячеистая) по-разному влияют на теплопроводность материала при равной величине его плотности. По сравнению с легкими бетонами на пористых заполнителях интенсивнее проводит тепловые потоки ячеистый бетон, обладающий связанными в единую систему достаточно плотными межпоровыми перегородками. В легком бетоне зернистой структуры теплопередача должна быть в большей степени затруднена, поскольку путь теплового потока лежит через ограниченные по площади контакты соприкасающихся в растворной части бетона зерен крупного и мелкого заполнителей.

Зависимость теплопроводности материала ячеистой структуры от его плотности, выведенная по теоретической модели А. Миснаром [4], описывается следующим уравнением:

$$\lambda_1 = \lambda_T \left(1 - \frac{V_B}{\sqrt[3]{V_B}}\right), \tag{1}$$

где  $\lambda_T$  – коэффициент теплопроводности твердой фазы материала;  $V_B$  – объемная доля воздушных включений (пор).

Уравнение теплопроводности материала зернистой структуры:

$$\lambda_2 = \lambda_{э.в.} \left(1 + \frac{V_T}{1 - \sqrt[3]{V_T}}\right), \tag{2}$$

где  $\lambda_{э.в.}$  – коэффициент эффективной теплопроводности воздуха, зависящий от размера пор и коэффициента излучения твердого тела;  $V_T$  – объемная доля твердой фазы.

Оба этих уравнения действительны для крайних случаев идеализированного материала: в зависимости (1) не учитывается теплопроводность воздушных пор (в связи с относительно малым значением), а в формуле (2) не учитывается теплопроводность твердой фазы материала (в связи с малой суммарной площадью контактов между зернами). На рис. 1 показаны кривые, при построении которых по формулам (1) и (2) принимались значения  $V_T=2,34$  Вт/(м·°С) (для твердой фазы), а  $\lambda_{э.в.}=0,029$  Вт/(м·°С) (для воздушной поры средним диаметром 1 мм).

Реальной структуре легкого бетона на пористых заполнителях присущи черты обоих типов дисперсной структуры, поэтому речь может идти лишь о преобладании того или иного типа. В работе [4] рекомендуется определять средневзвешенное значение теплопроводности, рассчитанное по формулам (1) и (2):

$$\lambda = a\lambda_{(1)} + v\lambda_{(2)}, \tag{3}$$

причем  $a+v=1$ , т. е.  $a$  и  $v$  выражают количественное соотношение типов структур в системе бетона.

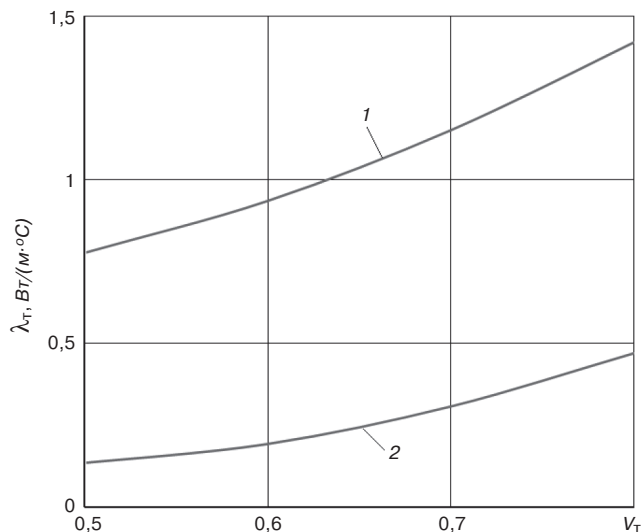
Расчет по формуле (3) показывает, что в бетоне на пористом гравии доля ячеистой структуры составляет 25–27%, а зернистой – 75–77%. В бетоне на пористом щебне соотношение иное: ячеистая структура – 15–21%; зернистая – 77–79%.

В результате в принятом для исследований авторов настоящей статьи интервале изменения расхода цемента (176–318 кг/м<sup>3</sup>) коэффициент теплопроводности равноплотных легких бетонов на пористом гравии изменяется от 0,21 до 0,26 Вт/(м·°С), а на пористом щебне – от 0,14 до 0,2 Вт/(м·°С). Причем разница особенно заметна в бетоне с малым расходом цемента (Ц). При увеличении расхода Ц она уменьшается, поскольку при этом в бетоне начинает преобладать развитая теплопроводная система цементного камня.

Известно, что главным структурообразующим фактором легких бетонов является зерновой состав пористых заполнителей, который определяет: количество и характер контактов между отдельными зернами заполнителей, величину их межзерновой пустотности и объемную концентрацию (содержание) в бетоне цементного камня.

Отсюда можно полагать, что зерновой состав заполнителей оказывает основное влияние на коэффициент теплопроводности легких бетонов. Такая гипотеза была положена в основу соответствующей целенаправленной работы, выполненной в НИИСФ канд. техн. наук Н.А. Тачковой [5].

Коэффициент теплопроводности ( $\lambda$ ) легкого бетона различных видов определялся в этой работе для различных его структур (плотной, пористой и крупнопористой), которые формировались при изменении зернового состава заполнителей. Более или менее закономерная связь величины  $\lambda$  от плотности ( $\gamma$ ) бетона  $\lambda=f(\gamma)$  наблюдалась только у бетонов одинакового зернового состава (разумеется, с одним видом заполнителя и с одинаковой его объемной концен-



**Рис. 1.** Зависимость коэффициента теплопроводности материала  $\lambda$  от характеристики его структуры по формулам (1) и (2): 1 – ячеистой; 2 – зернистой

**Fig. 1.** The dependence of the material thermal conductivity coefficient  $\lambda$  on its structure (according to formulas 1 and 2): 1 – cellular; 2 – granular

трацией). Плотность этих бетонов здесь зависела практически только от расхода цемента.

В данном случае зависимость  $\lambda=f(\gamma)$  была в общем виде представлена выражением:

$$\lambda = a \cdot e^{k\gamma}, \quad (4)$$

где  $a$  и  $k$  – эмпирические коэффициенты, величины которых зависят от зернового состава и вида пористых заполнителей и составляют соответственно от 0,025 до 0,2 и от 0,32 до 2,02.

Для рассмотренных видов легких бетонов с заполнителем разных зерновых составов максимальное отклонение величин  $\lambda$  от средних значений составило  $\pm 20-30\%$ . При этом с уменьшением плотности пористых заполнителей влияние зернового состава на теплопроводность бетонов уменьшается. Это и понятно, поскольку здесь существенное значение приобретает влияние уже не межзерновой, а внутризерновой пустотности, т. е. влияние поровой структуры зерна заполнителя.

Наименьшая теплопроводность, независимо от вида применяемого заполнителя, была установлена у крупнопористого бетона, содержащего не более 20% фракции 1,2–5 мм.

По мнению С.М. Ицковича [6], из двух видов легкого бетона неплотной структуры (крупнопористого или малопесчаного) с одинаковым общим объемом пор меньшую теплопроводность будет иметь малопесчаный, так как эффективная теплопроводность воздуха ( $\lambda_{в}$ ) в порах материала, включающая и передачу излучением, зависит от размера последних. Например, по А. Миснару [4]:

$$\lambda_{в} = 0,026 + 3,78D, \quad (5)$$

где  $D$  – диаметр воздушной поры, мм.

Следует, очевидно, к этому добавить, что теплопроводность мелкопористого или мелкозернистого бетона должна быть, по аналогии с закономерностями, установленными А. Миснаром [4] для дисперсных систем, меньше за счет снижения кондуктивной ее составляющей при увеличении общего количества контактов зерен заполнителя или между собой, или с цементным камнем – по существу, контактных термосопротивлений.

По З. Майнерту [7], наиболее низкая теплопроводность воздуха ( $\lambda=0,0242$  Вт/(м·°К)) при температуре 273,16К и давлении 0,1 МПа наблюдается лишь тогда, когда в соответствующих воздушных прослойках теплопередача посредством кондуктивной теплопроводности не наслаивается на теплопередачу, осуществляемую путем конвекции и излучения. В противном же случае теплопроводность, в частности воздушных прослоек, повышается в 6–8 раз. Участие тех или иных форм передачи тепла в общем процессе теплопередачи зависит от размера воздушных прослоек, а при пористой структуре материала – от диаметра пор.

Упрощенно, по З. Майнерту [7], можно сказать, что при диаметре пор менее 1 мм действует только кондуктивная теплопроводность; при  $d \leq 10$  мм – кон-

дуктивная теплопроводность и тепловое излучение; при  $d > 10$  мм – все три формы теплопередачи, т. е. еще и конвекция. Именно они определяют теплопроводность воздуха, заключенного в порах материала.

Отсюда следует, что теплопроводность двух проб материала с равными плотностью и пористостью может быть неодинаковой. Можно полагать, что если воздух в материале, в частности, в бетоне, распределен в виде большого количества мелких пор, то он будет менее теплопроводен, чем бетон с крупнопористой структурой.

Следует также заметить, что с распределением пор по размерам, с их видом и размерами связана и способность такого капиллярно-пористого материала, как бетон, к такому физическому процессу, как сорбция. Возможно, например, что уменьшение среднего размера пор в бетоне, с одной стороны, приведет к снижению  $\lambda$  в сухом состоянии, а с другой стороны – к увеличению сорбции за счет капиллярного подсоса и, следовательно, к увеличению  $\lambda$  бетона в состоянии эксплуатационной (равновесной) влажности. Этот вопрос также требует дальнейшего изучения.

Разумеется, говоря о влиянии макроструктуры бетона на его теплопроводность и резюмируя вышеизложенное в этом аспекте, естественно, нельзя не сказать следующее: теплопроводность легкого бетона как многокомпозиционного материала зависит во многом от теплопроводности его составляющих. Различными авторами предложены для уточнения этого фактора несколько моделей, имеющих один недостаток: не учитывается или в лучшем случае учитывается некорректно теплопроводность зоны контакта растворной части бетона с заполнителем, хотя это трудно определить экспериментально.

В результате выполненных аналитических исследований при соответствующей обработке вышеприведенных данных В.Н. Ярмаковским впервые была предложена формула для определения коэффициента теплопроводности умеренно поризованного (относительный объем вовлеченного воздуха не более 12%) конструкционно-теплоизоляционного легкого бетона для воздушно-сухого состояния:

$$\lambda_{\sigma} = \frac{\lambda_p}{1 - \sqrt[3]{\mu} \left[ 1 - \frac{1}{1 + \sqrt[3]{\mu^2} (\lambda_3 / \lambda_p - 1)} \right]}, \quad (6)$$

где  $\lambda_{\sigma}$ ,  $\lambda_p$  и  $\lambda_3$  – теплопроводность соответственно бетона, его растворной части в затвердевшем состоянии и крупного заполнителя в засыпке;  $\mu$  – структурный фактор или коэффициент макроструктуры бетона ( $\mu = M/(M+K)$ ), где  $M$  – мелкий заполнитель фр. 0–5 мм;  $K$  – крупный заполнитель смеси фр. 5–10 и 10–20 мм при оптимизированном соотношении 40:60% в соответствии с результатами экспериментальных исследований автора формулы.

### Выводы

1. Проведенный анализ данных отечественных и зарубежных исследований по теплопроводности как

капиллярно-пористых строительных материалов вообще, так и легких бетонов в частности, показывает, что имеется резерв повышения теплозащитных функций наружных ограждающих конструкций зданий, изготавливаемых из таких бетонов, оцениваемый минимум в 30% (учитывая установленные зависимости влияния на теплопроводность и сорбционную влажность легких бетонов рассмотренных факторов).

2. В результате анализа и обобщения результатов теоретических и экспериментальных исследований установлены следующие закономерности влияния структурных и технологических факторов на теплопроводность легких бетонов и их компонентов при постоянстве величины плотности бетона:

- чем более мелкопористой структурой обладают компоненты легких бетонов (пористый заполнитель и умеренно поризованный цементный камень), тем меньше при прочих равных условиях будут величины коэффициентов теплопроводности этих компонентов (соответственно  $\lambda_3$  и  $\lambda_{\text{цк}}$ ) и бетона в целом ( $\lambda_6$ );

- уменьшение диаметра макропор  $\geq 1$  мкм зерна крупного заполнителя в поверхностной зоне (глубина 500 мкм) до трех раз и во внутренней зоне до двух раз приводит к уменьшению величины  $\lambda_3$  до 49%, а величины коэффициента теплопроводности изготовленного на этом заполнителе бетона – до 26% для сухого состояния и до 29% – для состояния эксплуатационной влажности;

- приближение зерна крупного пористого заполнителя по форме к сфероиду, уменьшение в нем относительного количества открытых пор, увеличение длительности обратной миграции воды из пор заполнителя в растворную часть бетона (прежде всего в поры твердеющего цементного камня) способствуют формированию в процессе приготовления бетонной смеси и дальнейшем ее твердении все более мелкопористой структуры растворной части и, следовательно, способствуют снижению теплопроводности бетона;

- для пористого заполнителя одного и того же вида, изготовленного по одной и той же технологии (т. е. при постоянстве микро- и макроструктуры зерна заполнителя может быть справедлива прямая корреляционная связь между содержанием стеклофазы, в основном изотропного стекла, и величиной коэффициента теплопроводности заполнителя:  $\lambda_3 = a - b\varphi_c$ , где  $a$  и  $b$  – эмпирические коэффициенты;  $\varphi_c$  – относительное содержание стеклофазы в зерне заполнителя; величина коэффициента корреляции в такой зависимости, в частности для шлакопемзового за-

полнителя в засыпке, составляет  $r=0,7-0,9$ , повышаясь с уменьшением размера его зерна;

- при увеличении содержания стеклофазы в заполнителе с реальных 20 до 70% величина  $\lambda_6^{\text{свх}}$  снижается на 14–22%, а  $\lambda_6^{\text{свА}}$  – на 17–27% (в зависимости от плотности теплоизоляционного легкого бетона в интервале  $\rho_6^c=200-300$  кг/м<sup>3</sup>); при этом меньшие значения снижения коэффициента теплопроводности соответствуют меньшей плотности зерна заполнителя и бетона в целом.

3. На базе установленных закономерностей (см. выше) определены следующие основные положения технологии теплоизоляционных легких бетонов, обеспечивающей при современном состоянии их производства снижение коэффициента теплопроводности на 20–30% при  $\rho_3, \rho_6 = \text{const}$ :

- модификация поровой структуры компонентов бетона в направлении уменьшения среднего размера пор заполнителей бетона при оптимальной общей пористости бетона;

- регулирование фазового состава зерен пористых заполнителей в направлении увеличения доли аморфизированной составляющей;

- предпочтительность использования в бетоне ингредиентов (включений) с мелкокристаллической структурой, по возможности (исходя из предела прочности) дефектной;

- оптимизация зернового состава пористых заполнителей в направлении максимально возможного (исходя из предела плотности бетона и условия ограничения расхода цемента) уменьшения среднего размера их зерен;

- оптимизация объемной концентрации компонентов бетона в направлении максимально возможного (с позиций обеспечения удобоукладываемости бетонной смеси, прочности бетона и других показателей его качества) увеличения относительного содержания наименее теплопроводной составляющей – пористого заполнителя;

- в существенно более значительной степени по сравнению с вышеупомянутыми компонентами легкого бетона на пористых заполнителях влияют на его теплопроводность вид и фазовый состав используемых вяжущих; авторы настоящей статьи предполагают представить в следующей статье в журнале «Строительные материалы» соответствующие результаты собственных исследований, а именно преимущества в существенно меньшей по сравнению с традиционным портландцементом величине коэффициента теплопроводности малоклинкерных композиционных вяжущих [8].

#### Список литературы

1. Богословский В.Н. Строительная теплофизика. М.: Высшая школа, 1982. 415 с.
2. Каммерер И.С. Теплоизоляция в промышленности и строительстве / Пер. с нем.. М.: Стройиздат, 1965. 377 с.

#### References

1. Bogoslovsky V.N. Stroitel'naya teplofizika [Construction thermophysics]. Moscow: Vysshaya shkola, 1982. 415 p.
2. Kammerer I.S. Teploizolyatsiya v promyshlennosti i stroitel'stve [Thermal insulation in industry and construction]. Moscow: Stroyizdat, 1965. 377 p.

3. Кауфман Б.Н. Теплопроводность строительных материалов. М.: Стройиздат, 1955. 159 с.
4. Миснар А. Теплопроводность твердых тел, жидкостей, газов и их композиций / Пер. с фр. М.: Мир, 1968. 460 с.
5. Тачкова Н.А. Влияние зернового состава пористых заполнителей и других факторов на теплопроводность легких бетонов: Дис. ... канд. техн. наук. М., 1966. 217 с.
6. Ицкович С.М. Крупнопористый бетон. М.: Стройиздат, 1977. 117 с.
7. Майнерт З. Теплозащита жилых зданий / Пер. с нем.; Под ред. А.Н. Мазалова. М.: Стройиздат, 1985. 204 с.
8. 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 // *Procedia Engineering*. 2015. № 5, pp. 12–17.
3. Kaufman B.N. Teploprovodnost' stroitel'nykh materialov [Thermal conductivity of building materials]. Moscow: Stroyizdat, 1955. 159 p.
4. Misnar A. Teploprovodnost' tverdykh tel, zhidkostey, gazov i ikh kompozitsii [Thermal conductivity of solids, liquids, gases and their compositions]. Moscow: Mir, 1968. 460 p.
5. Tachkova N.A. The influence of the grain composition of porous aggregates and other factors on the thermal conductivity of lightweight aggregate concrete. Diss... Candidate of Technical Sciences. Moscow, 1966. 217 p.
6. Itskovich S.M. Krupnoporisty beton [Large-pored concrete]. Moscow: Stroyizdat, 1977. 117 p.
7. Meinert Z. Teplozashchita zhilykh zdaniy [Thermal protection of residential buildings]. Moscow: Stroyizdat, 1985. 204 p.
8. Yarmakovskiy V.N., Pustovgar A.P. The scientific basis for the creation of the composite binders class characterized of the low heat conductivity and low sorption activity of the cement stone. *Procedia Engineering*. 2015. No. 5, pp. 12–17.

## СПЕЦИАЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

### Книга «Теоретические основы белизны и окрашивания керамики и портландцемента»

Авторы – 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.



### Книга «Технология производства стеновых цементно-песчаных изделий»

Авторы – Балакшин Ю.З., Терехов В.А.

Описано производство и применение стеновых материалов методом вибропрессования из цементно-песчаных бетонов. Рассмотрена существующая и перспективная номенклатура изделий и их свойства. Даны характеристики сырьевым материалам – песку, щебню, вяжущим и химическим добавкам и 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. Книга предназначена для организации производственно-технического обучения на предприятии, будет полезна инженерно-техническому персоналу и широкому кругу специалистов.



### Книга «Технология гипсовых отделочных материалов и изделий»

Автор – Федулов А.А.

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 отдельных 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.



**Заказать литературу можно через редакцию, направив заявку по e-mail: [mail@rifsm.ru](mailto:mail@rifsm.ru), по тел.: (499) 976-22-08, 976-20-36; или оформить заказ на сайте [www.rifsm.ru](http://www.rifsm.ru)**

Р.С. ПОУДЕЛ<sup>1</sup>, магистр (unlessmoney00@gmail.com);  
И.В. БЕССОНОВ<sup>2</sup>, канд. техн. наук (bessonoviv@mail.ru);  
А.Д. ЖУКОВ<sup>1,2</sup>, канд. техн. наук (lj211@yandex.ru),  
П.К. ГУДКОВ<sup>1</sup>, преподаватель (gudkov.pk@yandex.ru);  
Э.А. ГОРБУНОВА<sup>2</sup>, инженер (eg15082000@mail.ru),  
Е.Д. МИХАЙЛИК<sup>2</sup>, студент (mihailik1999@list.ru)

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

<sup>2</sup> Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук (127238, г. Москва, Локомотивный пр., 21)

## Цифровые методы оптимизации составов бетонного полотна

Применение цифровых технологий при анализе технологических процессов позволяет эффективно и успешно решать такие задачи, как обеспечение подбора состава этих материалов, выбор и оптимизация параметров, характеризующих процессы изготовления материалов, моделирование технологий. Основой являются методики математического планирования и обработки результатов эксперимента, а также последующая аналитическая оптимизация полученных зависимостей. Целью настоящих исследований явилась реализация цифровых технологий в рамках осуществления оптимизационных решений, направленных на подбор состава мелкозернистого бетона, являющегося минеральной компонентой бетонного полотна. Исследования свойств мелкозернистого модифицированного дисперсно-армированного бетона осуществлялись по стандартным методикам и с применением планирования эксперимента, математической обработки его результатов и аналитической оптимизации. Бетонное полотно представляет собой пропитанный бетоном гибкий тканевый материал, который в процессе взаимодействия с водой застывает и создает прочный, тонкий, стойкий к огню и воде слой бетона. Средняя плотность материала 1400–1440 кг/м<sup>3</sup>; прочность при сжатии не менее 40 МПа, прочность на прокол не менее 3 кН. Толщина полотна 5–20 мм. Бетонное полотно используют при строительстве гидротехнических сооружений; усилении откосов дорог, прокладываемых в горной местности; при строительстве быстровозводимых зданий. Полученные математические зависимости, оптимизационные решения, модели и их графическая интерпретация могут быть использованы при подборе состава мелкозернистого дисперсно-армированного бетона, являющегося основой для бетонного полотна. Полученные расчетные данные в обязательном порядке проверяются реализацией контрольных замесов с определением свойств получаемых образцов по стандартным методикам.

**Ключевые слова:** цифровые технологии, планирование эксперимента, аналитическая оптимизация, бетонное полотно, текстиль-бетон.

Исследования выполнены в рамках плана фундаментальных научных исследований Минстроя России и Российской академии архитектуры и строительных наук на 2022–2023 гг. по теме 3.1.2. «Разработка научных основ создания мелкозернистого бетона, армированного текстильным материалом (текстильный бетон)». Часть исследований проводилась с использованием оборудования Центра коллективного пользования (ЦКП) ВГТУ им. проф. Ю.М. Борисова при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации. Соглашение № 075-15-2021-662.

**Для цитирования:** Поудел Р.С., Бессонов И.В., Жуков А.Д., Гудков П.К., Горбунова Э.А., Михайлик Е.Д. Цифровые методы оптимизации составов бетонного полотна // *Строительные материалы*. 2022. № 6. С. 20–24. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-803-6-20-24>

R.S. POUDEL<sup>1</sup>, Student (unlessmoney00@gmail.com); I.V. BESSONOV<sup>2</sup>, Candidate of Sciences (Engineering) (bessonoviv@mail.ru);  
A.D. ZHUKOV<sup>1,2</sup>, Candidate of Sciences (Engineering) (lj211@yandex.ru); P.K. GUDKOV<sup>1</sup>, Teacher (gudkov.pk@yandex.ru);  
E.A. GORBUNOVA<sup>2</sup>, Engineer (eg15082000@mail.ru), E.D. MIHAYLIK<sup>2</sup>, Student (20anna00@list.ru)

<sup>1</sup> National Research Moscow State University of Civil Engineering (26, Yaroslavl Highway, Moscow, 129337, Russian Federation)

<sup>2</sup> Research Institute of Building Physics, Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (21, Lokomotivnyi Driveway, Moscow, 127238, Russian Federation)

### Digital Methods for Optimizing Textile Concrete Technology

The practice of digital technologies in the analysis of technological processes makes it possible to solve such problems effectively and successfully as ensuring the selection of the composition of these materials, the selection and optimization of parameters characterizing the processes of manufacturing materials, modelling technologies. The basis is the methods of mathematical planning and processing of the test results and the subsequent analytical optimization of the dependencies obtained. The purpose of the research presented in the article was the implementation of digital technologies as part of the implementation of optimization solutions for selecting the composition of fine concrete, which is the mineral component of the concrete wall. The investigation of the properties of fine-grained modified dispersion concrete was carried out according to standard methods and using experimental design, mathematical processing of its results and analytical optimization. The Concrete Canvas is a flexible fabric material impregnated with concrete, which, in the process of interaction with water, hardens and creates a strong, thin layer of concrete that is resistant to fire and water. The average density of the material is 1400–1440 kg/m<sup>3</sup>, compressive strength of less than 40 MPa, puncture strength of at least 3 kN. The thickness of the web is 5–20 mm. Concrete canvas is used in the construc-

tion of hydraulic structures, strengthening the slopes of roads laid in mountainous areas, in the construction of prefabricated buildings. The obtained mathematical dependencies, optimization solutions, models and their graphical interpretation can be used when choosing the composition of the fine-grained, dispersed rein-forced concrete, which is the basis of the concrete canvas. The calculated data obtained are necessarily verified by conducting control batches with the determination of the properties of the samples obtained by standard methods.

**Keywords:** digital technologies, experiment planning, analytical optimization, concrete canvas, textile-concrete.

The research was carried out as part of the plan for fundamental scientific research of the Ministry of Construction of Russia and the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences for 2022–2023 on topic 3.1.2. “Development of the scientific basis for the creation of fine-grained concrete reinforced with textile material (textile concrete)”. Part of research was carried out using the equipment of the Center for Collective Use of VSTU named after prof. Yu.M. Borisov with the support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, Agreement No. 075-15-2021-662.

**For citation:** Poudel R.S., Bessonov I.V., Zhukov A.D., Gudkov P.K., Gorbunova E.A., Mihaylik E.D. Digital methods for optimizing textile concrete technology. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2022. No. 6, pp. 20–24. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-803-6-20-24>

Реализация современных методов анализа технологических процессов производства строительных материалов и формирование методик подбора состава этих материалов обусловлено применением в строительной сфере цифровых технологий. Основой этого подхода являются методики математического планирования и обработки результатов активного эксперимента или анализа наблюдений за процессами, при реализации пассивного эксперимента [1, 2].

В результате обработки экспериментальных данных по законам математической статистики получают математические полиномы, которые после проверки статистических гипотез, значимости коэффициентов и подтверждения адекватности могут рассматриваться как математические модели, с установленной степенью достоверности описывающие реальные процессы. В области производства строительных материалов эти методы реализованы в технологиях бетона, строительной керамики, теплоизоляционных материалов, и сферы их применения постоянно расширяются и совершенствуются. Наиболее часто решаемые задачи – прогнозирование свойств изделий в зависимости от состава материала и параметров технологии или оценка значений варьируемых факторов с целью получения материала с заданными свойствами [3–5].

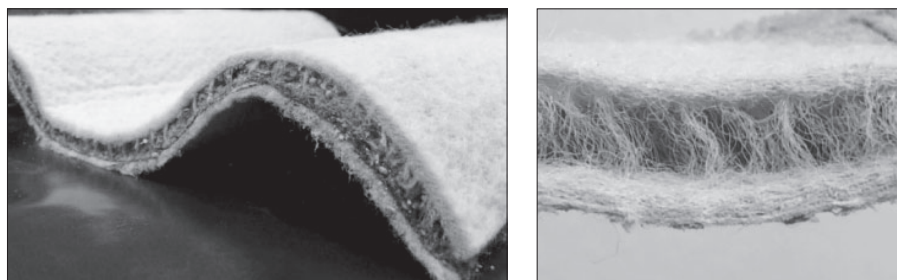
Одним из направлений развития цифровых методов является аналитическая оптимизация, методология которой разработана в НИУ МГСУ [6, 7]. Суть аналитической оптимизации заключается в том, что нелинейные модели технологических процессов рассматриваются как алгебраические функции нескольких переменных. Для исследования этих функций применимы методы математического анализа, и в частности определения экстремума по частным про-

изводным функции отклика. Эти методы позволяют аналитически определить оптимальные значения части варьируемых факторов и упростить вид уравнений регрессии, что делает более доступным решение конкретных инженерных задач, например при подборе состава материала или аппаратурного оформления технологии.

Целью настоящего исследования явилась реализация цифровых технологий путем осуществления оптимизационных решений, направленных на подбор состава мелкозернистого бетона, являющегося минеральной компонентой бетонного полотна.

Бетонное полотно является одной из разновидностей текстиль-бетонов – группы современных материалов, в состав которых входит вяжущее гидравлического твердения, наполнитель или мелкий заполнитель и органические или минеральные волокна, распределенные дисперсно или укладываемые в бетонный массив в виде сеток [7–9]. Разновидностями текстиль-бетона являются текстиль-усиленный бетон, фибробетоны (как плотные, так и ячеистой структуры), бетонное полотно и штукатурные системы, армированные полимерными или минеральными сетками [10–12].

Бетонное полотно представляет собой пропитанный бетоном гибкий тканевый материал (рис. 1), который в процессе взаимодействия с водой застывает и создает прочный, тонкий, стойкий к огню и воде слой бетона. Средняя плотность материала 1400–1440 кг/м<sup>3</sup>; прочность при сжатии не менее 40 МПа, прочность на прокол не менее 3 кН. Толщина полотна 5–20 мм. Бетонное полотно используют при строительстве гидротехнических сооружений, усилении откосов дорог, прокладываемых в горной местности, при строительстве быстровозводимых зданий и пр. (рис. 2) [13–16].



**Рис. 1.** Бетонное полотно (бетонная ткань)  
**Fig. 1.** Concrete canvas



Рис. 2. Основные этапы укладки бетонного полотна: а – размотка рулона; б – фиксация полотен; в – смачивание бетонного полотна  
 Fig. 2. The main stages of laying the concrete canvas: a – unwinding the roll; b – fixing the canvases; c – wetting of the concrete canvas

**Условия эксперимента по оптимизации состава мелкозернистого бетона**  
**Experimental conditions for optimizing the composition of fine-grained concrete**

Фактор	Символ $X_i$	Среднее значение фактора $\bar{X}_i$	Интервал варьирования $\Delta X_i$	Значения фактора на уровнях	
				-1	+1
Расход портландцемента, кг/м <sup>3</sup>	$X_1$	440	40	400	480
Расход пластификатора, % к расходу воды	$X_2$	0,6	0,2	0,4	0,8
Расход тонкомолотых отходов, кг/м <sup>3</sup>	$X_3$	520	40	480	560
Расход армирующего компонента, кг/м <sup>3</sup>	$X_4$	5	1	4	6

**Методы и материалы**

Исследование свойств мелкозернистого бетона проводилось в соответствии с ГОСТ 26633–2015 «Бетоны тяжелые и мелкозернистые. Технические условия», ГОСТ 25192–2012 «Бетоны. Классификация и общие технические требования», ГОСТ 12730.0–78 «Бетоны. Общие требования к методам определения плотности, влажности, водопоглощения, пористости и водонепроницаемости», ГОСТ 18105–2010 «Бетоны. Правила контроля и оценки прочности». Подбор состава и исследование свойств бетонной смеси осуществлялись в соответствии с ГОСТ 27006–86 «Бетоны. Правила подбора состава», ГОСТ 7473–2010 «Смеси бетонные. Технические условия» и ГОСТ 10181–2014 «Смеси бетонные. Методы испытаний».

Эксперимент проводился на основе методов математического планирования [17–19]. В качестве варьируемых факторов приняты прочность мелкозернистого бетона при сжатии ( $Y_1$ ) и его средняя плотность ( $Y_2$ ). Условия эксперимента представлены в таблице.

**Результаты**

Математическая обработка результатов эксперимента позволила получить уравнения регрессии для средней плотности ( $Y_2$ ) и прочности при сжатии ( $Y_1$ ). Значимые коэффициенты определяли, сравнивая модуль каждого коэффициента уравнения регрессии с доверительным интервалом  $\Delta b$ , рассчитанным из критериев Стьюдента ( $t$ -критерия) по параллельным опытам для прочности и плотности. Соответственно  $\Delta b_1=0,4$  МПа;  $\Delta b_2=14$  кг/м<sup>3</sup>. Все

коэффициенты, меньшие по своему абсолютному значению доверительных интервалов по прочности и по плотности, приняты незначимыми и обнулены (приравнены 0).

В результате активного эксперимента получены следующие математические модели (полиномы):

– для прочности при сжатии:

$$Y_1 = 36,1 + 3,6X_1 + 1,5X_2 + 1,6X_3 + 1,9X_4 + 1,7X_5 + 1,2X_1X_3 + 0,7X_2X_3 - 0,9X_2^2 - 1,0X_4^2;$$

– для средней плотности:

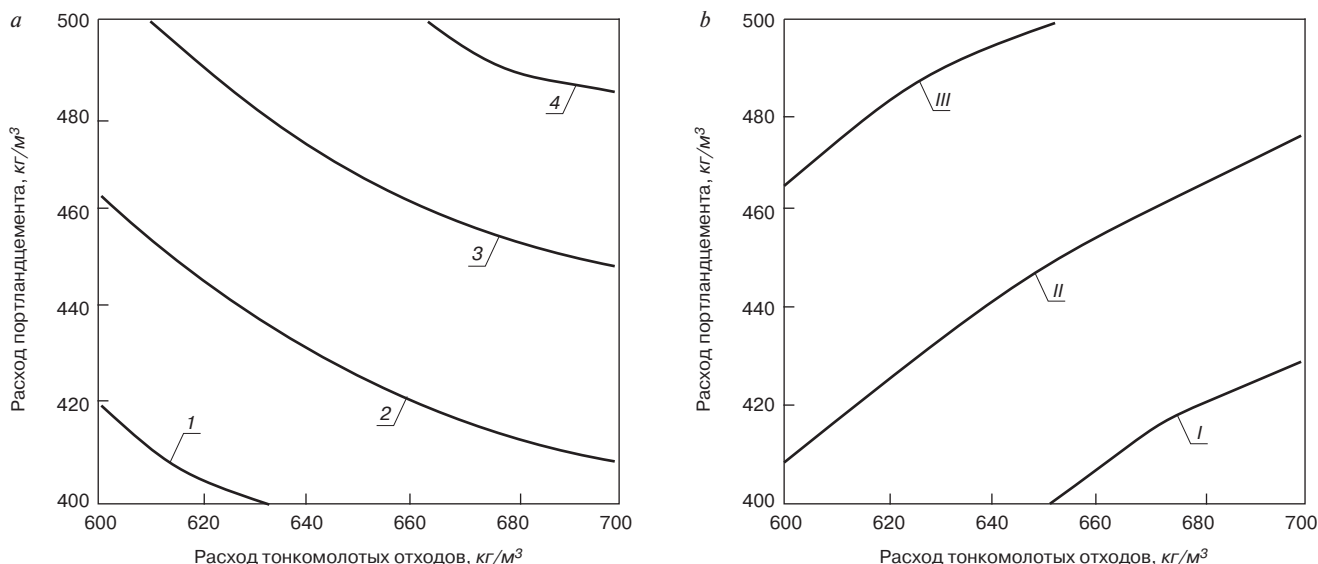
$$Y_2 = 1682 + 46X_1 + 24X_2 + 20X_3 + 16X_4 + 19X_1X_3 + 19X_1X_3.$$

Полученные модели проверены на адекватность по критерию Фишера. Расчетные значения критериев Фишера равны для модели средней плотности  $F_1=14,1$  и для модели прочности при сжатии  $F_2=15,7$ . Табличные значения критериев соответственно равны 19,2 и 19,3. Рассчитанные значения  $F$ -критерия не превышают табличного, и с соответствующей доверительной вероятностью (98%) модель можно считать адекватной.

**Обсуждение**

Экстремумы (оптимальные значения) функции  $Y_1=f_1(X_1, X_2, X_3, X_4)$  по  $X_2$  и  $X_4$  находим методом локальной аналитической оптимизации, который используем последовательно. Аналитическая оптимизация основана на том, что функции для прочности и плотности  $Y_1=f_1(X_1, X_2, X_3, X_4)$  и  $Y_2=f_2(X_1, X_2, X_3, X_4)$  – математические полиномы, т. е. алгебраические функции нескольких переменных, и к ним до-





**Рис. 3.** Зависимость прочности при сжатии (а) и средней плотности мелкозернистого бетона (б) от варьируемых факторов при оптимальных расходах армирующего компонента (равном  $5,95 \text{ кг/м}^3$ ) и пластификатора (равном  $7,7\%$ ). Прочность при сжатии, МПа: 1 – 36; 2 – 38; 3 – 40; 4 – 42; средняя плотность,  $\text{кг/м}^3$ : I – 1680; II – 1700; III – 1720

**Fig. 3.** Dependence of compressive strength (a) and average density of fine-grained concrete (b) on variable factors at optimal costs of the reinforcing component (equal to  $5.95 \text{ kg/m}^3$ ) and plasticizer (equal to  $7.7\%$ ). Compressive strength, MPa: 1 – 36; 2 – 38; 3 – 40; 4 – 42; average density,  $\text{kg/m}^3$ : I – 1680; II – 1700; III – 1720

пустимо применение методов математического анализа при условии, что не будет нарушаться условие адекватности.

1. Определяем оптимальный расход пластификатора ( $X_2$ ):

$$\frac{\partial Y_1}{\partial X_2} = 1,6 - 1,8X_2 = 0 \rightarrow X_2 = \frac{1,6}{1,8} = 0,89.$$

Рассчитываем величину натурального значения расхода пластификатора (соответствующего возможному получению максимальной прочности при сжатии мелкозернистого бетона), используя формулу декодирования фактора и данные таблицы:

$$P_{\Pi} = 6 + 2 \times 0,86 = 7,7\%.$$

2. Определение оптимального расхода армирующего компонента ( $X_4$ ):

$$\frac{\partial Y_1}{\partial X_4} = 1,9 - 2,0X_4 = 0 \rightarrow X_4 = \frac{1,9}{2,0} = 0,95.$$

В натуральных величинах оптимальный расход армирующего компонента определяем с использованием данных таблицы:

$$P_a = 5 + 1 \times 0,95 = 5,95 \text{ кг/м}^3.$$

3. Рассчитываем математические модели (полиномы) для оптимизированного значения фактора  $X_2 = 0,89$  и  $X_4 = 0,95$ . Оптимизированные функции имеют вид:

– для прочности при сжатии:

$$Y_1 = 36,3 + 3,6X_1 + 2,9X_3 + 1,2X_1X_3;$$

– для средней плотности:

$$Y_2 = 1698 + 41X_1 + 12X_3 + 9X_1X_3.$$

4. Осуществляем графическую интерпретацию функций  $Y_1 = f_1(X_1, X_3)$  и  $Y_2 = f_1(X_1, X_3)$ , которая представлена на рис. 3.

Полученные математические зависимости, оптимизационные решения, модели и их графическая интерпретация могут быть использованы при подборе состава мелкозернистого дисперсно-армированного бетона, являющегося основой для бетонного полотна. Полученные расчетные данные обязательно проверяются испытанием заформованных контрольных образцов по стандартным методикам.

### Заключение

Цифровые технологии являются одним из наиболее эффективных методов исследования технологических процессов в области строительных материалов и основой для решения широкого спектра задач в области строительного материаловедения. Реализация цифровых методов в области технологии мелкозернистого модифицированного фибробетона, являющегося основой бетонного полотна, способствует осуществлению оптимизационных решений, направленных на подбор состава мелкозернистого бетона, являющегося минеральной компонентой бетонного полотна.

Полученные математические зависимости, оптимизационные решения, модели и их графическая интерпретация могут быть использованы при подборе состава мелкозернистого дисперсно-армированного бетона, являющегося основой для бетонного полотна. Полученные расчетные данные необходимо проверять посредством контрольных замесов с определением свойств получаемых образцов по стандартным методикам.

Бетонное полотно толщиной 5–20 мм используется при строительстве гидротехнических сооружений, усилении откосов дорог, прокладываемых в горной местности, при строительстве быстровозводимых зданий.

Список литературы / References

- Zhukov A.D., Bobrova E.Yu., Bessonov I.V., Medvedev A.A., Demissi B.A. Application of statistical methods for solving problems of construction materials science. *Nanotechnologies in Construction*. 2020. Vol. 12. No. 6, pp. 313–319. DOI: 10.15828/2075-8545-2020-12-6-313-319
- Zhukov A., Shokod'ko E. Mathematical methods for optimizing the technologies of building materials. *VIII International Scientific Siberian Transport Forum. Trans Siberia 2019. Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2020. Vol. 1116, pp. 413–421. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-37919-3\\_40](https://doi.org/10.1007/978-3-030-37919-3_40)
- Bessonov I., Zhukov A., Shokod'ko E., Chernov A. Optimization of the technology for the production of foam glass aggregate. *TPACEE 2019, E3S Web of Conferences*. 2020. Vol. 164. 14016. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202016414016>
- Gudkov P., Kagan P., Pilipenko A., Zhukova E.Yu., Zinovieva E.A., Ushakov N.A. Usage of thermal isolation systems for low-rise buildings as a component of information models. *E3S Web of Conferences*. 01039. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20199701039>
- Zhukov A., Bessonov I., Bobrova E., Medvedev A., Zinovieva E. Optimization of technology of special-purpose mineral wool products. *E3S Web of Conferences, EMMFT-2020*. 2020. Vol. 244. 04003. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202124404003>
- Kodzoev M.-B., Isachenko S., Bobrova E., Efimov B., Bessonov I. Ceramic products and energy-efficient systems. *XXIII International Scientific Conference on Advance in Civil Engineering: FORM-2020*. 23–26 September 2020. Hanoi, Vietnam. DOI: 10.1088/1757-899X/869/3/032006
- Pyataev E.R., Medvedev A.A., Poserenin A.I., Burtseva M.A., Mednikova E.A., Mukhametzhanov V.M. Theoretical principles of creation of cellular concrete with the use of secondary raw materials and dispersed reinforcement. *IPICSE*. Published online: 14 December 2018. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201825101012>
- Лесовик В.С. Строительные материалы. Настоящее и будущее // *Вестник МГСУ*. 2017. Т. 12. № 1 (100). С. 9–16. DOI: 10.22227/1997-0935.2017.1.9-16
- Lesovik V.S. Construction materials. Present and future. *Vestnik MGSU*. 2017. Vol. 12. No. 1 (100), pp. 9–16. (In Russian).
- Лесовик В.С., Попов Д.Ю., Глаголев Е.С. Текстиль-бетон – эффективный армированный композит будущего // *Строительные материалы*. 2017. № 3. С. 81–84.
- Lesovik V.S., Popov D.Yu., Glagolev E.S. Textile-concrete-effective reinforced composite of the future. *Stroitel'nye Materialy [Construction Materials]*. 2017. No. 3, pp. 81–84. (In Russian).
- Efimov B., Isachenko S., Kodzoev M.-B., Dosanova G., Bobrova E. Dispersed reinforcement in concrete technology. *E3S Web of Conferences*. Published online: 09 August 2019 DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201911001032>
- Пухаренко Ю.В., Пантелеев Д.А., Морозов В.И., Магдеев У.Х. Прочность и деформативность фибробетона с применением аморфной металлической фибры // *Academia. Архитектура и Строительство*. 2016. № 1. С. 107–111.
- Pukhareno Yu.V., Panteleev D.A., Morozov V.I., Magdeev U.Kh. Strength and deformability of fiber-reinforced concrete using amorphous metal fibers. *Academia. Arkhitektura i stroitel'stvo*. 2016. No. 1, pp. 107–111. (In Russian).
- Scherer S., Michler H., Curbach M. Brücken aus Textilbeton. *Handbuch Brücken: Entwerfen, Konstruieren, Berechnen, Bauen und Erhalten*. 2014, pp. 118–129.
- Hegger J., Goralksi C., Kulas C. Schlanke Fußgängerbrücke aus Textilbeton – Sechsfeldrige Fußgängerbrücke mit einer Gesamtlänge von 97 m. *Beton-und Stahlbetonbau*. 2011. Vol. 106. Heft 2, pp. 64–71. <https://doi.org/10.1002/best.201000081>
- Schladitz F., Lorenz E., Jesse F., Curbach M. Verstärkung einer denkmalgeschätzten Tonnenschale mit Textilbeton. *Beton-und Stahlbetonbau*. 2009. Vol. 104. Heft 7, pp. 432–437. <https://doi.org/10.1002/best.200908241>
- Gelbrich S. Organisch geformter Hybridwerkstoff aus textil-bewehrtem Beton und glasfaserverstrktem. *Kunststoff. Leichter bauen – Zukunft formen*. 2012. No. 7, p. 9.
- Ehlig D., Schladitz F., Frenzel M., Curbach M. Textilbeton – Ausgeführte Projekte im überblick. *Beton-und Stahlbetonbau*. 2012. 107. No. 11, pp. 777–785. <https://doi.org/10.1002/best.201200034>
- Pyataev E., Zhukov A., Vako K., Burtseva M., Mednikova E., Prusakova M., Izumova E. Effective polymer concrete on waste concrete production. *E3S Web of Conferences*. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20199702032>
- Pyataev E.R., Pilipenko E.S., Burtseva M.A., Mednikova E.A., Zhukov A.D. Composite material based on recycled concrete. *FORM 2019. E3S Web of Conferences 97. 02032. 2019. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 032015. 2018. doi:10.1088/1757-899X/365/3/032041
- Efimov B., Isachenko S., Kodzoev M.-B., Dosanova G., Bobrova E. Dispersed reinforcement in concrete technology. *E3S Web of Conferences*. 2019. Vol. 110. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201911001032>

УДК 666.94

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-803-6-25-29>

И.В. БЕССОНОВ<sup>1</sup>, канд. техн. наук (bessonoviv@mail.ru); А.Д. ЖУКОВ<sup>1,2</sup>, канд. техн. наук (lj211@yandex.ru); П.М. ЖУК<sup>3</sup>, д-р техн. наук (peter\_05@bk.ru); Б.А. ДЕМИССИ<sup>2</sup>, аспирант (aregabekalu@gmail.com); И.С. ГОВРЯКОВ<sup>1,2</sup>, инженер, магистр (govr190@mail.ru); А.М. МИНАЕВА<sup>2</sup>, студент (20anna00@list.ru)

<sup>1</sup> Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук (127238, г. Москва, Локомотивный пр., 21)

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

<sup>3</sup> Московский архитектурный институт (государственная академия) (107031, г. Москва, ул. Рождественка, 11/4, корп.1, стр. 4)

## Вулканический туф как активная минеральная добавка для портландцемента

Использование некоторых горных пород в качестве компонента и активной минеральной добавки в составе гидравлического вяжущего позволяет снизить расход энергоемкого и дорогостоящего клинкера и тем самым снижает как стоимость вяжущего, так и углеродный след при его производстве. Важным критерием пригодности породы является ее активность: способность реагировать с компонентами цементного клинкера, в том числе и пуццолановая активность. Целью исследований явилось изучение возможности применения тонкомолотого туфа-скория и золы от сжигания кофейной шелухи в качестве активной минеральной добавки как компонента гидравлического вяжущего. Критерием пригодности принята пуццолановая активность комплексной добавки, оценка которой осуществляется различными методами. Оценка пуццолановой активности осуществлена по методу поглощения добавкой извести из известкового раствора в течение 30 сут, рекомендованных отечественными нормативами. Оценка влияния на пуццолановую активность композиционной минеральной добавки расхода золы кофейной шелухи осуществлялась с применением статистических методов и аналитической оптимизации. Эксперимент проводился в два этапа: на первом определялось оптимальное содержание золы в комплексной добавке; на втором – исследовалась кинетика поглощения СаО в течение 30 сут. Установлено, что тонкомолотый туф-скория поглощает за 30 сут до 330–332 мг/г, а в зависимости от содержания золы кофейной шелухи поглощение комплексной минеральной добавкой увеличивается до 341–343 мг/г. Экспресс-метод показал, что коэффициент активности и туфа-скория, и комплексной минеральной добавки находится в интервале 40–44%. Туф-скория, как и минеральная композиционная добавка на его основе, содержащая золу кофейной шелухи, относится к группе добавок, обладающих средней пуццолановой активностью, и может использоваться в составе минеральных вяжущих гидравлического твердения. Композиционное вяжущее может использоваться для изготовления мелкозернистых бетонов широкого функционального назначения, в том числе текстиль-усиленных бетонов и бетонного полотна.

**Ключевые слова:** пуццолановая активность, тонкомолотый туф, зола, текстиль-бетон, комплексная добавка, аналитическая оптимизация.

**Для цитирования:** Бессонов И.В., Жуков А.Д., Жук П.М., Демисси Б.А., Говряков И.С., Минаева А.М. Вулканический туф как активная минеральная добавка для портландцемента // *Строительные материалы*. 2022. № 6. С. 25–29.

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-803-6-25-29>

I.V. BESSONOV<sup>1</sup>, Candidate of Sciences (Engineering) (bessonoviv@mail.ru); A.D. ZHUKOV<sup>1,2</sup>, Candidate of Sciences (Engineering) (lj211@yandex.ru); P.M. ZHUK<sup>3</sup>, Doctor of Sciences (Engineering) (peter\_05@bk.ru); B.A. DEMISSI<sup>2</sup>, Postgraduate Student (aregabekalu@gmail.com); I.S. GOVRYAKOV<sup>1,2</sup>, Engineer, Student (govr190@mail.ru); A.M. MINAEVA<sup>2</sup>, Student (20anna00@list.ru)

<sup>1</sup> Research Institute of Building Physics, Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (21, Lokomotivnyy Driveway, Moscow, 127238, Russian Federation)

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

<sup>3</sup> Moscow Architectural Institute – MARKHI (11/4, Rozhdestvenka Street, building 1, sector 4, Moscow, 107031, Russian Federation)

### Volcanic Tuff as an Active Mineral Additive for Portland Cement

The use of some rocks as a component and an active mineral additive in the composition of a hydraulic binder reduces the consumption of energy-intensive and expensive clinker and thereby reduces both the cost of the binder and the size of the “carbon footprint” during its production. An important criterion for the suitability of a rock is its activity: ability to react with cement clinker components, including pozzolan activity. The purpose of the research is to study the possibility of using finely ground tuff-scoria and ash from the burning of coffee husks as an active mineral additive as a component of a hydraulic binder. The criterion of suitability is the pozzolan activity of a complex additive, which is evaluated by various methods. The evaluation of pozzolan activity was carried out by the method of absorption by the addition of lime from lime mortar for 30 days, recommended by national standards. The evaluation of the effect of the coffee husk ash consumption on the pozzolan activity of the composite mineral additive was carried out using statistical methods and analytical optimization. The experiment was carried out in two stages: at the first, the optimal ash content in a complex additive was determined; at the second, the kinetics of CaO absorption was studied for 30 days. It was found that finely ground tuff-scoria absorbs up to 330–332 mg/g in 30 days, and depending on the ash content of the coffee husk, the absorption of a complex mineral additive increases to 341–343 mg/g. The express method showed that the activity coefficient of tuff scoria and the complex mineral supplement is in the range of 40–44%. Tuff-scoria, as well as a mineral composite additive based on it containing coffee husk ash, belong to the group of additives with medium pozzolan activity and can be used as part of mineral binders of hydraulic hardening. Composite binder can be used for the produce of fine-grained concrete for a wide range of functional purposes, including reinforced concrete textiles and concrete canvas.

**Keywords:** pozzolanic activity, fine powder tuff, ash, concrete canvas, complex additive, analytical optimization.

**For citation:** Bessonov I.V., Zhukov A.D., Zhuk P.M., Demissi B.A., Govryakov I.S., Minaeva A.M. Volcanic tuff as an active mineral additive for portland cement. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2022. No. 6, pp. 25–29. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-803-6-25-29>

Повышение энергетической эффективности минерального вяжущего гидравлического твердения, а также материалов на его основе заключается в первую очередь в снижении затрат на его изготовление, при сохранении или улучшении его свойств [1–3]. Одним из путей в решении этой задачи является использование активных минеральных добавок, обладающих пуццолановой активностью. Такие добавки позволяют снижать как содержание клинкера в составе вяжущего, так и общее отрицательное воздействие на окружающую среду [4, 5].

Важным аспектом также является снижение плотности конструкционных и конструкционно-теплоизоляционных изделий за счет частичной замены плотного заполнителя пористым. Современные способы армирования реализуются в технологии текстиль-бетона: армирование текстильным полотном; армирование сетками из щелочестойкого стеклянного или базальтового волокна; дисперсное армирование с применением стальной, базальтовой, поливинилхлоридной фибры, а также органических или минеральных волокон.

Пуццолановая активность некоторых материалов была замечена еще с древнейших времен. Свойство некоторых излившихся вулканических пород в контакте с негашеной известью давало водостойкие соединения и использовалось эллинами (туфы острова Санторин) и римлянами (туфы карьера Поццуоли в Италии), что и дало наименование этому классу веществ. Суть пуццолановой активности заключается в связывании  $\text{CaO}$ , содержащегося в портландцементе, аморфным кремнеземом, содержащимся в минеральных добавках, с получением низкоосновных гидросиликатов кальция [6, 7].

Минеральные добавки, обладающие пуццолановой активностью, могут быть как природного, так и искусственного происхождения. Подобной активностью также обладают некоторые отходы, продукты сжигания рисовой шелухи и пр., а также побочные продукты других производств, основные металлургические шлаки, золы тепловых станций, продукты химического синтеза, каолинсодержащие обожженные глины и пр. Туфы традиционно относят к группе активных минеральных добавок, характеризующихся средним уровнем пуццолановой активности. Учитывая отличающийся минеральный состав различных туфов, необходимо проводить исследования.

Механизм пуццолановой активности туфа, как и других минеральных добавок, содержащих аморфный кремнезем, основан на следующих процессах. Основным является способность извести, содержащейся в минеральном гидравлическом вяжущем, связывать в водной среде аморфный или мелкодисперсный кремнезем. Результатом является образование гидросиликата кальция, который и обуславливает гидравлическое твердение минерально-известкового материала (нарастание его прочности под водой после предварительного затвердевания на воздухе); при этом формируется стойкость цементного камня к выщелачивающему действию воды.

Согласно существующим концепциям, реакция гидроксида кальция с кремнеземом начинается с поверхности зерен и постепенно захватывает более глубокие слои. Результатом является образование гидросиликатов тоберморитовой группы  $\text{C-S-H}$  (I) с пластинчатым строением кристаллов [6, 7].

Оценку пуццолановой активности осуществляют различные методы, основанные на отечественных или зарубежных стандартах. Для России базовым является метод поглощения добавкой извести из известкового раствора в течение 30 сут, а также проходит апробацию экспресс-метод, позволяющий оценивать свойства минеральных композиций по коэффициенту активности. Международными нормами (BS EN 196-5, NF P18-513:2010) рекомендуются методы определения по Чапелю (для высокоактивных минеральных добавок, таких как метакаолин) или Фратини (определение индекса активности по прочности) [8–10].

Вулканические туфы, в том числе и туф-скория, широко применяют в строительной практике в качестве минеральных отсыпок, в том числе дорожного полотна. Его месторождения разрабатываются в Эфиопии и Латинской Америке. Существуют предположения считать, что туф-скория, как минеральная добавка в портландцемент, эффективна и позволяет, с одной стороны, улучшать свойства цементного теста, особенно в условиях щелочно-кремнеземной реакции, а с другой – модифицирует свойства материала: повышает его прочностные характеристики, стойкость к выщелачиванию и карбонизации бетона. Материалы аналогичного происхождения и состава (из вулканических регионов Камеруна: Пенджа, Томбель и Фумбот) имеют доказанную пуццолановую активность. Тем не менее пуццолановая активность туфа-скория требует подтверждения [11–13].

Целью исследований явилось изучение возможности применения тонкомолотого туфа-скория и золы от сжигания кофейной шелухи в качестве активной минеральной добавки как компонента гидравлического вяжущего. Критерием пригодности принята пуццолановая активность комплексной добавки, оценка которой осуществляется различными методами.

Исследования выполнены в рамках плана фундаментальных научных исследований Минстроя России и Российской академии архитектуры и гражданских наук на 2022–2023 гг. по теме 3.1.2. «Разработка научных основ создания мелкозернистого бетона, армированного текстильным материалом (текстильный бетон)».

### Методы и материалы

Минеральные добавки вводятся в состав бетонной смеси в целях коррекции ее реологических характеристик (подвижности, связности, тиксотропии), а также для регулирования свойств цементного (бетонного) камня. Активность минеральных добавок как компонентов гидравлического вяжущего оценивается прямыми или косвенными методами.

Прямые методы основаны на измерении содержания  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  в ходе протекания пуццолановой реакции.

К таким методам относят химический, рентгенофазовый и дифференциально-термический методы анализа, метод насыщенного известкового раствора и метод Фраттини. В основе косвенных методов лежит измерение физических свойств испытуемого образца, которые указывают на степень активности пуццолановой добавки: измерение прочности при сжатии, электропроводности или выделения тепла по калориметрии совместно с оценкой степени гидратации вяжущего [14–16].

Активность туфа-скория и комплексной добавки на его основе определялась двумя методами: по поглощению добавками извести (базовый метод) и экспресс-методом, предложенным В.В. Строковой. Экспресс-метод основан на определении коэффициента активности кремнеземистого сырья ( $K_a$ , %) по следующей методике. Навеску комплексной минеральной добавки на основе туфа-скория смешивают с раствором NaOH (30%) и эту смесь подвергают термообработке в течение 2 ч при 90°C. Далее суспензию фильтруют, минеральный остаток промывают, высушивают до постоянной массы и взвешивают.

Коэффициент активности определяют по формуле:

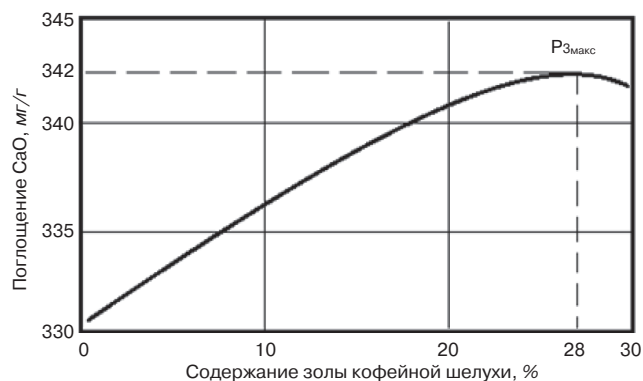
$$K_a = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \cdot 100\%,$$

где  $m_1$  – масса исходной комплексной добавки, г;  $m_2$  – масса высушенного минерального остатка, г.

Базовый метод основан на способности поглощения добавками извести из известкового раствора и в течение многих лет был в России единственным стандартным методом, по которому определяли активность минеральных добавок.

Методика проведения эксперимента, положенная в основу базового метода, заключается в следующем [16, 17]. Навеску туфа-скория или комплексной добавки массой 2 г смешивают со 100 мл насыщенного раствора извести. Далее каждые два дня в течение 30 сут проводят титрование 0,05N раствором HCl, применяя индикатор метиловый оранжевый. Количество CaO, поглощенное 1 г добавки от начала опыта, рассчитывается по суммарному количеству CaO, поглощенного за все время испытаний.

Оценка влияния на пуццолановую активность композиционной минеральной добавки расхода золы ко-



**Рис. 1.** Зависимость максимального поглощения CaO от состава комплексной минеральной добавки

**Fig. 1.** Dependence of the maximum absorption of CaO on the composition of the complex mineral additive

фейной шелухи осуществлялась с применением статистических методов и методологии аналитической оптимизации, разработанной в НИУ МГСУ [18, 19]. Эксперимент проводился в два этапа: на первом определялось оптимальное содержание золы в комплексной добавке; на втором – исследовалась кинетика поглощения CaO в течение 30 сут; также определялись коэффициенты активности туфа-скория и комплексной добавки. При этом не рассматривались другие возможные аспекты влияния комплексной минеральной добавки (туфа-скория и золы), в частности нано-эффекты, проявляющиеся уже в смешанном вяжущем.

Исследования проводились в лабораториях НИУ МГСУ и НИИСФ РААСН. Часть исследований, изложенных в данной работе, проведена с использованием оборудования Центра коллективного пользования (ЦКП) им. проф. Ю.М. Борисова ВГТУ, получившего поддержку Министерства науки и высшего образования РФ, Соглашение № 075-15-2021-662.

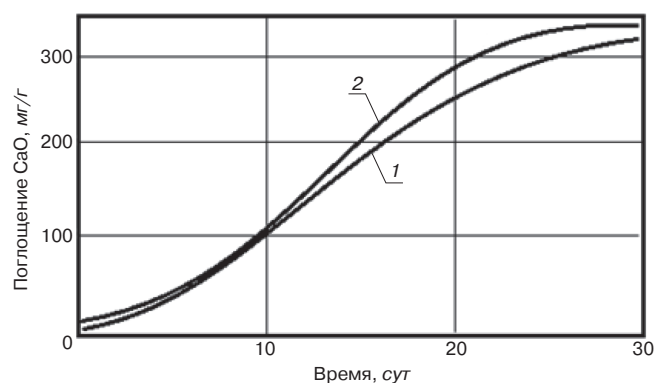
### Результаты

В эксперименте (базовый метод) содержание золы кофейной шелухи в составе комплексной минеральной добавки изменялось от 0 (чистый туф-скория) до 30%. Количество CaO, поглощенное 1 г добавки от начала опыта, рассчитывалось нарастающим итогом каждые два дня, а общая величина активности определялась по суммарному количеству CaO, поглощенного за 30 сут испытаний (фактор отклика У).

В результате установлено, что влияние расхода золы (варьируемый фактор X) на интегральное поглощение CaO за 30 сут носит экстремальный характер (рис. 1). Тонкомолотый туф-скория поглощает за 30 сут до 330–332 мг/г, а в зависимости от содержания золы кофейной шелухи поглощение комплексной минеральной добавкой увеличивается до 341–343 мг/г (рис. 2). Экспресс-метод показал, что коэффициент активности и туфа-скория и комплексной минеральной добавки находится в интервале 40–44%.

### Обсуждение

Полученные результаты показывают, что чистый туф-скория, а также комплексная минеральная до-



**Рис. 2.** Активность туфа-скория (1) и комплексной минеральной добавки по поглощению CaO (2). Содержание золы кофейной шелухи – 28%

**Fig.2.** The activity of tuff-scoria (1) and complex mineral additive for the absorption of CaO (2). Ash content of coffee husks – 28%

бавка на его основе и зола кофейной шелухи относятся к группе материалов, обладающих средней пуццолановой активностью и могут быть использованы в составе минерального гидравлического вяжущего.

Оптимальное содержание золы в минеральной добавке может быть рассчитано как результат аналитической оптимизации уравнения регрессии, полученного на основании обработки результатов активного эксперимента:

$$Y = 336 + 12X - 7X^2;$$

$$\frac{\partial Y}{\partial X} = 12 - 14X = 0 \rightarrow X = \frac{12}{14} = 0,86;$$

$$P_{з, \text{opt}} = 15 + 15 \cdot 0,86 = 28\%;$$

$$Y_{\text{max}} = 336 + 12 \cdot 0,86X - 7(0,86)^2 = 342 \text{ мг / г.}$$

Учитывая, что разрабатываемое вяжущее будет использоваться в составе бетона, твердеющего и эксплуатируемого в том числе и в условиях жаркого климата Эфиопии, практическую ценность представляет оценка влияния температурного фактора на пуццолановую активность комплексной добавки, и в частности в интервале температуры от 20 до 40°C, а в экспресс-методе — до 90°C.

Проведенный эксперимент показал, что изменения по поглощению СаО незначительны и вполне укладываются в интервал, установленный для туфаскория и комплексной минеральной добавки: от 330 до 340 мг/г. При этом необходимо учитывать, что гидратация СаО является экзотермической реакцией, а растворимость гидроксида кальция определяется его отрицательной теплотой растворения.

Введение мелкодисперсных зол в состав минеральных гидравлических композиций оказывает влияние на реологические характеристики бетонных смесей, а также на свойства бетонов. При оценке взаимодействий в системе «известь—минеральная добавка» необходимо учитывать как температурный фактор, так и кинетические закономерности твердения. Сложность кинетики гидратации портландцемента затрудняет количественную оценку образования Са(ОН)<sub>2</sub> в растворе. После полной гидратации содержание Са(ОН)<sub>2</sub> можно принимать в количестве 23–25% от исходной массы цемента.

Температурные воздействия, с одной стороны, ускоряют физико-химические и химические процессы гидратации и последующего твердения, но и замедляют реакции, протекающие с экзотермическим эффектом. В частности, растворимость СаО падает при увеличении температуры. Поэтому некоторое количество Са(ОН)<sub>2</sub>, растворенного при температуре ниже 40°C, будет осажаться при температуре выше 40°C, в том числе на кристаллах новообразованных и частичках золы. В итоге повышенная температура эксперимента способствует увеличению скорости пуццолановой реакции [20].

### Заключение

Установлено, что для оценки активности комплексной минеральной добавки являются оптимальными

экспресс-метод и метод поглощения добавкой извести из известкового раствора. Тонкомолотый туф-скория поглощает за 30 сут до 330–332 мг/г, а в зависимости от содержания золы кофейной шелухи поглощение комплексной минеральной добавкой увеличивается до 341–343 мг/г. Проведенный эксперимент показал, что в интервале температуры 20–40°C изменения по поглощению СаО незначительны и укладываются в интервал, установленный для туфа-скория и комплексной минеральной добавки. Повышение температуры практически не влияет на общее поглощение СаО из раствора, но повышает скорость химических реакций.

Базовый и экспресс-методы показали, что туф-скория, как и минеральная композиционная добавка на его основе, содержащая золу кофейной шелухи, относятся к группе добавок, обладающих средней пуццолановой активностью и могут использоваться в составе минеральных вяжущих гидравлического твердения.

Замена части клинкера туфом-скория или комплексной минеральной добавкой позволит снизить энергоемкость гидравлического вяжущего по факту его производства; положительно повлияет на экологические характеристики технологии, и в частности на углеродный след и ESG-показатели производителя. Композиционное вяжущее может использоваться для изготовления мелкозернистых бетонов широкого функционального назначения, в том числе текстиль-усиленных бетонов и бетонного полотна.

### Список литературы / References

1. Dhir R.K., Limbachiya M.C., McCarthy M.J., Chaipanich A. Evaluation of Portland limestone cements for use in concrete construction. *Materials and Structures*. 2007. Vol. 40. Iss. 5, pp. 459–473. DOI: 10.1617/s11527-006-9143-7
2. Танг Ван Лам, Нго Суан Хунг, Ву Ким Зиен, Булгаков Б.И., Баженова С.И., Александрова О.В. Геополимерный бетон с использованием многотоннажных техногенных отходов // *Строительство: наука и образование*. 2021. № 2. С. 17–37. DOI: 10.22227/2305-5502.2021.2.2
2. Tang Van Lam, Ngo Suan Khung, Vu Kim Zien, Bulgakov B.I., Bazhenova S.I., Aleksandrova O.V. Geopolymer concrete using multi-tonnage technogenic waste. *Stroitelstvo, nauka, obrazovanie*. 2021. Vol. 11. No. 2, pp. 17–37. (In Russian). DOI: 10.22227/2305-5502.2021.2.2
3. Ramachandran V.S. (ed) Concrete Admixtures Handbook – Properties, Science and Technology. 2-nd ed. William Andrew Publishing, New York. 1995. 1066 p.
4. Seiichi Hoshino, Kazuo Yamada, Hiroshi Hirao, XRD/Rietveld analysis of the hydration and strength development of slag and limestone blended cement. *Journal of Advanced Concrete Technology*. 2006. Vol. 4. No. 3, pp. 357–367. DOI: 10.3151/JACT.4.357
5. Mateusz Radlinski, Jan Olek. Investigation into the synergistic effects in ternary cementitious systems containing Portland cement, flyash and silica fume. *Cement & Concrete*

- Composites. 2012. Vol. 34, pp. 451–459 <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.11.014>
6. Ву Ким Зиен, Баженова С.И., Танг Ван Лам. Влияние минеральных добавок, летучей золы, доменного шлака на механические свойства пенобетона // *Строительство и реконструкция*. 2020. № 2 (88). С. 25–34. DOI: <https://doi.org/10.33979/2073-7416-2020-88-2-25-34>
  6. Vu Kim Zien, Bazhenova S.I., Tang Van Lam. Influence of mineral additives, fly ash, blast furnace slag on the mechanical properties of foam concrete. *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya*. 2020. No. 2 (88), pp. 25–34. DOI: <https://doi.org/10.33979/2073-7416-2020-88-2-25-34>
  7. Vitruvius M. Ten books on architecture. Ingrid Rowland T.N. Howe. 1999, 2014. Cambridge University Press. 324 p. DOI: 10.1017/CBO9780511840951
  8. Zhukov A.D., Bessonov I.V., Demissi Bekele A., Zinoveva E.A. Analytical optimization of the dispersion-reinforced fine-grained concrete composition. *CATPID 2020. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 1083. (2021) 012037. doi:10.1088/1757-899X/1083/1/012037
  9. Рахимов Р.З., Рахимова Н.Р. Строительство и минеральные вяжущие прошлого, настоящего и будущего // *Строительные материалы*. 2013. № 1. С. 124–128.
  9. Rakhimov R.Z., Rakhimova N.R. Construction and mineral binders of the past, present and future. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2013. No. 1, pp. 124–128. (In Russian).
  10. Sigh N.D., Middendorf B. Chemistry of blended cements. Silica fume, metacaolin, reactive ash from agricultural wastes, inert materials and non-Portland blended cements. *Cement International*. 2009. Vol. 7. No. 6, pp. 78–92.
  11. Fernandez R., Martirena F., Scrivener K.L. The origin of the pozzolanic activity of calcined clay minerals: A comparison between kaolinite, illite and montmorillonite. *Cement and Concrete Research*. 2001. Vol. 41 (1), pp. 113–122. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.09.013>
  12. Shannag M., Charif A., Naser S., Faisal F., Karim A. Structural behavior of lightweight concrete made with scoria aggregates and mineral admixtures. *International Conference World Academy of Science, Engineering and Technology*. London, UK. 2014. Vol. 8, pp. 105–109. DOI: 10.13140/2.1.4582.1124
  13. Рахимов Р.З., Рахимова Н.Р., Гайфуллин А.Р., Стоянов О.В. Влияние добавки в портландцемент прокаленной и молотой полиминеральной каолинитсодержащей глины на прочность цементного камня // *Вестник Казанского технологического университета*. 2015. № 5. С. 80–83.
  13. Rakhimov R.Z., Rakhimova N.R., Gayfullin A.R., Stoyanov O.V. The effect of the addition of calcined and young polymineral kaolinite-containing clay to Portland cement on the strength of cement stone. *Vestnik of Kazan Technological University*. 2015. Vol. 18. No. 5, pp. 80–83.
  14. Bessonov I.V., Ushakov A.Yu., Zhukov A.D., Vidiborenko V.G. Assessment of light concrete frost resistance. *International Science and Technology Conference (FarEastCon 2020). IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 1079 (2021) 022078. doi:10.1088/1757-899X/1079/2/022078
  15. Tchamdjou W.H.J., Grigoletto S., Michel F., Courard L., Abidi M.L., Cherradi T. An investigation on the use of coarse volcanic scoria as sand in Portland cement mortar. *Case Studies in Construction Materials*. 2017. No. 7, pp. 191–206. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2017.07.005>
  16. Николаенко Е.А. Исследования пуццолановых портландцементов на основе эффузивных горных пород // *Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость*. 2014. № 1 (6). С. 66–73.
  16. Nikolaenko E.A. Studies of pozzolan Portland cement based on effusive rocks. *Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost'*. 2014. No. 1, pp. 69–73. (In Russian).
  17. Бутт Ю.М., Сычев М.М., Тимашев В.В. Химическая технология вяжущих материалов. М.: Высшая школа, 1980. 472 с.
  17. Butt Yu.M., Sychev M.M., Timashev V.V. *Khimicheskaya tekhnologiya vyazhushchikh materialov* [Chemical technology of binders]. Moscow: Vysshaya shkola. 1980. 472 p.
  18. Жуков А.Д., Боброва Е.Ю., Бессонов И.В., Медведев А.А., Демисси Б.А. Применение статистических методов для решения задач строительного материаловедения // *Нанотехнологии в строительстве: Научный интернет-журнал*. 2020. Т. 12. №. 6. С. 313–319. DOI: 10.15828/2075-8545-2020-12-6-313-319
  18. Zhukov A.D., Bobrova E.Yu., Bessonov I.V., Medvedev A.A., Demissi B.A. Application of statistical methods for solving problems of building materials science. *Nanotekhnologii v stroitel'stve: nauchnyi internet zhurnal*. 2020. Vol. 12. No. 6, pp. 313–319. (In Russian). DOI: 10.15828/2075-8545-2020-12-6-313-319
  19. Жуков А.Д., Боброва Е.Ю., Бессонов И.В., Горбунова Э.А., Демисси Б.А. Материалы на основе модифицированного гипса для фасадных систем // *Нанотехнологии в строительстве: Научный интернет-журнал*. 2021. Т. 13. № 3. С. 144–149.
  19. Zhukov A.D., Bessonov I.V., Bobrova E.Yu., Gorbunova E.A., Demissie B.A. Materials based on modified gypsum for facade systems. *Nanotekhnologii v stroitel'stve: nauchnyi internet zhurnal*. 2021. Vol. 13 (3), pp. 144–149. (In Russian). DOI: 10.15828/2075-8545-2021-13-3-144-149
  20. Потапова Е.Н., Манушина А.С., Зырянов М.С., Урбанов А.В. Методы определения пуццолановой активности минеральных добавок // *Строительные материалы: оборудование, технологии XXI века*. 2017. № 7–8. С. 29–33.
  20. Potapova E.N., Manushina A.S., Zyryanov M.S., Rubanov A.V. Methods for determining the pozzolan activity of mineral additives. *Stroitel'nye materialy: oborudovanie, tekhnologii XXI veka*. 2017. No. 7–8, pp. 29–33. (In Russian).

УДК 681.7.057

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-803-6-30-34>

П.П. ПАСТУШКОВ<sup>1,2</sup>, канд. техн. наук (pavel-one@mail.ru);  
В.Г. ГАГАРИН<sup>1,2,3</sup>, д-р техн. наук, член-корр. РААСН (gagarinv@yandex.ru);  
Д.А. ИЛЬИН<sup>3,4</sup>, канд. техн. наук (ilin.d@tn.ru);  
И.Ф. НАГАЕВ<sup>4</sup>, технический директор направления ПМ и PIR (nagaev@tn.ru)

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

<sup>2</sup> Научно-исследовательский институт механики МГУ им. М.В. Ломоносова (119192, г. Москва, Мичуринский пр-т, 1)

<sup>3</sup> Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (129337, г. Москва, Ярославское ш., 26)

<sup>4</sup> ООО «ТехноНИКОЛЬ-Строительные Системы» (129110, г. Москва, ул. Гиляровского, д. 47, стр. 5, эт. 5, пом. I, комн. 13)

## Новые результаты по исследованиям изменения теплопроводности с течением времени плит из пенополиизоцианурата (PIR) современного производства

Приведены результаты комплексных исследований изменения теплопроводности плит из пенополиизоцианурата (PIR) современного производства, облицованных с двух сторон фольгой. Проведено сравнение двух методик определения установившейся теплопроводности: показано, что методика НИИСФ имеет преимущества перед методикой, изложенной в ГОСТ Р 56590–2016. По результатам серии экспериментов на самом современном в РФ испытательном оборудовании найден закон изменения теплопроводности с течением времени испытанной марки PIR и значения установившейся теплопроводности при средней температуре в образце 10 и 25°C. При использовании наиболее точного прибора по определению теплопроводности получена практически абсолютная сходимость результатов экспериментов с результатами математического моделирования по методике НИИСФ. Объяснены различия в значениях установившейся теплопроводности при испытаниях на разных приборах. Для исследованной марки PIR найден коэффициент пересчета между значениями теплопроводности при средней температуре 25 и 10°C. Полученные новые результаты и методические наработки имеют большую практическую значимость в связи с расширением объема применения плит PIR в современном строительстве.

**Ключевые слова:** установившаяся теплопроводность, плиты из пенополиизоцианурата, газонаполненные пластмассы, математическое моделирование.

**Для цитирования:** Пастушков П.П., Гагарин В.Г., Ильин Д.А., Нагаев И.Ф. Новые результаты по исследованиям изменения теплопроводности с течением времени плит из пенополиизоцианурата (PIR) современного производства // *Строительные материалы*. 2022. № 6. С. 30–34. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-803-6-30-34>

P.P. PASTUSHKOV<sup>1,2</sup>, Candidate of Sciences (Engineering) (pavel-one@mail.ru); V.G. GAGARIN<sup>1,2,3</sup>, Doctor of Sciences (Engineering) (gagarinv@yandex.ru); D.A. IL'IN<sup>3,4</sup>, Candidate of Sciences (Engineering) (ilin.d@tn.ru); I.F. NAGAEV<sup>4</sup>, Head of Technical Support Division SM and PIR (CTO) (nagaev@tn.ru)

<sup>1</sup> Research Institute of Building Physics Russian Academy Architecture and Construction sciences (21, Lokomotivnyy Driveway, Moscow, 127238, Russian Federation)

<sup>2</sup> Institute of Mechanics Lomonosov Moscow State University (1, Michurinsky Avenue, Moscow, 119192, Russian Federation)

<sup>3</sup> Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (26, Yaroslavskoye Highway, Moscow, 129337, Russian Federation)

<sup>4</sup> LLC "TechnoNICOL-Construction Systems" (room 13/ I, floor 5, 47/5 Gilyarovskogo Street, Moscow, 129110, Russian Federation)

### New Results on Research on Changes in Thermal Conductivity Over Time of Boards Made of Polyisocyanurate Foam (PIR) of Modern Production

The article is devoted to the description of complex studies of changes in the thermal conductivity of boards made of polyisocyanurate foam (PIR) of modern production, lined on both sides with foil. A comparison of two methods for determining the steady-state thermal conductivity is carried out – it is shown that the NISF method is preferable to the method set out in GOST R 56590–2016. According to the results of a series of experiments on the most modern test equipment in the Russian Federation, the law of the change in thermal conductivity over time of the tested PIR brand and the values of the steady-state thermal conductivity at an average temperature in the sample of 10°C and 25°C was found. When using the most accurate device for determining thermal conductivity, almost absolute convergence of the experimental results with the results of mathematical modeling using the NISF method was obtained. The differences in the values of the steady-state thermal conductivity, which are obtained during tests on different devices, are explained. The conversion coefficient between the values of thermal conductivity PIR at an average temperature of 25°C and 10°C is found. The obtained new results and methodological developments are of great practical importance in connection with the widespread use of PIR boards in modern construction.

**Keywords:** stationary thermal conductivity, polyisocyanurate foam boards, gas-filled plastics, mathematical modeling.

**For citation:** Pastushkov P.P., Gagarin V.G., Il'in D.A., Nagaev I.F. New results on research on changes in thermal conductivity over time of boards made of polyisocyanurate foam (PIR) of modern production. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2022. No. 6, pp. 30–34. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-803-6-30-34>

Пенополиуретаны появились более 80 лет назад. В настоящее время этот вид материала составляет самую большую долю в сегменте термореактивных полимерных эффективных утеплителей и активно применяется в строительной сфере. Самой современной модификацией полиуретанов, используемых в строительстве, является пенополиизоцианурат (PIR) [1, 2]. В работах [1, 2] описаны принципы раз-

работки рецептур изделий из вспененного полиуретана (PUR) и полиизоцианурата (PIR), однако в них исследуются материалы 1990-х гг.

Пенополиизоцианурат (PIR) относится к классу газонаполненных пластмасс. Теплопроводность таких материалов меняется с течением времени вследствие изменения газового состава в порах [3]. Авторами [4] установлены два основных фактора изменения во вре-



мени теплопроводности газонаполненных полимерных теплоизоляционных материалов: проникновение воздуха в ячейку и снижение концентрации газа в ячейках. В работах [5, 6] определено, что теплопроводность закрытоячеистых полимерных теплоизоляционных материалов (PUR) в течение длительных промежутков времени в значительной степени зависит от процессов газообмена между ячейкой и окружающей средой. Приведены результаты влияния вида газообразователя на теплопроводность PUR во времени. В работе [7] изучено изменение теплопроводности во времени плит PUR, облицованных газопроницаемыми обкладками – бумагой и стеклохолстом. Показано, что кривая изменения теплопроводности стабилизируется после первоначального роста. Полученные зависимости позволяют рассчитывать декларируемую теплопроводность PUR на весь срок службы. При этом в работе не представлены результаты исследования изделий PIR, облицованных газонепроницаемыми обкладками (фольгой). В работе [3] предложена математическая модель, описывающая изменение теплопроводности газонаполненных полимерных теплоизоляционных материалов во времени. Применимость математической модели проверена на примере плит из пенополиизоцианурата (PIR) с облицовкой из фольги.

Настоящая работа посвящена описанию результатов комплекса исследований теплопроводности плит из пенополиизоцианурата (PIR) современного производства, облицованных с двух сторон фольгой, – LOGICPIR PROF Ф/Ф, проведенного в 2020–2022 гг. в секторе испытаний теплофизических характеристик строительных материалов лаборатории строительной теплофизики НИИСФ РААСН совместно с компанией ТехноНИКОЛЬ.

#### Методики определения установившейся теплопроводности PIR

Теплопроводность пенополиизоцианурата (PIR) меняется с течением времени. Важной задачей для специалистов является определение теплопроводности газонаполненных полимерных теплоизоляционных материалов после прекращения процесса замещения газа, закачиваемого в поры при производстве, на воздух и установления постоянной концентрации газовой смеси в ячейках – установившейся теплопроводности. Этот процесс, в зависимости от ряда факторов, может занимать достаточно длительное время, поэтому практический интерес представляют усовершенствованные методы такого определения.

Можно выделить два подхода к определению установившейся теплопроводности PIR:

1. Подвергнуть испытуемые образцы воздействию повышенной температуры, чтобы ускорить процесс диффузии газов, и после этого определить теплопроводность – такой метод положен в основу Приложения С «Определение термического сопротивления и теплопроводности после старения» ГОСТ Р 56590–2016 «Плиты на основе пенополиизоцианурата теплозвукоизоляционные. Технические условия».

2. Провести серию испытаний теплопроводности образцов через различные промежутки времени и по математической модели получить уравнение изменения теплопроводности с течением времени, а также значение установившейся теплопроводности – такая методика разработана в лаборатории строительной теплофизики НИИСФ РААСН [3] и легла в основу Методического пособия по назначению расчетных теплофизических показателей строительных материалов и изделий [8]. На первом этапе исследований в 2020–2021 гг. был проведен сравнительный анализ результатов, полученных по двум описанным методикам.

Как такового понятия «установившейся теплопроводности» в ГОСТ Р 56590–2016 нет, а есть понятие «теплопроводности после старения». Если принять, что два этих понятия близки либо вообще тождественны, то методика, описанная в Приложении С ГОСТ Р 56590–2016 и заключающаяся в сочетании метода «испытания свежизготовленного образца» и метода «с применением фиксированных приращений», вызывает ряд вопросов. Согласно описанному в действующей редакции алгоритму, определяется начальная теплопроводность образцов, далее образцы подвергаются воздействию повышенных температур (70°C) в течение 21 сут, после этого вновь определяется теплопроводность. По результатам испытаний к начальному значению теплопроводности прибавляется фиксированное в табл. С.2 приращение. Видимо, при переводе зарубежного прообраза данного стандарта (либо же в оригинале зарубежного стандарта) допущена опечатка, и фиксированное приращение должно прибавляться к значению теплопроводности, полученному после воздействия повышенных температур, а не к начальному значению. Также достаточно условно выбран период воздействия повышенной температуры – три недели. При этом в работе [6] отмечается, что теплопроводность образцов пенополиуретана даже после хранения в течение 39 недель при 70°C меньше, чем теплопроводность образцов, которые хранились при комнатной температуре в течение пяти лет. В целом, Приложение С ГОСТ Р 56590–2016 слишком объемно и сложно для восприятия.

В этом плане методика, разработанная в НИИСФ [3, 8], не предлагает необоснованных дополнительных экспериментальных действий. Она заключается в серии определений теплопроводности образцов через различные промежутки времени после момента производства и расчета по полученным данным некоторых параметров математической модели изменения теплопроводности с течением времени газонаполненных пластмасс. Полученные экспериментальные данные подтвердили адекватность предложенной математической модели. При этом следует признать, что расчетная часть методики НИИСФ также сложна для восприятия и ее необходимо доработать до простого в применении инженерного подхода.

Значение установившейся теплопроводности плит из пенополиизоцианурата LOGICPIR PROF Ф/Ф, полученное по методике ГОСТ Р 56590–2016, было

на 0,002 Вт/(м·°C) меньше, чем полученное по методике НИИСФ. Такая разница очень существенна для исследуемого типа теплоизоляционных материалов. По совокупности замечаний к методике Приложения С ГОСТ Р 56590–2016, описанных выше, было принято решение проводить второй этап исследования по методике НИИСФ [8].

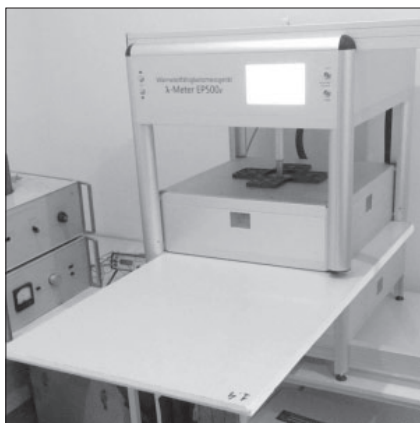
**Результаты экспериментальных исследований теплопроводности PIR**

Для проведения второго этапа исследований изменения теплопроводности с течением времени в сектор испытаний теплофизических характеристик строительных материалов была доставлена одна заводская упаковка плит из пенополиизоцианурата LOGICPIR PROF Ф/Ф непосредственно в день ее производства – 31.01.2021 г. Далее была проведена серия измерений теплопроводности по методике ГОСТ 7076–99 «Материалы и изделия строительные. Метод определения теплопроводности термического сопротивления при стационарном тепловом режиме» образцов из пенополиизоцианурата LOGICPIR PROF Ф/Ф при средней температуре в образце 10 и 25°C спустя 1, 3, 7, 15, 30, 60, 90, 120, 240 и 360 сут после производства.

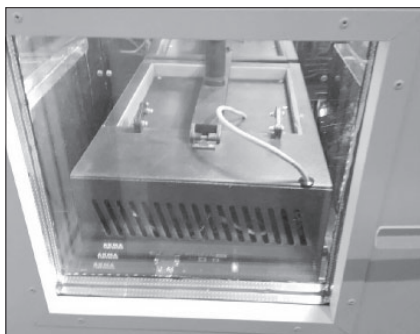
Испытания проводились на приборе для измерения теплопроводности Lambda-Meter EP500e (Германия),

приобретенном НИИСФ РААСН в рамках программы Минстроя РФ в 2020 г., а также (параллельно) на отечественном приборе – измерителе теплопроводности ИТП-МГ4 «250», который достаточно давно используется во многих лабораториях РФ. О некоторых различиях в результатах измерений теплопроводности PIR и их причинах на разных приборах отечественного производства рассказано в работе [9].

Прибор для измерения теплопроводности Lambda-Meter EP500e имеет минимальную погрешность измерений среди всех мировых аналогов – менее 1%; позволяет испытывать образцы разных размеров, вплоть до цельных плит (рис. 1), а также измерять теплопроводность фактически во всем диапазоне температуры применения строительных материалов без дополнительных операций. Он реализует одну из двух широко распространенных принципиальных схем приборов для измерения теплопроводности, описанных в том числе в ГОСТ 7076, – «прибор с горячей охранной зоной». Измеритель теплопроводности ИТП-МГ4 «250» реализует другую принципиальную схему – «прибор, оснащенный тепломером». Заявленная погрешность прибора до 5%. Испытания проводятся на образцах размерами 250×250 мм. Стабильно получать результаты измерения теплопроводности на нем можно при средней температуре в образце, близкой к комнатной. Для



**Рис. 1.** Испытание цельной плиты LOGICPIR PROF Ф/Ф на приборе Lambda-Meter EP500e  
**Fig. 1.** Testing of solid plates LOGICPIR PROF F/F on the Lambda-Meter EP500e device



**Рис. 2.** Испытания на измерителе теплопроводности ИТП-МГ4 «250», помещенном в климатическую камеру  
**Fig. 2.** Tests on the ITP-MG4 «250» thermal conductivity meter placed in a climate chamber

**Таблица 1**  
**Table 1**

**Результаты испытаний теплопроводности образцов LOGICPIR PROF Ф/Ф**  
**Test results of thermal conductivity samples LOGICPIR PROF F/F**

Количество суток после даты производства	Испытания на приборе Lambda-Meter EP500e		Испытания на измерителе ИТП-МГ4 «250»
	Теплопроводность при средней температуре 10°C, λ <sub>10</sub> , Вт/(м·°C)	Теплопроводность при средней температуре 25°C, λ <sub>25</sub> , Вт/(м·°C)	Теплопроводность при средней температуре 25°C, λ <sub>25</sub> , Вт/(м·°C)
1	0,0185	0,0202	0,0207
3	0,0186	0,0203	0,021
7	0,0187	0,0204	0,0213
15	0,0188	0,0205	0,0213
30	0,0191	0,0209	0,022
60	0,0197	0,0214	0,0223
90	0,02	0,0219	0,0233
120	0,0202	0,0221	0,0237
240	0,0205	0,0224	0,024
360	0,0207	0,0226	0,0247

**Таблица 2**  
**Table 2**

**Параметры уравнения изменения теплопроводности с течением времени**  
**Parameters of the equation of thermal conductivity change over time**

Параметр	Испытания на приборе Lambda-Meter EP500e		Испытания на измерителе ИТП-МГ4 «250» при средней температуре 25°C
	при средней температуре 10°C	при средней температуре 25°C	
λ <sub>0</sub> , Вт/(м·°C)	0,0185	0,0202	0,0207
(λ <sub>1</sub> -λ <sub>2</sub> )ζ <sub>зд</sub> , Вт/(м·°C)	0,0021	0,0023	0,0038
s, сут <sup>-1</sup>	0,014	0,014	0,014

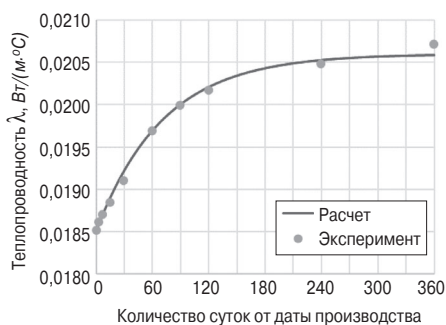


Рис. 3. Изменение теплопроводности при 10°C плит LOGICPIR PROF Ф/Ф

Fig. 3. Change in thermal conductivity at 10°C plates LOGICPIR PROF F/F

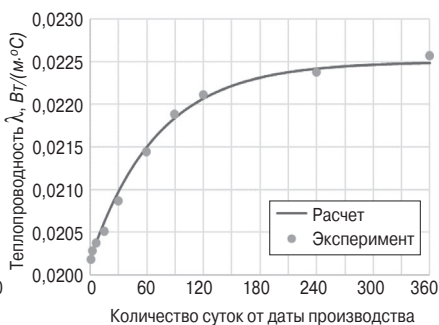


Рис. 4. Изменение теплопроводности при 25°C LOGICPIR PROF Ф/Ф

Fig. 4. Change in thermal conductivity at 25°C plates LOGICPIR PROF F/F

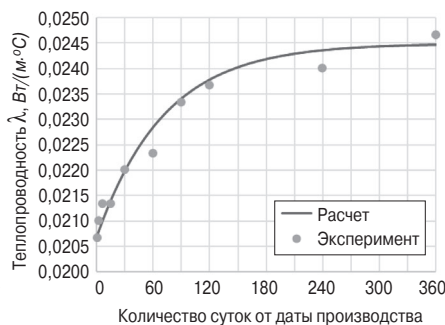


Рис. 5. Изменение теплопроводности при 25°C LOGICPIR PROF Ф/Ф (измерения проведены на ИТП-МГ4 «250»)

Fig. 5. Change in thermal conductivity at 25°C plates LOGICPIR PROF F/F (measurements were carried out on ИТП-МГ4 «250»)

стабильных измерений при средней температуре в образце, отличной от комнатной, необходимо помещать данный прибор в климатическую камеру, где создавать температуру, близкую к необходимой средней температуре в образце (рис. 2).

Результаты испытаний при средней температуре в образце 10 и 25°C, полученные на приборе Lambda-Meter EP500e, а также при средней температуре 25°C, полученные на измерителе ИТП-МГ4 «250», спустя различные промежутки времени после даты производства представлены в табл. 1. Результаты получены осреднением результатов испытаний трех образцов, вырезанных из разных мест разных плит в упаковке (образцы имели размеры 500×500 мм для измерений на приборе Lambda-Meter EP500e и 250×250 мм для измерений на ИТП-МГ4 «250»).

#### Математическое моделирование изменения теплопроводности PIR

Для использования математической модели изменения теплопроводности с течением времени, описанной в [3], были найдены необходимые параметры уравнения:

$$\lambda = \lambda_0 + [(\lambda_2 - \lambda_1)\zeta_{\text{д}}] \cdot [1 - e^{-st}], \quad (1)$$

где  $\lambda_0$  – теплопроводность материала в начальный момент времени (при  $t=0$ ), Вт/(м·°С);  $\lambda_1$  – теплопроводность смеси газов, закачиваемой при производстве, Вт/(м·°С);  $\lambda_2$  – теплопроводность воздуха, Вт/(м·°С);  $\zeta_{\text{д}}$  – объемная доля дисперсной, доли ед.;  $s$  – параметр, характеризующий скорость замены газа воздухом, сут<sup>-1</sup>;  $t$  – время, сут.

Уравнение (1) полностью определяется тремя параметрами:  $\lambda_0$ ,  $(\lambda_1 - \lambda_2)\zeta_{\text{д}}$  и  $s$ . Теплопроводность материала в начальный момент времени,  $\lambda_0$ , принималась по результатам первой серии испытаний. Параметры  $(\lambda_1 - \lambda_2)\zeta_{\text{д}}$  и  $s$  рассчитывались по алгоритму, описанному в [8]. Данные параметры возможно определить серийно экспериментов через 1, 7, 15, 30 и 60 сут после производства, но при использовании большего набора экспериментальных точек, параметры уравнения (1) будут находиться с большей точностью. В табл. 2 представлены параметры уравне-

ния (1), определенные по результатам испытаний на приборе Lambda-Meter EP500e и на измерителе ИТП-МГ4 «250».

Подставляя найденные значения параметров в уравнение (1), получим закон изменения теплопроводности плит LOGICPIR PROF Ф/Ф при средней температуре 10°C в зависимости от времени:

$$\lambda_{10} = 0,0185 + 0,0021 \cdot [1 - e^{-0,014t}] \cdot \text{Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C}).$$

Закон изменения теплопроводности при средней температуре 25°C в зависимости от времени соответственно представляется в виде:

$$\lambda_{25} = 0,0202 + 0,0023 \cdot [1 - e^{-0,014t}] \cdot \text{Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C}).$$

На рис. 3 и 4 представлены сравнение изменения теплопроводности при средней температуре 10 и 25°C соответственно плит из пенополиизоцианурата марки LOGICPIR PROF Ф/Ф с течением времени, полученное экспериментальным путем на приборе Lambda-Meter EP500e и рассчитанное по методике НИИСФ [8].

На рис. 5 представлено подобное сравнение изменения теплопроводности при средней температуре 25°C испытанной марки пенополиизоцианурата с течением времени, но полученное экспериментальным путем на измерителе ИТП-МГ4 «250».

#### Сравнение экспериментальных и расчетных данных, результаты определения установившейся теплопроводности PIR

Как видно из представленных графиков на рис. 3 и 4, результаты расчетов по формуле (1) полностью коррелируются с результатами экспериментов: расхождения в экспериментальных и расчетных данных составляют менее 1%. Таким образом, за счет использования самого точного среди мировых аналогов прибора для измерения теплопроводности Lambda-Meter EP500e была получена абсолютная сходимость результатов экспериментов с результатами математического моделирования по методике НИИСФ [8]. При этом экспериментальные точки, полученные на измерителе теплопроводности ИТП-МГ4 «250», также хорошо коррелируются с расчетом (рис. 5), но расхождение этих данных немного выше, что объясняет

ся меньшей точностью представления результатов на данном приборе – до 0,001 Вт/(м·°С), при этом в приборе Lambda-Meter EP500e до 0,00001 Вт/(м·°С).

Установившаяся теплопроводность  $\lambda_{\infty}$ , Вт/(м·°С), по методике [8] находится по формуле:

$$\lambda_{\infty} = \lambda_0 + [(\lambda_2 - \lambda_1)\xi_{д}]. \quad (2)$$

Таким образом, по формуле (2) установившаяся теплопроводность пенополиизоцианурата LOGICPIR PROF Ф/Ф при средней температуре в образце 10°С составляет (с округлением до 0,001 Вт/(м·°С) согласно ГОСТ 7076):

$$\lambda_{\infty} = 0,0185 + 0,0021 \approx 0,021 \text{ Вт/(м·°С);}$$

– при средней температуре в образце 25°С:

$$\lambda_{\infty} = 0,0202 + 0,0023 \approx 0,023 \text{ Вт/(м·°С);}$$

– при средней температуре в образце 25°С при измерениях на ИТП-МГ4 «250»:

$$\lambda_{\infty} = 0,0207 + 0,0038 \approx 0,025 \text{ Вт/(м·°С).}$$

Более высокое значение установившейся теплопроводности, полученное по результатам испытаний образцов на измерителе ИТП-МГ4 «250», связано с большей площадью боковых граней (контактирующих с воздухом) по отношению к площади образца (по сравнению с этим отношением для испытуемых образцов на приборе Lambda-Meter EP500e). Этим же объясняются и меньшие значения теплопроводности, получаемые при испытаниях на приборе Lambda-Meter EP500e на цельной плите в сравнении с вырезанными образцами.

Также по полученным результатам в табл. 1 для исследованной марки PIR был установлен коэффициент для пересчета теплопроводности при средней температуре 25°С,  $\lambda_{25}$ , Вт/(м·°С); по значениям теплопроводности при средней температуре 10°С,  $\lambda_{10}$ , Вт/(м·°С), и наоборот, равный 1,09:  $\lambda_{25} \approx 1,09 \cdot \lambda_{10}$ .

### Заключение

В секторе испытаний теплофизических характеристик строительных материалов лаборатории строительной теплофизики НИИСФ РААСН проведены комплексные исследования изменения теплопроводности плит из пенополиизоцианурата (PIR) современного производства, облицованных с двух сторон фольгой, – LOGICPIR PROF Ф/Ф. Проведено сравнение двух методик определения установившейся теплопроводности: показано, что методика НИИСФ, описанная в [8], имеет преимущества перед методикой, изложенной в ГОСТ Р 56590–2016. По результатам серии экспериментов на самом современном в РФ испытательном оборудовании найден закон изменения теплопроводности с течением времени испытанной марки PIR и значение установившейся теплопроводности, которое при средней температуре в образце 10°С составило 0,021 Вт/(м·°С); при средней температуре 25°С – 0,023 Вт/(м·°С). При использовании наиболее точного прибора по опреде-

лению теплопроводности получена практически абсолютная сходимость результатов экспериментов с результатами математического моделирования по методике НИИСФ [8]. Объяснены различия в значениях установившейся теплопроводности, которые получаются при испытаниях на разных приборах. Найден коэффициент пересчета между значениями теплопроводности исследованной марки PIR при средней температуре 25 и 10°С. Полученные новые результаты и методические наработки имеют большую практическую значимость в связи с расширением объема применения плит PIR в современном строительстве.

### Список литературы / References

1. Grünbauer H.J.M., Bicerano J., Clavel P., Daussin R.D., de Vos H.A., Elwell M.J., Kawabata H., Kramer H., Latham D.D., Martin C.A., Moore S.E., Obi B.C., Parenti V., Schrock A.K., van den Boschvan R. Rigid Polyurethane Foams. In book: Polymeric Foams. 2004.
2. Ashida K. Polyurethane and related foams: chemistry and technology (1st ed.). CRC Press. 2006.
3. Гагарин В.Г., Пастушков П.П. Изменение во времени теплопроводности газонаполненных полимерных теплоизоляционных материалов // *Строительные материалы*. 2017. № 6. С. 28–31.
3. Gagarin V.G., Pastushkov P.P. Change in time of thermal conductivity of gas-filled polymer thermal insulation materials. *Stroitel'nyye Materialy*. [Construction Materials]. 2017. No. 6, pp. 28–31. (In Russian).
4. Wiedermann R.E., Adam N., Kaufung R. Flame-retarded, rigid pur foams with a low thermal conductivity. *Journal of Thermal Insulation*. 1988. Vol. 11 (4), pp. 242–253.
5. Albrecht W. Cell-gas composition – an important factor in the evaluation of long-term thermal conductivity in closed-cell foamed plastics. *Cellular Polymers*. 2000. Vol. 19 (5), pp. 319–331.
6. Albrecht W., Zehendner H. Thermal conductivity of Polyurethane (PUR) rigid foam boards after storage at 23°C and 70°C. *Cellular Polymers*. 1997. Vol. 16, pp. 35–42.
7. Albrecht W. Change over time in the thermal conductivity of ten-year-old pur rigid foam boards with diffusion-open facings. *Cellular Polymers*. 2004. Vol. 23 (3), pp. 161–172.
8. Методическое пособие по назначению расчетных теплотехнических показателей строительных материалов и изделий. М.: ФАУ «ФЦС», 2019.
8. Methodical manual on the purpose of calculated thermal engineering indicators of building materials and products. Moscow: FAU “FCS”, 2019. (In Russian).
9. Пастушков П.П. О проблемах определения теплопроводности строительных материалов // *Строительные материалы*. 2019. № 4. С. 57–63. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-769-4-57-63>
9. Pastushkov P.P. On the problems of determining the thermal conductivity of building materials. *Stroitel'nyye Materialy* [Construction Materials]. 2019. No. 4, pp. 57–63. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-769-4-57-63>

УДК 699.86

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-803-6-35-40>

Х.А. ЩИРЖЕЦКИЙ<sup>1</sup>, канд. техн. наук (a021069@yandex.ru); А.В. ПЕРЕТОКИН<sup>1,2</sup> (anton.peretokin@acoustic.ru)

<sup>1</sup> Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук (127238, г. Москва, Локомотивный пр., 21)

<sup>2</sup> ООО «Акустические материалы» (115054, г. Москва, ул. Новокузнецкая, 33, стр. 2)

## Расчет индекса фанатской поддержки при акустическом проектировании крупных спортивных сооружений

Болельщики и фанаты являются неотъемлемой частью эмоциональной и субъективной составляющей настроения зрителей на трибунах при проведении современных спортивных мероприятий на крупных спортивных сооружениях. Но каждое спортивное сооружение дает свой уникальный отклик на акустику помещения при скандировании фанатских речевок, в зависимости от воздушного объема, габаритов, формы и свойств отделочных материалов ограждающих конструкций помещения. В рамках настоящей работы рассмотрено понятие индекса фанатской поддержки для спортивных объектов, в частности футбольных стадионов, разработана аналитическая модель оценки индекса фанатской поддержки. Представлен упрощенный метод расчета индекса фанатской поддержки, позволяющий специалистам, не владеющим специальным компьютерным обеспечением по математическому моделированию акустики помещений, проводить сравнительную оценку поддержки этого параметра звуковыми полями, создаваемыми при различных конфигурациях объемно-планировочных решений крупных спортивных сооружений, в первую очередь их формы в плане. В соответствии с методологией настоящей работы и данными сравнительных расчетов индекса фанатской поддержки, полученными при компьютерном и аналитическом расчете звуковых полей стадионов различной формы в плане, введены градации классов качества данного индекса.

**Ключевые слова:** архитектурная акустика, акустика спортивных сооружений, индекс фанатской поддержки.

Авторы выражают благодарность Анатолию Лившицу и Наталье Ширгиной за идеи и техническую поддержку при компьютерном моделировании акустики футбольных стадионов.

**Для цитирования:** Щиржецкий Х.А., Перетокин А.В. Расчет индекса фанатской поддержки при акустическом проектировании крупных спортивных сооружений // *Строительные материалы*. 2022. № 6. С. 35–40.

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-803-6-35-40>

Kh.A. SHCHIRZHETSKII<sup>1</sup>, Candidate of Sciences (Engineering) (a021069@yandex.ru); A.V. PERETOKIN<sup>1,2</sup> (anton.peretokin@acoustic.ru)

<sup>1</sup> Research Institute of Building Physics of RAACS (21, Lokomotivnyy Driveway, Moscow, 127238, Russian Federation)

<sup>2</sup> Acoustic Materials LLC (33 building 2, Novokuznetskaya Street, 115054, Moscow, Russian Federation)

### Calculation of the Fan Support Index in the Acoustic Design of Large Sports Facilities

Supporters and fans are an integral part of the emotional and subjective component of the mood of spectators in the stands during modern sporting events at large sports facilities. But each sports facility gives its own unique response to the acoustics of the room when chanting fan chants, depending on the air volume, dimensions, shape and properties of the finishing materials of the room's enclosing structures. Within the framework of this work, the concept of the fan support index for sports facilities, in particular football stadiums, is considered, an analytical model for evaluating the fan support index is developed. A simplified method for calculating the fan support index is presented, which makes it possible for specialists who do not have special computer software for mathematical modeling of room acoustics to conduct a comparative assessment of the support of this parameter by sound fields created with various configurations of space-planning solutions of large sports facilities, primarily their shape in plan. In accordance with the methodology of this work and the data of comparative calculations of the fan support index, obtained by computer and analytical calculation of the sound fields of stadiums of various shapes in the plan, gradations of quality classes of this index are introduced.

**Keywords:** architectural acoustics, sports facilities acoustics, fan support index.

The authors express their gratitude to Anatoly Livshits and Natalia Shergina for their ideas and technical support in computer modeling of the acoustics of football stadiums.

**For citation:** Shchirzhetskii Kh.A., Peretokin A.V. Calculation of the fan support index in the acoustic design of large sports facilities. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2022. No. 6. pp. 35–40. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-803-6-35-40>

При проведении различных спортивных состязаний сложилась устойчивая тенденция формирования специфических объединений болельщиков — так называемых фанатских групп. Болельщики не только определяют эмоционально-акустическую обстановку на крупных спортивных объектах, особенно при проведении популярных спортивных состязаний в игровых видах спорта, например футболе, хоккее, баскетболе, но и фактически явочным порядком закрепляют за собой определенную зону зрительских мест, например сектор 33 «Ви́раж» на футбольном

стадионе в Санкт-Петербурге. При этом численность фанатских групп в больших городах доходит до ста и более человек. Таким образом, речевой фон сопровождения состязаний этими группами практически стал одним из ключевых элементов акустической обстановки в крупных спортивно-зрелищных сооружениях (СЗС), т. е. одной из важных составляющих условий обеспечения акустического комфорта в СЗС становится условие достижения приемлемой громкости и разборчивости речевок фанатских групп во всех зонах зрительских мест. Следует отметить, что

хотя тенденция создания фанатских движений пришла в Россию из-за рубежа, именно в России сформировалось практически четкое разделение местоположения скоординированных фанатских групп и остальной массы болельщиков. Обычно такие группы располагаются на трибунах за воротами.

Исходя из данного положения как в России, так и за рубежом был предпринят ряд попыток ввести некоторый акустический параметр, характеризующий специфику звукового фона проведения спортивно-зрелищных мероприятий [1–3]. В отличие от этого уже достаточно давно, особенно в игровых видах спорта, установилась тенденция управления речевками болельщиков через систему озвучения с помощью ведущих и диджеев, однако к анализу звукоизлучения собственно фанатских групп это не имеет прямого отношения.

Возвращаясь к поставленной проблеме, особое внимание здесь обратим на использованный при анализе акустики больших стадионов так называемый индекс фанатской поддержки, расчеты которого на основе компьютерного математического моделирования акустики стадионов Чемпионата мира по футболу 2018 г. представлены в работе [1].

Физический смысл этого параметра достаточно просто представляется следующей формулой [1]:

$$FSI = 6 - DL2, \text{ дБ}, \quad (1)$$

где  $FSI$  (Fan Support Index) – индекс фанатской поддержки;  $DL2$  – стандартизированный параметр пространственного снижения уровней звукового давления при последовательном увеличении расстояния от источника звука до приемника в два раза.

Очевидно, что для свободного поля  $DL2=6$  дБ и, следовательно,  $FSI=0$ , а при отсутствии затухания звука вдоль трибун  $DL2 \rightarrow 0$  дБ и, следовательно,  $FSI \rightarrow 6$  дБ.

Расчеты данного параметра на ряде стадионов Чемпионата мира по футболу 2018 г., проведенные при моделировании акустики стадионов с помощью программного комплекса Odeon, показали достаточно интересные результаты [1]: форма плана футбольного стадиона при переходе от прямоугольной к круглой влияет на показания параметра  $FSI$  и таким образом на величину восприятия фанатских речевок. Отсюда можно сделать вывод, что при разработке акустических проектов крупных СЗС, следуя общему алгоритму их проектирования, представленному в [4] и ряде других работ по данной проблеме, например [5, 6], в соответствии с которым при выборе общего объемно-планировочного решения и основных конструкций ограждений соответствующего объекта архитекторами и инженерами-проектировщиками производится ряд расчетов и графо-аналитических построений аналоговыми методами, не требующими от пользователя обладания специальным программным обеспечением, вполне логично включить в систему образующих акустических параметров, как то: время реверберации, структуры первых отраже-

ний и др., также и оценки, хотя и в достаточно упрощенном виде, индекса фанатской поддержки.

#### Аналитическая расчетная модель индекса FSI

Исходя из вышеизложенного представляется правильным использовать известную методику разделения процесса формирования звуковых полей в помещениях с псевдодиффузными полями на прямой звук и диффузно-реверберационную составляющую, определяемую как плотность стационарной звуковой энергии после первого акта поглощения на ограждениях СЗС, например [7]:

$$\varepsilon_i = \varepsilon_{\text{inp}} + \varepsilon_{\text{диф}}, \quad (2)$$

где

$$\varepsilon_{\text{inp}} = \frac{\bar{P}_{\Sigma N} \cdot \bar{\Omega}_N}{4\pi r_i^2 c}, \quad \text{а} \quad \varepsilon_{\text{диф}} = \frac{4\bar{P}_{\Sigma N}}{cB}, \quad (3)$$

где  $\bar{P}_{\Sigma N}$  – средняя звуковая мощность, излучаемая группой из  $N$ -источников;  $\bar{\Omega}_N$  – усредненный коэффициент направленности  $N$ -источников;  $r_i$  – расстояние от акустического центра источников звука до некоторой  $i$ -й точки исследований;  $c$  – скорость звука;  $B = \frac{\alpha S}{1-\bar{\alpha}}$  – акустическая постоянная помещения [4], где  $S$  – общая площадь его ограждений;  $\bar{\alpha}$  – средний коэффициент звукопоглощения помещения в исследуемом диапазоне частот.

Особого внимания заслуживают характеристики звукоизлучения фан-групп, состоящих в среднем из  $\bar{N}$  болельщиков. Учитывая, как уже отмечалось, достаточно плотное распределение их на одной из (обычно торцевых) трибун, имеет физический смысл ввести как понятие геометрический центр излучения т. 0 при общей ненаправленности их звуковых потоков, т. е.  $\bar{\Omega}_{\bar{N}} \cong 1$ . При этом общая средняя мощность излучения составляет  $\bar{P}_{\Sigma \bar{N}} = \bar{N} \bar{P}_{\bar{N}}$ , где  $\bar{P}_{\bar{N}}$  – средняя мощность излучения возгласов одного болельщика, которая в соответствии с известными справочными данными равна  $\cong 2 \times 10^{-3}$  Вт [8]. Таким образом, можно принять среднюю мощность излучения как:

$$\bar{P}_{\Sigma \bar{N}} = 0,02 \cdot \bar{N} \text{ (Вт)},$$

а среднюю интенсивность:

$$\bar{I}_{\bar{N}} = \frac{\bar{P}_{\Sigma \bar{N}}}{\bar{S}_{\bar{N}}}$$

и среднюю плотность звукоизлучения прямого звука:

$$\varepsilon_0 = \bar{\varepsilon}_{\bar{N}} = \frac{\bar{I}_{\bar{N}}}{c}, \quad (4)$$

где  $\bar{S}_{\bar{N}}$  – средняя плотность размещения группы болельщиков.

Отсюда следует, что средний уровень звукоизлучения прямого звука фанатских групп болельщиков составляет:

$$\bar{L}_0 = 10 \lg \frac{\bar{\varepsilon}_{\bar{N}}}{\varepsilon_{\text{пор}}}, \quad (5)$$

где  $\varepsilon_{\text{пор}} = 3 \times 10^{-15}$  Дж/м<sup>3</sup> – уровень порогового значения плотности звуковой энергии.

Учитывая, что параметр  $FSI$  по некоторым физическим признакам является косвенным аналогом

известного критерия разборчивости речи, то, как и для его оценки, представляется правильным ввести необходимые и достаточные условия оптимизации передачи информации с помощью этого критерия [9]. При этом, учитывая специфику обстановки фанатских звучаний, необходимым условием здесь логично, как и при экспресс-оценке разборчивости речи, считать дифференцированное по точкам наблюдений отношение сигнал/шум [9], а само текущее значение параметра  $FSI$  – показателем степени оптимизации его достаточных условий.

Исходя из данного представления для анализа соотношения уровней прямого звука и рассеянного звукового поля в отдельных зонах СЗС показательным критерием является предложенный В.В. Фурдеевым параметр – акустическое отношение, физическая сущность которого ясна из формулы [7]:

$$R_i = \frac{\varepsilon_{\text{диф}}}{\varepsilon_{\text{пр}}}, R_i = \Pi \cdot r_i^2,$$

где  $\Pi = \frac{16\pi}{B}$  – параметр помещения. (6)

В соответствии с той же теорией пороговым расстоянием начала прогрессивного расчета величины  $FSI$  следует считать так называемый радиус гулкости  $r_0$ , определяемый как расстояние от акустического центра источника звука до отметки, при которой в условиях идеально диффузного поля  $\varepsilon_{\text{диф}} = \varepsilon_{\text{пр}}$ , откуда [10]:

$$r_0 = 0,35\sqrt{B}. \quad (7)$$

Таким образом, представляется правильным вести точки расчетов (и измерений в натуральных условиях) параметра  $FSI$  в крупных СЗС по следующей прогрессии:

$$r_0, 2r_0, 4r_0 \dots \text{ т. е. } r_i = 2r_{i-1} \quad (i = 1, 2, 3 \dots).$$

Следовательно, сопоставляя формулы (2)–(3) и (5)–(7), получаем:

$$\varepsilon_i = \varepsilon_{\text{пр}i}(1 + R_i) = \varepsilon_{\text{пр}i}(1 + \Pi r_i^2). \quad (8)$$

Исходя из последних выражений можно сделать достаточно простой вывод формулы прогрессивного расчета параметра  $FSI$  при помощи следующего соотношения:

$$\varepsilon_i / \varepsilon_{i+1} = \frac{\varepsilon_{\text{пр}i}}{\varepsilon_{\text{пр}i+1}} \left\{ \frac{(1 + \Pi r_i^2)}{(1 + \Pi r_{i+1}^2)} \right\} = 4 \left\{ \frac{(1 + \Pi r_i^2)}{(1 + 4\Pi r_i^2)} \right\} = 4 \left\{ \frac{(\Pi + 1/r_i^2)}{(4\Pi + 1/r_i^2)} \right\}. \quad (9)$$

Далее при переходе к уровням звука:

$$10 \lg\{\varepsilon_i / \varepsilon_{i+1}\} = 6 + 10 \lg\left\{ \frac{(\Pi + 1/r_i^2)}{(4\Pi + 1/r_i^2)} \right\}, \quad (10)$$

что позволяет, возвращаясь к исходной формуле для  $FSI$  (1), определить ее величину как:

$$FSI_i = -10 \lg\left\{ \frac{(\Pi + 1/r_i^2)}{(4\Pi + 1/r_i^2)} \right\} = 10 \lg\left\{ \frac{(4\Pi + 1/r_i^2)}{(\Pi + 1/r_i^2)} \right\}. \quad (11)$$

Для оценки границ этого параметра введем следующие условия, см. также формулу (6):

$$\Pi = \frac{16\pi}{B} \gg 1/r_i^2, \text{ откуда } 16\Pi r_i^2 \gg B \text{ и } FSI_{\text{max}} \cong 10 \lg 4 = 6,$$

$$\Pi \ll 1/r_i^2, \text{ откуда } 16\Pi r_i^2 \ll B \text{ и } FSI_{\text{min}} \cong 10 \lg 1 = 0 \text{ дБ. (12)}$$

Таким образом, первое приближение соответствует благодаря хорошей диффузности поверхностей СЗС максимально удаленной поддержке  $FSI$ , а второе – при эффективном заглушении трибунных ограждений – ведет к быстрой потере звуковой энергии фанатских речевок.

Принимая выводы по формулам (10)–(12) как достаточные для оптимизации параметра  $FSI$ , в качестве необходимых, как отмечалось ранее, следует принимать минимально допустимые значения отношения сигнал/шум во всех расчетных точках в соответствии с рядом, принятым при расчете формулы (8). При этом следует признать логичным вести проверку этого отношения для упрощения контрольных расчетов только по уровням прямого звука  $L_{\text{пр}i}(r_i)$  на том основании, что при проектировании шумозащитных мероприятий в СЗС в качестве источников шума в основном принимаются различные технические системы (системы вентиляции и кондиционирования) и шум улицы (транспортный поток), тогда как реальный шумовой фон, особенно при проведении крупных зрелищных и спортивных мероприятий, обуславливается звуковой обстановкой зрительской массы (шум толпы по терминологии [2]), который, как правило, существенно превышает шум инженерного оборудования и шум улицы. Таким образом, вводя упрощенный расчет допустимых шагов анализа  $r_i$  только по прямому звуку, имеем некоторый запас прибавки уровней полезного сигнала на диффузную составляющую звукового поля. В любом случае необходимо понимать, что все представленные здесь расчетные процедуры проводятся на начальном этапе акустического проектирования соответствующего СЗС с целью оптимизации выбора его основной архитектурно-планировочной и строительной-акустической концепции путем сравнительного анализа различных объемно-планировочных решений, т. е. с одинаковой погрешностью всех проводимых расчетных операций. Отсюда для обоснования максимально допустимого выбора расчетных точек  $i_{\text{max}}$  можно воспользоваться неравенством:

**Сопоставление значений индекса  $FSI$  из компьютерного и аналитического расчета**  
**Comparison of  $FSI$  index values from computer and analytical calculation**

Стадион	Значение индекса $FSI$ , дБ	
	Компьютерная модель	Аналитическая модель
Стадион «Калининград» (прямоугольная форма)	1,9	2,3
«Волгоград Арена» (овальная форма)	2,5	2,6
«Самара Арена» (круглая форма)	3,7	3,2

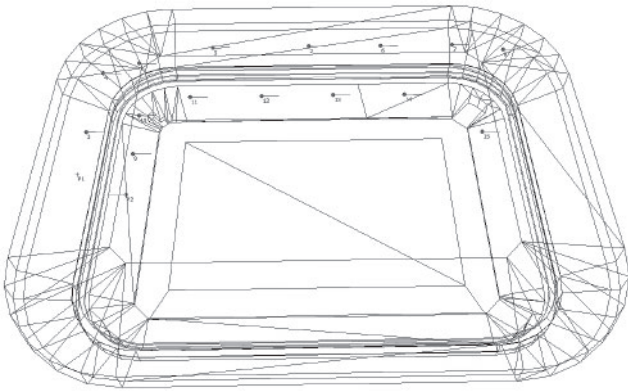


Рис. 1. Компьютерная модель и фотография стадиона «Калининград» (прямоугольная форма в плане)  
 Fig. 1. Computer model and photograph of the «Kaliningrad» stadium (rectangular in plan)

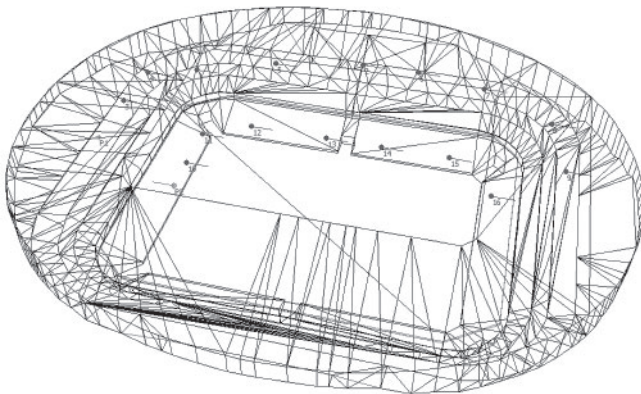


Рис. 2. Компьютерная модель и фотография «Волгоград Арены» (овальная форма в плане)  
 Fig. 2. Computer model and photograph of the «Volgograd arena» (oval in plan)

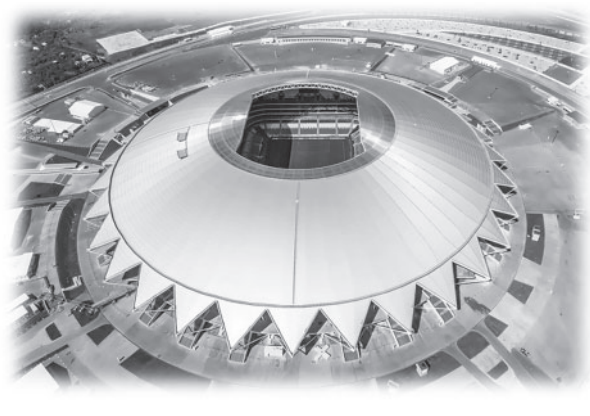
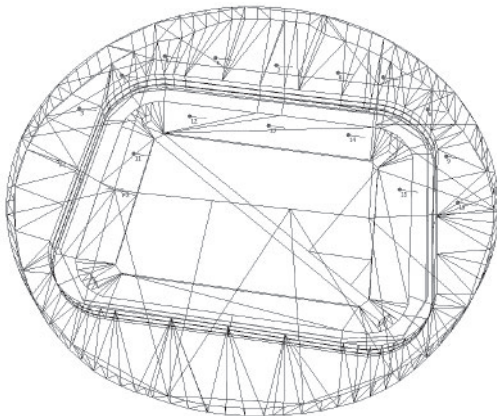


Рис. 3. Компьютерная модель и фотография «Самара Арены» (круглая форма в плане)  
 Fig. 3. Computer model and photograph of the «Samara arena» (round shape in plan)

$$L_{\text{прimax}} - 6i_{\text{max}} \geq L_{\text{шн}} + 20 \text{ дБ}, \quad (13)$$

где  $L_{\text{шн}}$  – нормативные уровни шума, аппроксимированные по всему диапазону звуковых частот [4], откуда следует:

$$[i_{\text{max}}] = \frac{L_{\text{прimax}} - (L_{\text{шн}} + 20)}{6} \text{ дБ}. \quad (14)$$

При этом очевидно, что значения  $i_{\text{max}}$  должны округляться до целых величин, а величина 20 дБ взя-

та из известного соотношения среднего динамического диапазона речевых сигналов  $2D \geq 20$  дБ [8].

Особое внимание следует обратить на частотную зависимость параметра  $FSI$  от связанных с ним характеристик  $B$  и спектральной плотности мощности излучаемого сигнала  $\bar{P}_{\Sigma}$ . Однако, учитывая, что, по данным ряда источников (см., например, [11]), основное формантное распределение плотности излучения форси-



рованной речи находится в пределах 100–1000 Гц, представляется правильным привязать все расчеты *FSI* к диапазону средних частот, а конкретно в соответствии с известной методологией акустических расчетов к полосам октавных частот со среднегеометрическими частотами 500–1000 Гц [4, 10, 12].

#### Сравнение результатов расчета индекса *FSI*, полученных в компьютерной и аналитической моделях

Расчет значений индекса *FSI* по рассмотренной методике был выполнен для трех футбольных стадионов различной формы: стадион «Калининград» (в плане чаша стадиона имеет прямоугольную форму), «Волгоград Арена» (в плане чаша стадиона имеет овальную форму) и «Самара Арена» (в плане чаша стадиона имеет круглую форму).

Для этих же стадионов были получены значения индекса *FSI* в компьютерной математической модели в рамках исследования [1]. В план исследования входила имитация обычного положения фанатской группы на трибуне за воротами и регистрация уровня излучаемого ею звука вдоль остальных трибун 1-го яруса. Уровень излучения фанатской группы имитировался мощным широкополосным источником звука. Расчет звука в контрольных точках приема производился в диапазоне средних частот (500 и 1000 Гц) как наиболее близком к реальному процессу слухового восприятия при нормальном динамическом диапазоне восприятия звукового сигнала.

Результаты компьютерных расчетов [1] и данные соответствующих аналитических расчетов по формулам (6)–(11) приведены в таблице.

На рис. 1–3 представлены компьютерные модели и фотографии рассматриваемых стадионов – стадиона «Калининград», «Волгоград Арены» и «Самара Арены», соответственно.

Сравнительный анализ данных компьютерного и аналитического расчетов показывает прежде всего физическую обоснованность вывода параметра *FSI* как объективного аналога процесса субъективно-слухового восприятия в качестве соответствия его степени понимания окружающими передаваемой фанатскими группами информации. Несмотря на некоторые отличия в цифровых величинах, данные аналитического расчета и компьютерного моделирования соответствуют общей тенденции влияния формы стадиона на индекс фанатской поддержки и иллюстрируют степень возрастания индекса при переходе от прямоугольной формы стадиона в плане к круглой форме.

#### Список литературы

1. Peretokin A., Livshits A., Orlov A., Shirgina N. Acoustics features of sports facilities on the example of FIFA 2018 football stadiums in Russia. *Proceedings of the 23rd International Congress on Acoustics*. 9–13 September 2019. Aachen, Germany.
2. Barnard A., Hambric S. Evaluation of crowd noise in Beaver Stadium during Penn State football games. *The*

#### Выводы

1. В работе представлен упрощенный метод расчета индекса фанатской поддержки *FSI*, позволяющий специалистам, не владеющим специальным компьютерным обеспечением по математическому моделированию акустики помещений, провести сравнительную оценку поддержки этого параметра звуковыми полями, создаваемыми при различных конфигурациях объемно-планировочных решений крупных СЗС, в первую очередь их формы в плане.

2. Сравнительные расчеты параметра *FSI* будут полезны на начальных этапах акустического проектирования СЗС, особенно в плане выбора основной архитектурной концепции, формы и габаритов ограждений соответствующего объекта. Важно при этом отметить, что по физическому смыслу параметр *FSI* достаточно тесно коррелирован с характеристиками диффузности звуковых полей [7, 10], это подчеркивает целесообразность проведения его расчетов, позволяющих количественно оценить степень акустической эффективности основных ограждений соответствующих СЗС.

3. Параметр *FSI* может быть включен в общий алгоритм акустического проектирования СЗС, разработанный на основе развития методологии [4], по которому первоначальный этап оптимального выбора объемно-планировочного решения будущего СЗС, формы и конструкций его ограждений производится графо-аналитическими методами с расчетами времени реверберации, мероприятий по обеспечению диффузности звукового поля, защите здания СЗС от шумовых воздействий и др. При этом сама последовательность расчетных операций по определению сравнительных значений параметра *FSI* достаточно ясна из сопоставления сводки формул (4)–(14).

4. В соответствии с методологией настоящей работы и данными сравнительных расчетов параметра *FSI*, полученными при компьютерном и аналитическом расчете звуковых полей стадионов различной формы в плане, могут быть введены следующие градации классов качества данного параметра: отлично – более 4 дБ; хорошо – от 3 до 4 дБ; удовлетворительно – от 2 до 3 дБ; плохо – менее 2 дБ. Естественно, что как изложенный в настоящей работе последовательный метод сравнительных расчетов параметра *FSI*, так и градации его оценки нуждаются в контрольных расчетах на различных СЗС, а также в проверке с помощью натуральных измерений на реально действующих объектах.

#### References

1. Peretokin A., Livshits A., Orlov A., Shirgina N. Acoustics features of sports facilities on the example of FIFA 2018 football stadiums in Russia. *Proceedings of the 23rd International Congress on Acoustics*. 9–13 September 2019. Aachen, Germany.
2. Barnard A., Hambric S. Evaluation of crowd noise in Beaver Stadium during Penn State football games. *The*

- Journal of the Acoustical Society of America*. 2010. Vol. 127. Iss. 3. <https://doi.org/10.1121/1.3383777>
3. Valmont E., Wilkinson M., Thomas A. Stadia acoustic atmosphere and spectator experience: Quantifying crowd noise with architectural form. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 2016. Vol. 140. Iss. 4. <https://doi.org/10.1121/1.4970463>
  4. СП 415.1325800.2018 Здания общественные. Правила акустического проектирования. М.: Стандартинформ, 2019.
  5. Щиржецкий Х.А., Сухов В.Н. Проблематика акустического проектирования спортивно-зрелищных залов различного объема и вместимости // *БСТ*. 2017. № 6. С. 26–28.
  6. Щиржецкий Х.А., Сухов В.Н., Щиржецкий А.Х., Алёшкин В.М. К проблеме акустического проектирования современных залов многоцелевого назначения // *Жилищное строительство*. 2019. № 7. С. 16–24. DOI: <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2019-7-16-24>
  7. Фурдуй В.В. Акустические основы вещания. М.: Книга по Требованию, 2013. 319 с.
  8. Анерт В., Штеффен Ф. Техника звукоусиления. М.: ООО «ПКФ Леруша», 2003. 416 с.
  9. Щиржецкий Х.А. Экспресс-оценка зон разборчивости речи в помещениях. *Сборник трудов научно-технического семинара в г. Севастополе*. 2012.
  10. Макриненко Л.И. Акустика помещений общественных зданий. М.: Стройиздат, 1986. 173 с.
  11. Вахитов Я.Ш. Слух и речь. Л.: ЛИКИ, 1973. 110 с.
  12. Фурдуй В.В. Электроакустика. М.; Л.: Госуд. изд. техн.-теорет. литературы, 1948. 516 с.
  - Journal of the Acoustical Society of America*. 2010. Vol. 127. Iss. 3. <https://doi.org/10.1121/1.3383777>
  3. Valmont E., Wilkinson M., Thomas A. Stadia acoustic atmosphere and spectator experience: Quantifying crowd noise with architectural form. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 2016. Vol. 140. Iss. 4. <https://doi.org/10.1121/1.4970463>
  4. Code of Practice 415.1325800.2018 Public buildings. Acoustic design rules. Moscow: Standartinform. 2019. (In Russian).
  5. Shchirzhetsky Kh.A., Sukhov V.N. Problems of acoustic design of sports and entertainment halls of various sizes and capacities. *BST*. 2017. No. 6, pp. 26–28.
  6. Shchirzhetskii Kh.A., Soukhov V.N., Shchirzhetskii A.Kh., Aleshkin V.M. On the problem of acoustic design of modern multipurpose halls. *Zhilishchnoe Stroitel'stvo* [Housing Construction]. 2019. No. 7, pp. 16–24. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2019-7-16-24>
  7. Furduev V.V. Akusticheskiye osnovy veshchaniya [Acoustic foundations of broadcasting]. Moscow: Kniga po Trebovaniyu. 2013. 319 p.
  8. Anert V., Shteffen F. Tekhnika zvukousileniya [Sound amplification technique]. Moscow: PKF Lerusha LLC. 2003. 416 p.
  9. Shchirzhetsky H.A. Express assessment of speech intelligibility zones in rooms. *Collection of works of scientific and technical seminar in Sevastopol*. 2012.
  10. Makrinenko L.I. Akustika pomeshcheniy obshchestvennykh zdaniy [Acoustics of public buildings]. Moscow: Stroyizdat. 1986. 173 p.
  11. Vakhitov Ya.Shch. Slukh i rech' [Hearing and speech] Leningrad: LIKI, 1973. 110 p.
  12. Furduev V.V. Elektroakustika [Electroacoustics]. Moscow-Leningrad: State publishing house of technical and theoretical literature. 1948. 516 p.

## СПЕЦИАЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

### «Проектирование оснований, фундаментов и подземных сооружений»

Учебное и практическое пособие под редакцией чл.-корр. РААСН, д-ра техн. наук, проф. Р. А. Мангушева



**Авторы:** д-р техн. наук Р.А. Мангушев, канд. техн. наук А.И. Осокин, канд. техн. наук В.В. Конюшков, канд. техн. наук И.П. Дьяконов, канд. техн. наук С.В. Ланько. Пособие выпущено под грифом рекомендации Российской академии архитектуры и строительных наук (РААСН).

Данное пособие является дополнением к ранее изданным базовым учебникам «Механика грунтов» (2019) и «Основания и фундаменты» (2020). Авторы д-ра техн. наук, проф. Р.А. Мангушев и И.И. Сахаров.

Разработанное пособие является не только учебным изданием, но и практическим руководством для инженеров-строителей, так как охватывает вопросы проектирования основных типов оснований, фундаментов и подземных частей гражданских зданий и сооружений.

Особое внимание уделено расчетам различного типа фундаментов, изготовленным по современным отечественным и зарубежным технологиям, а также конструктивным и технологическим методам устройства котлованов. Учтены особенности устройства фундаментов высотных зданий, влияния технологических осадок, рассмотрены численные методы, используемые при геотехнических расчетах. Особенностью книги является наличие большого количества расчетных примеров по различным типам оснований и фундаментов.

Издание рекомендовано для использования при подготовке бакалавров и специалистов.

УДК 628.517.2

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-803-6-41-46>

Д.В. ЧУГУНКОВ<sup>1</sup>, канд. техн. наук, доцент (chugunkovdv@mpei.ru),  
 Е.А. ЖУРАВЛЕВ<sup>1</sup>, младший научный сотрудник (zhuravlevya@mpei.ru);  
 М.Ю. ЛЕШКО<sup>2</sup>, инженер (mleshko@yandex.ru)

<sup>1</sup> Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт» («МЭИ») (111250, г. Москва, вн. тер. г. муниципальный округ Лефортово, ул. Красноказарменная, 14, стр. 1)

<sup>2</sup> Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук (127238, г. Москва, Локомотивный пр-д, 21)

## Применение объемных элементов звукопоглощения в диссипативных пластинчатых глушителях шума

Известно, что затухание звука в диссипативных пластинчатых глушителях шума возрастает с увеличением их длины и с уменьшением гидравлического диаметра ячейки глушителя шума. Для прироста эффективности затухания звука в пластинчатых глушителях шума было предложено использовать поверхность пластин с объемными элементами. В этом случае снижается гидравлический диаметр ячейки глушителя шума, а также возникает дополнительное затухание за счет явления дифракции. Были изготовлены опытные образцы глушителей шума из пластин с объемными элементами в форме полуцилиндрических вогнутостей. В рамках стендовых акустических испытаний были исследованы характеристики глушителей шума из пластин с плоскими боковыми стенками и предложенных глушителей шума из пластин с объемными элементами при одинаковой плотности набивки пластин звукопоглощающим материалом и постоянстве фактора свободной площади. По результатам натурных испытаний было подтверждено увеличение эффективности снижения шума. Дополнительно, путем численного моделирования были определены аэродинамические характеристики исследуемых пластинчатых глушителей шума. По результатам исследований предложенных глушителей шума с объемными элементами были получены значения затухания звука для нескольких вариантов фактора свободной площади и ориентации объемных элементов пластин – вдоль и поперек канала, а также потери давления в зависимости от скорости течения среды.

**Ключевые слова:** снижение шума, диссипативные глушители шума, газовые тракты котлов, каналы систем вентиляции и кондиционирования, объемные элементы звукопоглощения, прирост эффективности снижения шума, аэродинамические характеристики, стендовые испытания.

**Для цитирования:** Чугунков Д.В., Журавлев Е.А., Лешко М.Ю. Применение объемных элементов звукопоглощения в диссипативных пластинчатых глушителях шума // *Строительные материалы*. 2022. № 6. С. 41–46. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-803-6-41-46>

D.V. CHUGUNKOV<sup>1</sup>, Ph.D. tech. sciences, associate professor (chugunkovdv@mpei.ru), E.A. ZHURAVLEV<sup>1</sup>, junior researcher (zhuravlevya@mpei.ru); M.Yu. LESHKO<sup>2</sup>, engineer (mleshko@yandex.ru).

<sup>1</sup> National Research University «Moscow Power Engineering Institute» (14, Krasnokazarmennaya Street, Moscow, 111250, Russian Federation)

<sup>2</sup> Research Institute of Building Physics, Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (21, Lokomotivnyy Driveway, Moscow, 127238, Russian Federation)

### The Use of Volumetric Sound Absorption Elements in Dissipative Plate Noise Silencers

It is known that sound attenuation in dissipative plate noise silencers increases with an increase in their length and with a decrease in the hydraulic diameter of the noise silencer cell. To increase the efficiency of sound attenuation in plate noise suppressors, it was proposed to use the surface of plates with volumetric elements. In this case, the hydraulic diameter of the silencer cell decreases, and additional attenuation occurs due to the phenomenon of diffraction. Prototypes of noise silencers were made from plates with volumetric elements in the form of semi-cylindrical concavities. Within the framework of bench acoustic tests, the characteristics of noise silencers made of plates with flat side walls and the proposed noise silencers made of plates with volumetric elements were investigated with the same density of the plates with sound-absorbing material and the constancy of the free area factor. Based on the results of field tests, an increase in the effectiveness of noise reduction was confirmed. Additionally, by numerical simulation, the aerodynamic characteristics of the studied plate noise silencers were determined. According to the results of studies for the proposed noise silencers with volumetric elements, sound attenuation values were obtained for several variants of the free area factor and the orientation of the volumetric elements of the plates – along and across the channel, as well as pressure loss depending on the flow velocity of the medium.

**Keywords:** noise reduction, dissipative noise silencers, gas paths of boilers, ventilation and air conditioning channels, volumetric sound absorption elements, increase in noise reduction efficiency, aerodynamic characteristics, bench tests.

**For citation:** Chugunkov D.V., Zhuravlev E.A., Leshko M.Yu. The use of volumetric sound absorption elements in dissipative plate noise silencers. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2022. No. 6, pp. 41–46. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-803-6-41-46>

Строительство новых жилых районов в крупных городах очень часто приводит к расположению жилых домов вблизи энергетических объектов и промышленных предприятий. В результате возникает необходимость внедрять мероприятия по шумоглушению в целях обеспечения соблюдения санитарных норм по шуму. В ряде случаев известные типовые решения не позволяют уменьшить шум ниже допустимых норм [1].

К числу основных источников постоянного шума на энергообъектах относятся котлы и тягодутьевые машины [2–4]. Пути распространения шума от таких источников – газовые и воздушные тракты котлов, воздухозаборы и устья дымовых труб. Наиболее мощные источники шума – устья дымовых труб, поскольку они являются высотными и воздействуют на большие расстояния в отсутствие экранирования

звуковых волн и влияния рельефа местности. Для снижения шума в газовых трактах котлов в мировой практике получили широкое распространение диссипативные глушители шума пластинчатого типа.

Типовой пластинчатый глушитель состоит из параллельных пластин, состоящих из кассет с плоскими боковыми перфорированными стенками. Такие глушители устанавливаются в каналах газозвудушных трактов котлов [5]. При отсутствии внедренных систем шумоглушения от оборудования на ТЭС жители района подвергаются воздействию повышенного шума. Глушители устанавливаются в газовых трактах котлов за дымососами перед дымовыми трубами. Преимуществами диссипативных глушителей являются: широкополосное затухание звука, простота конструкции, продолжительный срок службы и отсутствие существенных эксплуатационных расходов, а также невысокая стоимость изготовления и монтажа [6–10].

По формуле проф. А.И. Белова в рамках энергетической теории затухание звука для диссипативных глушителей шума можно определить следующим образом, дБ:

$$\Delta L = 4,34 \cdot \alpha' \cdot \frac{l}{D_r}, \quad (1)$$

где  $l$  — длина глушителя, м;  $D_r$  — гидравлический диаметр глушителя, м;  $\alpha'$  — коэффициент пропорциональности.

Формула (1) справедлива только для плоской бегущей звуковой волны, т. е. волны, распространяющейся в соответствии с уравнением гармонических колебаний и зависящей от одной декартовой координаты.

Для пластинчатого диссипативного глушителя шума гидравлический диаметр всего глушителя равен гидравлическому диаметру одной ячейки между пластинами. Гидравлический диаметр пластинчатого глушителя шума для энергообъектов численно не превосходит единицу.

По формуле (1) затухание звука в глушителе будет возрастать при увеличении коэффициента пропорциональности  $\alpha'$  и снижении гидравлического диаметра ячейки между пластинами  $D_r$ .

Гидравлический диаметр ячейки диссипативного пластинчатого глушителя определяется следующим образом, м:

$$D_r = \frac{4 \cdot S_{\text{пр}}}{\Pi}, \quad (2)$$

где  $\Pi$  — периметр поперечного сечения ячейки между пластинами глушителя, м;  $S_{\text{пр}}$  — площадь поперечного сечения ячейки глушителя, м<sup>2</sup>.

Коэффициент пропорциональности  $\alpha'$  зависит от значений действительного коэффициента звукопоглощения  $\alpha$ , который является функцией частоты звука, толщины звукопоглощающего материала (ЗПМ), физико-механических свойств ЗПМ, параметров защитных покрытий, а также от угла падения плоских звуковых волн.

В энергетике в качестве ЗПМ глушителей шума применяются различные виды минеральной ваты:

стеклянная, каменная (базальтовая) и шлаковая, а также пенополистирол и пенополиуретан. Наибольшее распространение для набивки элементов шумоглушения диссипативных глушителей шума получила базальтовая вата, обеспечивающая вышеперечисленные требования. Использование ЗПМ с каркасом из стальной проволоки существенно продлевает срок службы глушителей шума, обеспечивая уменьшение усадки.

Таким образом, исходя из геометрических характеристик глушителя, для повышения акустического эффекта требуется увеличивать периметр поперечного сечения глушителя, т. е. требуется наращивать площадь звукопоглощающих стенок пластин.

В статье исследуются акустические и аэродинамические характеристики двух типов глушителей шума: глушителей, состоящих из пластин с плоскими боковыми стенками, и глушителей, которые состоят из пластин со стенками из объемных элементов в форме полуцилиндрических вогнутостей [11–15], т. е. с развитой площадью звукопоглощения.

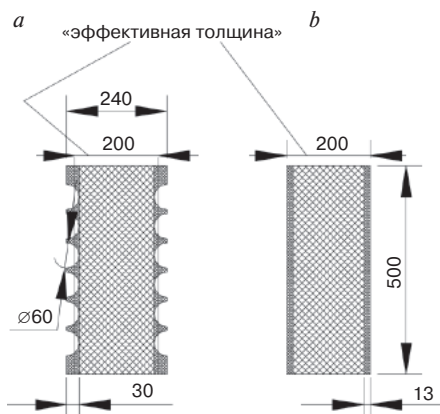
Исследуемая пластина с объемными элементами имеет размеры 1000×240×500 мм (Д×Ш×В) (рис. 1, а). В качестве ЗПМ применены маты Isotec Wired Mat 40 SM из базальтового волокна с прошивкой стальной оцинкованной проволокой. Плотность набивки ЗПМ — 55 кг/м<sup>3</sup>. Матами Isotec заполнено 178 мм толщины пластин. Внутреннее пространство у боковых стенок пластин с обеих сторон заполнено насыпной минеральной ватой CUTWOOL RW плотностью 90 кг/м<sup>3</sup> на толщину 30 мм. Защитный слой пластин состоит из стеклоткани Э3-200 и стального перфорированного листа с полуцилиндрическими вогнутостями толщиной 0,7 мм с отверстиями диаметром 4 мм и шагом 6 мм (относительный процент перфорации составляет 40,3%). Диаметр вогнутостей перфорированного листа составляет 60 мм, количество волн — 6. В этом случае «эффективная толщина» данной пластины составляет 200 мм.

Исследуемая пластина с плоскими стенками имеет размеры 1000×200×500 мм (рис. 1, б). В качестве ЗПМ и защитного слоя использованы аналогичные материалы (маты Isotec Wired Mat 40 SM и насыпная минеральная вата CUTWOOL RW), как и для пластин с объемными элементами, при этом объем и плотность ЗПМ соответствуют объему и плотности ЗПМ пластины с объемными элементами, а перфорированный лист имеет плоскую поверхность. Эффективная толщина пластины с плоскими стенками составляет 200 мм.

Площади поперечных сечений двух видов пластин эквивалентны друг другу.

Для получения акустических характеристик исследуемых образцов диссипативных пластинчатых глушителей шума были проведены натурные испытания на акустическом стенде в лаборатории НИИСФ РААСН по методике [16].

Схема экспериментальной установки для испытаний образцов глушителей шума представлена на рис. 2.



**Рис. 1.** Исследуемые пластины глушителей шума: *a* – пластина с объемными элементами в форме полуцилиндрических вогнутостей; *b* – пластина с плоскими боковыми стенками

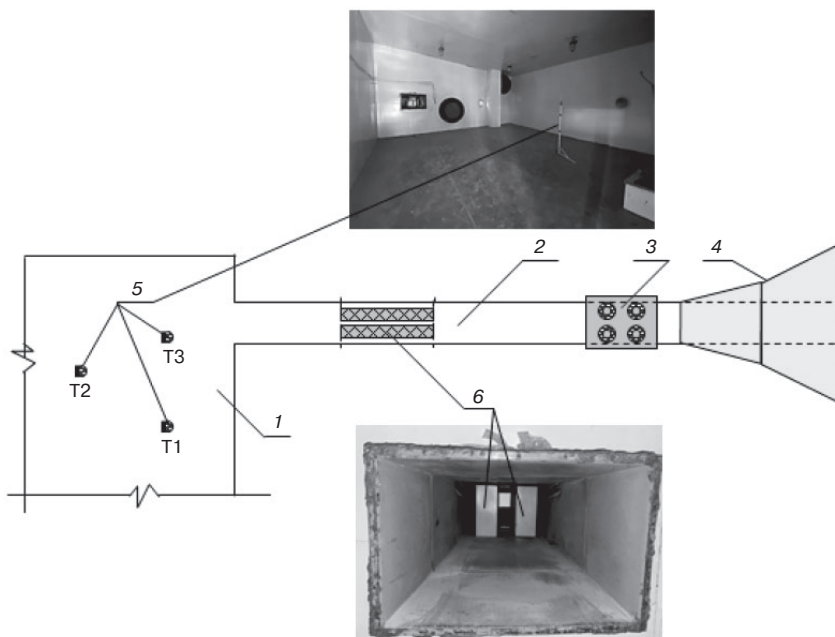
**Fig. 1.** Investigated plates of noise suppressors: *a* – plate with three-dimensional elements in the form of semi-cylindrical concavities; *b* – plate with flat side walls

Для определения внесенных потерь глушителей применялся метод замещения. Метод предусматривает определение уровней звукового давления (УЗД) прошедшей звуковой волны по каналу без глушителя шума, затем определение УЗД прошедшей звуковой волны с глушителем. По разности УЗД без глушителя и с ним определялись вносимые потери.

Испытуемые образцы глушителей скомпонованы из пластин в испытательном канале стенда. Эксперименты проводились в статическом режиме (без потока воздуха).

Схемы образцов глушителей в испытательном канале стенда представлены на рис. 3 и 4.

При проведении испытаний различных типов пластин уровень сигнала источника звука поддерживался постоянным. Измерения УЗД проводились в октавных полосах со среднегеометрическими частотами 63, 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000, 8000 Гц в ре-

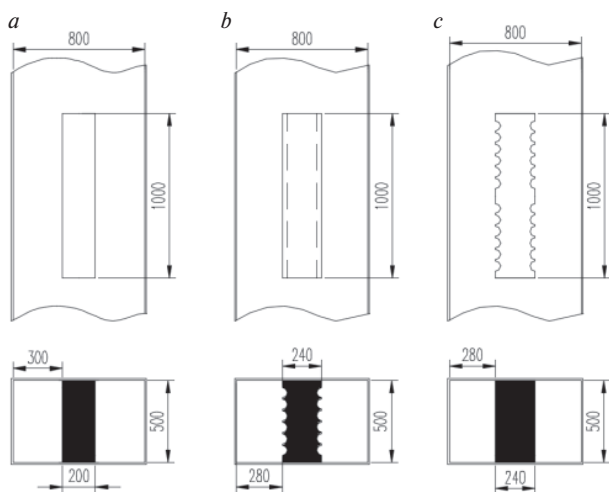


**Рис. 2.** Схема экспериментального стенда для испытаний глушителей: 1 – реверберационная камера ( $V_{\text{кама}}=120 \text{ м}^3$ ); 2 – испытательный канал (сечение  $800 \times 500 \text{ мм}$ ); 3 – источник звука; 4 – концевое поглощающее устройство; 5 – положения измерительного микрофона (точка Т1, точка Т2, точка Т3); 6 – испытуемый образец глушителя шума

**Fig. 2.** Scheme of an experimental stand for testing mufflers: 1 – reverberation chamber ( $V_{\text{chamber}}=120 \text{ m}^3$ ); 2 – test channel (section  $800 \times 500 \text{ mm}$ ); 3 – sound source; 4 – end absorbing device; 5 – positions of the measuring microphone (point T1, point T2, point T3); 6 – tested sample of the noise suppressor

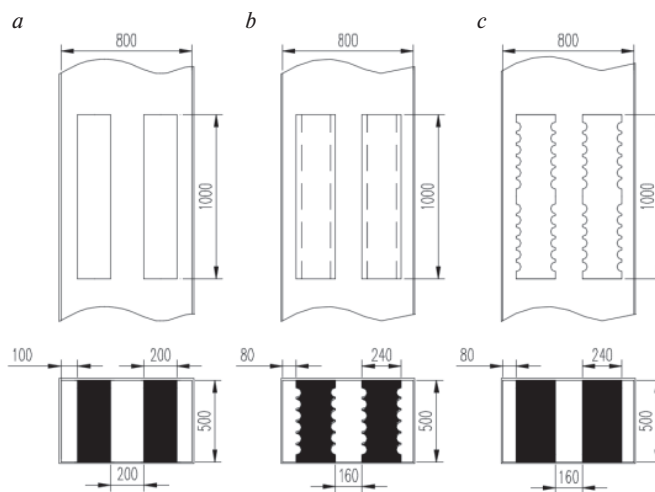
верберационной камере в трех контрольных точках (КТ1, КТ2, КТ3). Полученные результаты приведены на рис. 5 и 6.

Анализ результатов акустических испытаний показывает, что глушители из пластин с объемными элементами (вогнутостями), расположенными вдоль канала, в сравнении с типовым глушителем при факторе свободной площади 75% на среднегеометрических частотах 500 и 1000 Гц обеспечивают прирост затухания звука на 2 дБ, а при факторе свободной площади 50% – на 3 дБ.



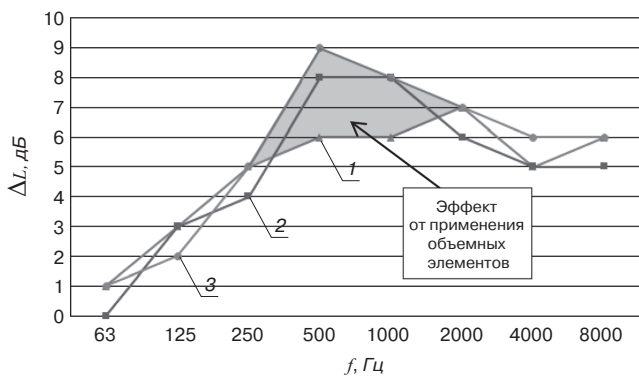
**Рис. 3.** Схемы образцов глушителей из одной пластины: *a* – опыт 1; *b* – опыт 2; *c* – опыт 3

**Fig. 3.** Schemes of samples of silencers from one plate: *a* – experiment 1; *b* – experiment 2; *c* – experiment 3



**Рис. 4.** Схемы образцов глушителей из двух пластин: *a* – опыт 4; *b* – опыт 5; *c* – опыт 6

**Fig. 4.** Schemes of samples of silencers from two plates: *a* – experiment 4; *b* – experiment 5; *c* – experiment 6



**Рис. 5.** Вносимые потери глушителей шума из одной пластины длиной 1 м: 1 – опыт 1 (пластины с плоскими боковыми стенками; фактор свободной площади 75%, длина 1 м); 2 – опыт 2 (пластины с вогнутостями; фактор свободной площади 75%, длина 1 м); 3 – опыт 3 (пластины с вогнутостями; фактор свободной площади 70–75%, длина 1 м)

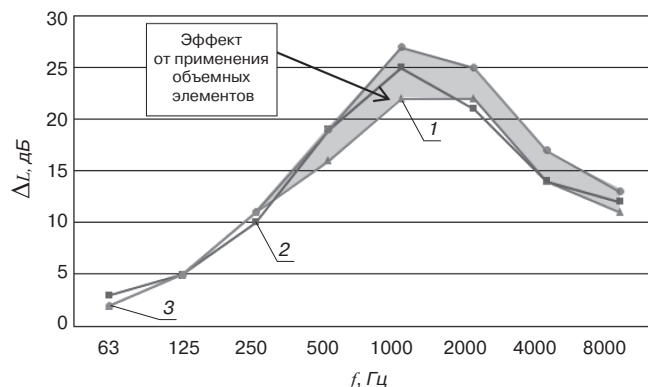
**Fig. 5.** Insertion loss of noise suppressors from one plate 1 m long: 1 – experiment 1 (plates with flat side walls; free area factor 75%, length 1 m); 2 – experiment 2 (plates with concavities; free area factor 75%, length 1 m); 3 – experiment 3 (plates with concavities; free area factor 70–75%, length 1 m)

Глушители, состоящие из пластин, вогнутости которых расположены поперек канала, показывают еще более высокие затухания: при факторе свободной площади 70–75% прирост затухания составил до 3 дБ, а при 40–50% – до 5 дБ на среднегеометрических частотах 500–8000 Гц.

На рис. 7 показаны расчетные схемы для численного моделирования течения потока дымовых газов с помощью пакета Fluent программы Ansys с целью определения аэродинамических характеристик глушителей. Течение потока среды в канале описывается уравнениями Навье–Стокса для нестационарной задачи с применением  $k-\epsilon$  модели турбулентности.

Схема 3 и 6 (рис. 7, *c, f*) – модели, которые представляют собой каналы и кассеты с объемными элементами толщиной 240 мм и оптимизированными обтекателями. Форма оптимизированных обтекателей представляет собой полуэллипсоидную поверхность.

Схема 1 и 4 (рис. 7, *a, d*) – модели, которые представляют собой каналы и кассеты с плоскими боковыми



**Рис. 6.** Вносимые потери глушителей шума из двух пластин длиной 1 м: 1 – опыт 4 (пластины с плоскими боковыми стенками; фактор свободной площади 50%, длина 1 м); 2 – опыт 5 (пластины с вогнутостями; фактор свободной площади 50%, длина 1 м); 3 – опыт 6 (пластины с вогнутостями; фактор свободной площади 40–50%, длина 1 м)

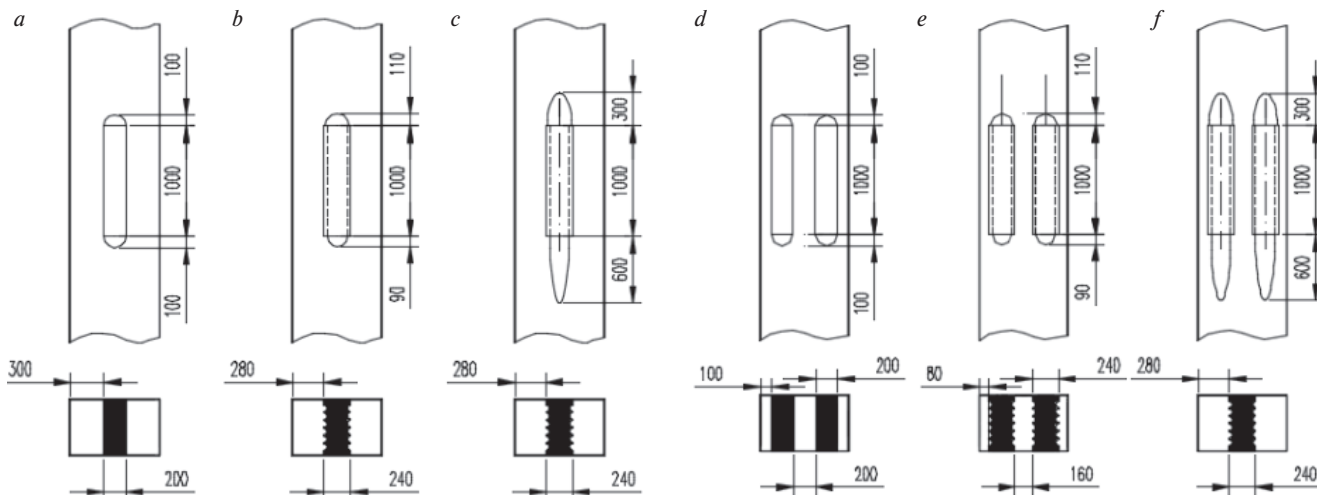
**Fig. 6.** Insertion loss of noise suppressors from two plates 1 m long: 1 – experiment 4 (plates with flat side walls; free area factor 50%, length 1 m); 2 – experiment 5 (plates with concavities; free area factor 50%, length 1 m); 3 – experiment 6 (plates with concavities; free area factor 40–50%, length 1 m)

выми стенками толщиной 200 мм и типовыми обтекателями. Форма типовых обтекателей представляет собой полуцилиндрическую поверхность.

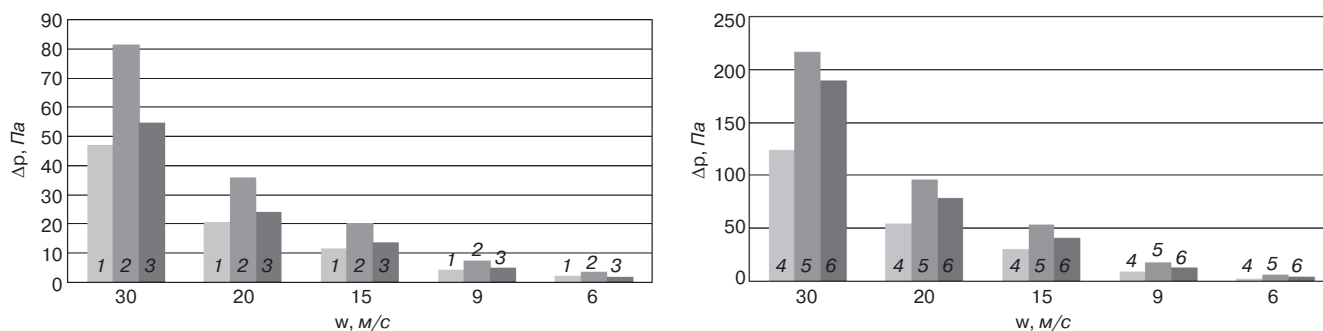
Схема 2 и 5 (рис. 7, *b, e*) – модели, которые представляют собой каналы и кассеты с объемными элементами толщиной 240 мм и типовыми обтекателями. Формы типовых обтекателей представляют собой половины цилиндров.

Условия моделирования были следующие: на входе в канал задавалась скорость среды, на выходе – статическое давление. Расчетная сетка состояла не менее чем из 4 млн тетрагональных ячеек. Для верификации полученных результатов предварительно проводилось сравнение аэродинамических характеристик с известными данными.

Из данных рис. 8 видно, что глушители из пластин с плоскими боковыми стенками создают меньшее сопротивление потоку среды из-за более низкого гидравлического диаметра ячеек глушителя в сравнении с глушителями из пластин с объемными элементами.



**Рис. 7.** Схемы глушителей для численного моделирования: *a* – схема 1; *b* – схема 2; *c* – схема 3; *d* – схема 4; *e* – схема 5; *f* – схема 6  
**Fig. 7.** Schemes of silencers for numerical simulation: *a* – scheme 1; *b* – scheme 2; *c* – scheme 3; *d* – scheme 4; *e* – scheme 5; *f* – scheme 6



**Рис. 8.** Потери давления в исследуемых глушителях шума: 1 – 1 пластина с плоскими боковыми стенками и типовым обтекателем (схема 1); 2 – 1 пластина с объемными элементами и типовыми обтекателями (схема 2); 3 – 1 пластина с объемными элементами и оптимизированными обтекателями (схема 3); 4 – 2 пластины с плоскими боковыми стенками и типовыми обтекателями (схема 4); 5 – 2 пластины с объемными элементами и типовыми обтекателями (схема 5); 6 – пластина с объемными элементами и оптимизированными обтекателями (схема 6)

**Fig. 8.** Pressure losses in the studied silencers: 1 – 1 plate with flat side walls and a typical fairing (scheme 1); 2 – 1 plate with three-dimensional elements and typical fairings (scheme 2); 3 – 1 plate with three-dimensional elements and optimized streamlined tellers (scheme 3); 4 – 2 plates with flat side walls and typical fairings (scheme 4); 5 – 2 plates with three-dimensional elements and typical fairings (scheme 5); 6 – plate with volumetric elements and optimized fairings (scheme 6)

Увеличение потерь давления при установке в канал пластин с объемными элементами с типовыми обтекателями входа и выхода составляет до 73% при кассетах длиной 1 м и факторе свободной площади 75%, а при факторе свободной площади 50% м – до 78%. Применением в глушителях кассет с объемными элементами и оптимизированными обтекателями для фактора свободной площади 75% можно добиться увеличения потерь давления не более 16%, а для фактора свободной площади 50% – не более 54%.

Однако абсолютные значения потерь давления глушителей с объемными элементами при низких скоростях течения среды в канале (менее 9 м/с) невелики, что позволяет их рекомендовать к применению в газовых трактах, а также системах вентиляции и кондиционирования.

### Выводы

1. Испытанные на стенде в соответствии с [16] образцы глушителей шума из пластин с объемными элементами показали высокие акустические характеристики, что позволяет рекомендовать их для применения в газовых и воздушных каналах энергетических комплексов и систем вентиляции в качестве элементов шумоглушения.

2. Анализ результатов акустических испытаний показывает, что наиболее целесообразно приме-

нять глушители из пластин с объемными элементами при необходимости снижения шума на средних и высоких среднегеометрических частотах.

3. Расположение вогнутостей пластин глушителей шума вдоль канала позволило получить прирост затухания до 3 дБ относительно пластин с плоскими стенками на среднегеометрических частотах 500 и 1000 Гц. Расположение вогнутостей кассет образцов глушителей шума поперек канала позволило получить более высокое затухание (до 5 дБ) в диапазоне среднегеометрических частот 500–8000 Гц.

4. По результатам численного моделирования глушители из пластин с плоскими боковыми стенками создают меньшее сопротивление потоку среды из-за более низкого гидравлического диаметра ячеек глушителя в сравнении с глушителями из пластин с объемными элементами на 16–54%, в зависимости от формы входных и выходных обтекателей.

5. Потери давления в глушителях шума с объемными элементами при низких скоростях течения среды в каналах (менее 9 м/с) невелики, что позволяет их рекомендовать для высокоэффективного снижения шума на средних и высоких среднегеометрических частотах в газовых и воздушных каналах энергетических комплексов, а также в системах вентиляции и кондиционирования.

### Список литературы

- Абрамов А.И., Елизаров Д.П., Ремезов А.Н. и др. Повышение экологической безопасности ТЭС. М.: Издательство МЭИ, 2002. 378 с.
- Журавлев Е.А. Глушители шума энергетических объектов. *Международная научно-практическая конференция «Научно-практические исследования»*. Омск, 2020. Т. 1. С. 87–91.
- Дроконов А.М., Дроконов А.Е. Снижение шума энергетических установок // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. 2014. № 3. С. 65–75.
- Журавлев Е.А., Чугунков Д.В. Акустическое обследование газового тракта котла ТЭЦ.

### References

- Abramov A.I., Elizarov D.P., Remezov A.N. et al. *Povyshenie ekologicheskoi bezopasnosti TES [Increasing the environmental safety of thermal power plants]*. Moscow: MPEI Publishing House. 2002. 378 p.
- Zhuravlev E.A. Silencers of noise of power objects. *International scientific and practical conference “Scientific and practical research”*. Omsk. 2020. Vol. 1, pp. 87–91. (In Russian).
- Drokonov A.M., Drokonov A.E. Reducing the noise of power plants. *Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii*. 2014. No. 3, pp. 65–75. (In Russian).

- Конференция «Приоритетные направления инновационной деятельности в промышленности». Казань, 2020. Т. 1. С. 105–107.
5. Краснов В.И. Разработка методов снижения шума от газовых трактов при модернизации водогрейных котлов типа ПТВМ на окружающий район: Дис. ... канд. техн. наук. М., 2005. 139 с.
  6. Иванов Н.И. Инженерная акустика. Теория и практика борьбы с шумом. М.: Логос, 2016. 422 с.
  7. Гусев В.П. Акустические характеристики абсорбционных глушителей для защиты зданий и территорий застройки от вентиляционного шума // *Безопасность жизнедеятельности*. 2003. № 8. С. 16–20.
  8. Гусев В.П., Лешко М.Ю. Пластинчатые глушители шума вентиляционных установок // *АВОК*. 2006. № 8. С. 34–38.
  9. Гусев В.П. Из опыта борьбы с шумом оборудования инженерных систем // *АВОК*. 2012. № 2. С. 38–42.
  10. Гусев В.П. Средства снижения воздушного и структурного шума систем вентиляции, кондиционирования и холодоснабжения // *АВОК*. 2005. № 4. С. 86–90.
  11. Патент РФ 187890. Кассета звукопоглощающая для глушителей шума газовоздушных трактов / Чугунков Д.В., Сейфельмлюкова Г.А., Журавлев Е.А., Фоменко К.С., Скурихина А.Д., Богданова А.Е. Заявл. 21.02.2018. Опубл. 21.03.2019. Бюл. № 9.
  12. Журавлев Е.А., Чугунков Д.В. Разработка системы шумоглушения оригинальной конструкции для газового тракта котла ТЭЦ. *Международная научная конференция «Приоритетные направления инновационной деятельности в промышленности»*. Казань, 2020. Т. 1. Кн. 1. С. 114–116.
  13. Zhuravlev E.A., Chugunkov D.V., Seyfelmyukova G.A. Improving the acoustic efficiency of laminated dissipative noise silencers for boiler gas-air paths. *E3S Web of Conferences*. No. 140. 2019, pp. 1–5. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201914002005>.
  14. Чугунков Д.В., Журавлев Е.А., Сейфельмлюкова Г.А. Результаты исследований пластинчатого глушителя шума с объемными элементами для газовоздушных каналов. *Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием «Защита от повышенного шума и вибрации»*. СПб., 2021. Т. 1. С. 147–155.
  15. Журавлев Е.А., Чугунков Д.В. Подходы к улучшению пластинчатых глушителей шума для газовоздушных трактов котлов. *Международная научная конференция «Передовые инновационные разработки. Перспективы и опыт использования, проблемы внедрения в производство»*. Казань, 2019. Т. 1. С. 74–78.
  16. ГОСТ 28100–2007. Акустика. Измерения лабораторные для заглушающих устройств, устанавливаемых в воздуховодах, и воздухораспределительно-го оборудования. М.: Стандартинформ, 2008.
  4. Zhuravlev E.A., Chugunkov D.V. Acoustic inspection of the gas path of the CHP boiler. *Conference “Priority directions of innovative activity in industry”*. Kazan. 2020. Vol. 1, pp. 105–107. (In Russian).
  5. Krasnov V.I. Development of methods for reducing noise from gas paths during the modernization of water-heating boilers of the PTVM type to the surrounding area. *Diss. Candidate of Sciences (Engineering)*. Moscow, 2005. 139 p.
  6. Ivanov N.I. *Inzhenernaya akustika. Teoriya i praktika bor'by s shumom* [Engineering acoustics. Theory and practice of noise control]. Moscow: Logos, 2016. 422 p.
  7. Gusev V.P. Acoustic characteristics of absorption mufflers for protection of buildings and development areas from ventilation noise. *Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti*. 2003. No. 8, pp. 16–20. (In Russian).
  8. Gusev V.P. Means of reducing airborne and structural noise in ventilation, air conditioning and refrigeration systems. *AVOK*. 2005. No. 4. pp. 86–90. (In Russian).
  9. Gusev V.P., Leshko M.Yu. Lamellar mufflers of noise of ventilating installations. *AVOK*. 2006. No. 8, pp. 34–38. (In Russian).
  10. Gusev V.P. From the experience of combating the noise of engineering systems equipment. *AVOK*. 2012. No. 2, pp. 38–42. (In Russian).
  11. Patent RF 187890. *Sound-absorbing cassette for noise suppressors of gas-air paths*. Chugunkov D.V., Seifelmlyukova G.A., Zhuravlev E.A., Fomenko K.S., Skurikhina A.D., Bogdanova A.E. Declared 21.02.2018; Published 21.03.2019. Bulletin No. 9. (In Russian).
  12. Zhuravlev E.A., Chugunkov D.V. Development of a noise suppression system of an original design for the gas path of a CHP boiler. *International scientific conference “Priority directions of innovative activity in industry”*. Kazan. 2020. Vol. 1. Book. 1, pp. 114–116. (In Russian).
  13. Zhuravlev E.A., Chugunkov D.V., Seyfelmyukova G.A. Improving the acoustic efficiency of laminated dissipative noise silencers for boiler gas-air paths. *E3S Web of Conferences*. 2019. No. 140, pp. 1–5. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201914002005>.
  14. Chugunkov D.V., Zhuravlev E.A., Seifelmlyukova G.A. Research results of a lamellar noise suppressor with three-dimensional elements for gas-air channels. *All-Russian scientific and practical conference with international participation “Protection against increased noise and vibration”*. St. Petersburg. 2021. Vol. 1, pp. 147–155. (In Russian).
  15. Zhuravlev E.A., Chugunkov D.V. Approaches to the improvement of plate noise silencers for gas-air paths of boilers. *International Scientific Conference “Advanced Innovative Developments. Prospects and experience of use, problems of implementation in production*. Kazan. 2019. Vol. 1, pp. 74–78. (In Russian).
  16. GOST 28100–2007 Acoustics. Laboratory measurements for silencing devices installed in air ducts and air distribution equipment. Moscow: Standartinform. 2008. (In Russian).



УДК 534.84

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-803-6-47-50>

Х.А. ЦИРЖЕЦКИЙ, канд. техн. наук (a021069@yandex.ru),  
В.М. АЛЕШКИН, инженер (wsjk@mail.ru)

Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук  
(127238, г. Москва, Локомотивный пр., 21)

## Аналитический расчет меры высоты — нового объективного критерия акустики храмовых зданий и сооружений

Работа посвящена методике расчетной оценки нового объективного критерия акустики помещений – меры высоты ( $LH$ ), отражающего специфику храмовых зданий и сооружений, связанные с архитектурными особенностями их внутреннего объема и возникающего вследствие этого субъективного эффекта прихода звука сверху (так называемого голоса неба). Предлагаемый критерий позволяет задать субъективно-объективное соответствие для степени пространственного ощущения акустических особенностей храмовых помещений и заранее оценить его в виде значений объективного параметра на стадии акустического проектирования культовых зданий и сооружений. Определение параметра и предпосылки к его введению приводятся в предыдущих публикациях авторов. В настоящей статье предлагается методика аналитического расчета параметра меры высоты ( $LH$ ), основанная на статистической теории акустики помещений. Полученные соотношения позволяют произвести вычисления данного параметра для случаев ближнего и дальнего поля исходя из основных геометрических параметров помещения и среднего коэффициента звукопоглощения. Делаются выводы о возможности применения подобной методики для первичной оценки влияния верхних объемов храмовых помещений на субъективное ощущение «голоса неба» и необходимости экспериментальной проверки расчета предложенного критерия.

**Ключевые слова:** акустика культовых сооружений, мера высоты, акустическое проектирование, акустический комфорт, моленные залы.

**Для цитирования:** Циржецкий Х.А., Алешкин В.М. Аналитический расчет меры высоты – нового объективного критерия акустики храмовых зданий и сооружений // *Строительные материалы*. 2022. № 6. С. 47–50.

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-803-6-47-50>

Kh.A. SCHIRZHETSKII, Candidate of Sciences (Engineering), (a021069@yandex.ru),

V.M. ALESHKIN, Engineer (wsjk@mail.ru)

Research Institute of Building Physics of RAACS (21, Lokomotivny Driveway, Moscow, 127238, Russian Federation)

### Analytical Calculation of the Height Measure — a New Objective Criterion for the Acoustics of Temple Buildings and Structures

The article is devoted to the calculation method for a new objective room acoustics criterion – “height measure” ( $LH$ ), which derives from specific features of temple buildings in view of the architectural features of their internal volume and the resulting subjective effect of the arrival of sound from above (the so-called “Voice of Heaven”). The proposed criterion makes it possible to set a subjective-objective correspondence for the degree of spatial sensation of the acoustic features of the temple premises and predict it as objective parameter values at the stage of acoustic design of religious buildings and structures. The definition of the parameter and the prerequisites for its introduction are given in previous publications of the authors. This article proposes a method for the analytical calculation of the height measure parameter ( $LH$ ), based on statistical theory of room acoustics. The obtained ratios make it possible to calculate this parameter for the cases of near and far fields, based on the basic geometric parameters of the room and the average sound absorption coefficient. Conclusions are drawn about the possibility of using such a technique for the initial assessment of the influence of the upper volumes of temple premises on the subjective sensation of the “voice of heaven” and the need for experimental verification of the calculation of the proposed criterion.

**Keywords:** acoustics of religious buildings, height measure acoustic design, acoustic comfort, praying halls.

**For citation:** Schirzhetskii Kh.A., Aleshkin V.M. Analytical calculation of the height measure – a new objective criterion for the acoustics of temple buildings and structures. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2022. No. 6, pp. 47–50. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-803-6-47-50>

За последние годы специалисты лаборатории акустики залов НИИСФ провели комплекс научно-практических исследований акустики различных культовых сооружений, и в первую очередь, как наиболее распространенных в России, храмов православной и мусульманской конфессий [1–6]. Целью этих исследований кроме разработок конкретных решений акустики соответствующих объектов была систематизация полученных результатов и анализ соответствия принятых методов акустического проектирования светских залов различного назначения задаче достижения акустического комфорта в моленных залах религиозного назначе-

ния [7, 8]. Анализ результатов проведенных исследований наряду с субъективной оценкой проводимых религиозных служб показал, что при всей правильности и даже необходимости использования при акустическом проектировании моленных залов стандартизированных параметров, таких как как время реверберации, разборчивость речи и др. (см. [9]; СП 51.13330.2011 «Защита от шума»; ИЕС 60268-16:2011 “Sound system equipment – Part 16: Objective rating of speech intelligibility by speech transmission index”) для полного соответствия результатов объективной оценки акустики моленных залов реальной картине их субъективно-слухового

восприятия требуется введение в уже принятую систему акустических параметров еще по крайней мере одного дополнительного критерия, представляющего особенности звуковой обстановки в храмах при проведении религиозных служб.

#### Обоснование актуальности и цель исследования

Необходимость такой разработки вызвана существенным отличием факторов слухового восприятия воспроизводимых программ публикой в светских залах и прихожанами в молельных залах культовых сооружений. Если в первом случае основными являются информационно-эстетические составляющие, то во втором – восприятие духовности, ощущение прихожанами сакральности происходящего в храме. Одной из основных особенностей храмовых сооружений, приводящей к такому субъективному ощущению, является тот факт, что для слушателя голос священнослужителя или пение хоров субъективно нисходят сверху, отражаясь от верхних объемов храма и формируя так называемый голос неба (СП 391.1325800.2017 «Храмы православные. Правила проектирования»). Подобному эффекту способствуют исторически сложившиеся архитектурные решения высоких купольных объемов молельных залов православной и мусульманской конфессий [5, 10].

Исходя из этих позиций авторами настоящей разработки был предложен соответствующий этому критерию новый акустический параметр – мера высоты, который должен быть введен, в дополнение к уже принятой системе акустических параметров, в перечень рассчитываемых, или измеряемых акустических характеристик молельных залов (ГОСТ ИСО 3382-1–2013 «Акустика. Измерение акустических параметров помещений. Часть 1. Зрительные залы» [11, 12]).

В соответствии с этим предложением локальный параметр мера высоты равен:

$$LH = 10 \lg \left\{ \frac{\varepsilon(t_k)}{\varepsilon_{\text{общ}}(t_{\text{пс}}) - \varepsilon(t_k)} \right\}, \quad (1)$$

где  $t_k$  – время поступления в некоторую точку «сверху» полезного сигнала [8], т. е. от купола и верхних сводов храмов;  $\varepsilon(t_k)$  – плотность звуковой энергии, поступающей «сверху»;  $t_{\text{пс}}$  – время поступления полезного сигнала в некоторую точку помещения в процессе прохождения реверберации [9];  $\varepsilon_{\text{общ}}(t_{\text{пс}})$  – общая плотность звуковой энергии, поступающей за время поступления полезного сигнала.

При этом время поступления полезного сигнала можно оценить по ранее выведенной формуле [8]:

$$t_{\text{пс}} = \frac{\Delta L_{\text{пс}}}{60} \cdot T, \quad (1a)$$

где  $\Delta L_{\text{пс}} = L_{\text{пс}} - L_{\text{ш}}$  ( $L_{\text{пс}}$  – уровень полезного сигнала в некоторой точке помещения,  $L_{\text{ш}}$  – уровень шума в ней)\*;  $T$  – время реверберации молельного зала.

\* При расчетах в качестве уровней источника звука  $L_{\text{пс}}$  берутся табличные значения для вокализированной речи [13], а для уровней  $L_{\text{ш}}$  – нормативные значения (СП 51.13330.2011 «Защита от шума»).

#### Методология и результаты исследования

Для аналоговых экспресс-оценок параметра  $LH$  можно использовать известные соотношения энергии установления в помещении псевдодиффузного поля с разделением звуковых потоков по следующим направлениям [8]:

- «вперед» – от источника звука;
- «сверху» – от купола и сводов;
- по всем остальным направлениям.

При этом общим условием аналога служит допущение, что в исследуемых псевдодиффузных полях достаточным для установления стационарного распределения звуковых потоков является оценка распределения по направлениям совокупности первых отражений, слияние которых образует общую картину сформированного звукового поля.

В соответствии с этим условием можно считать:

$$LH = 10 \lg\{MB\};$$

$$MB = \frac{\varepsilon_k}{\varepsilon_{\text{общ}_0} - \varepsilon_k}, \quad (2)$$

где  $\varepsilon_k$  – звуковой поток в точке 0 под куполом, которая является максимально критичной для оценки параметра мера высоты (см. рисунок);  $\varepsilon_{\text{общ}_0}$  – суперпозиция звуковых потолков в точке 0 по всем направлениям, кроме от купола.

Раскрытие формулы (2) приводит нас к следующим выражениям [8]:

$$\varepsilon_{\text{общ}_0} = \varepsilon_0 + \sum_{i=1}^n \varepsilon_i, \quad (3)$$

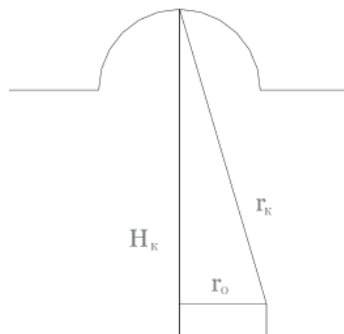
где  $\varepsilon_0$  – плотность звуковой энергии прямого звука под куполом;  $\varepsilon_i$  – плотность звуковой энергии отражений, кроме от купола в точке 0.

Раскрывая с помощью рисунка составляющие формул (2)–(3), получим [9]:

$$\varepsilon_0 = \frac{P_A \Omega}{4\pi r_0^2 c}; \quad \varepsilon_k = \frac{P_A \Omega (1 - \alpha_k)}{4\pi (r_k + H_k)^2 c}, \quad (4)$$

где  $P_A$  – средняя мощность излучения человеческого голоса ( $L_A \approx 75$  дБА);  $\Omega$  – коэффициент его осевой концентрации;  $c$  – скорость звука;  $r_0$ ,  $r_k$  и  $H_k$  – пути прохождения прямого звука до отражения от купола и обратно;  $\alpha_k$  – коэффициент звукопоглощения (КЗП) купола.

В свою очередь, для определения количества отражений, требующих учета в формуле (3) для уста-



Обозначение геометрических параметров, принятых для расчета  $LH$ , на схематическом изображении разреза молельного зала с куполом

новления диффузно-стационарного поля, можно воспользоваться известной формулой расчета статистики отражений по методу мнимых источников [9]:

$$n(t) = \frac{4\pi}{3} \cdot \frac{c^3 t^3}{V}, \quad (5)$$

где  $V$  – объем помещения;  $t$  – текущее время.

Дифференцируя это выражение, получим плотность отражений в переходном режиме нарастания звука:

$$n'(t) = \frac{\Delta n}{\Delta t} = \frac{4\pi c^3}{V} \cdot t^2. \quad (6)$$

Как известно, в стационарном режиме время свободного пробега звуковых потоков равно [9]:

$$\bar{\tau} = \frac{4V}{cS_{\text{общ}}},$$

а средняя длина свободного пробега:

$$\bar{l} = c\bar{\tau} = \frac{4V}{S_{\text{общ}}}, \quad (7)$$

где  $S_{\text{общ}}$  – общая площадь ограждений помещения.

Очевидно, что для оценки перехода процесса нарастания звука к статистическому состоянию звукового поля требуемое для этого количество первых отражений можно получить из равенства:

$$\delta t = \frac{\Delta t}{\Delta n} = \bar{\tau} \rightarrow t_{\text{стат}} = \frac{V}{4\pi c^3} \cdot \frac{cS}{4V} = \frac{S}{16\pi c^2},$$

откуда:

$$t_{\text{стат}} = \frac{\sqrt{S}}{4c\sqrt{\pi}} \cong 0,0004\sqrt{S} \text{ (с)}; \quad (8)$$

так как при статистическом процессе плотность звуковых отражений равна:

$$\bar{N} = \frac{1}{\bar{\tau}},$$

получим:

$$\bar{N} = \frac{1}{t_{\text{стат}}} = \frac{2410}{\sqrt{S}} \text{ (1/с)}. \quad (9)$$

Таким образом, выражение (2) можно раскрыть следующим образом, учитывая, что при больших высотах куполов храмов  $r_k \cong H_k$  (см. рисунок):

$$MB = \frac{\left\{ \frac{P_A \Omega (1 - \alpha_k)}{16\pi H_k^2 c} \right\}}{\left\{ \frac{P_A \Omega}{4\pi r_0^2 c} + \sum_{i=1}^{N_{\text{БК}}} \frac{P_A \Omega (1 - \alpha_k)}{4\pi l_i^2 c} \right\}} = \frac{\left\{ \frac{(1 - \bar{\alpha}_k)}{4H_k^2} \right\}}{\left\{ \frac{1}{r_0^2} + \sum_{i=1}^{N_{\text{БК}}} \frac{(1 - \bar{\alpha}_{\text{БК}})}{l_i^2} \right\}}, \quad (10)$$

где  $\bar{\alpha}_{\text{БК}}$  – средний КЗП помещения без учета КЗП площади купола;

$$N_{\text{БК}} = \frac{2410}{\sqrt{S_{\text{общ}} - S_k}},$$

где  $S_{\text{общ}}$  – общая площадь ограждений помещения без площади купола;  $S_k$  – площадь купола.

### Список литературы

1. Щиржецкий Х.А., Сухов В.Н., Алешкин В.М. К вопросу обеспечения условий акустического комфорта при проектировании и строительстве зданий и сооружений в комплексах православных храмов России // *БСТ: Бюллетень строительной техники*. 2020. № 6 (1030). С. 26–27.

Следовательно:

$$MB = \frac{\left\{ \frac{(1 - \alpha_k)}{4H_k^2} \right\}}{\left\{ \frac{1}{r_0^2} + \frac{N_{\text{БК}}(1 - \bar{\alpha}_{\text{БК}})}{(S_{\text{общ}} - S_k)^2} \right\}} = \frac{\left\{ \frac{(1 - \alpha_k)}{4H_k^2} \right\}}{\left\{ \frac{1}{r_0^2} + \frac{N_{\text{БК}}(1 - \bar{\alpha}_{\text{БК}})(S_{\text{общ}} - S_k)^2}{16V^2} \right\}}. \quad (11)$$

Раскрывая формулу (11) для ближнего поля, получим:

$$\text{при } r_0 < R_r = 0,14 \sqrt{\frac{\bar{\alpha}_{\text{БК}}(S_{\text{общ}} - S_k)}{(1 - \bar{\alpha}_{\text{БК}})}},$$

где  $R_r$  – радиус «гулкости» помещения [9].

$$MB_{\text{б}} \cong \left\{ \frac{(1 - \alpha_k)}{4H_k^2} / \left( \frac{1}{r_0^2} \right) \right\} = (1 - \alpha_k) \cdot \left( \frac{r_0}{2H_k} \right)^2. \quad (12)$$

Для дальнего поля при  $\varepsilon_{\text{общ}} - \varepsilon_k \gg \varepsilon_0$ :

$$MB_{\text{д}} \cong \frac{\left\{ \frac{(1 - \alpha_k)}{4H_k^2} \right\}}{\left\{ \frac{N_{\text{БК}}(1 - \bar{\alpha}_{\text{БК}})(S_{\text{общ}} - S_k)^2}{16V^2} \right\}}. \quad (13)$$

В любом случае  $LH$  рассчитывается по формуле (2):

$$LH = 10 \lg\{MB\}.$$

### Выводы

1. Представленный метод аналитического расчета нового параметра акустики молельных залов храмовых зданий и сооружений – меры высоты может быть весьма полезен на начальных этапах акустического проектирования основных объемно-планировочных решений соответствующих объектов православной и мусульманской конфессий, учитывая решающую роль верхних объемов их молельных залов и особенно куполов в создании у прихожан субъективного впечатления присутствия во время служб «голоса неба».

2. С учетом определенной роли допущений в проведенных расчетах точная оценка степени практической достоверности полученных по формулам (11–13) результатов может быть достигнута только с помощью сравнительного эксперимента по моделированию акустических условий в верхних объемах храмов, в том числе отражений от их куполов. Такая же задача может быть решена и в натуральных условиях путем сравнения результатов проектирования и данных измерений в сданных в эксплуатацию объектах, однако проведение подобных исследований потребует сложной организационно-технической работы ввиду специфики режимов посещаемости соответствующих культовых учреждений.

### References

1. Shchirzhetsky Kh.A., Sukhov V.N., Aleshkin V.M. On the issue of providing conditions for acoustic comfort in the design and construction of buildings and structures in the complexes of Orthodox churches in Russia. *BST: Byulleten' stroitel'noy tekhniki*. 2020. No. 6 (1030), pp. 26–27. (In Russian).

2. Алешкин В.М., Щиржецкий Х.А., Сухов В.Н. Проблематика современного состояния акустического проектирования молельных залов мечетей // *Строительство и реконструкция*. 2016. № 3 (65). С. 88–95.
3. Алешкин В.М., Щиржецкий Х.А., Сухов В.Н. К вопросу решения проблем акустики молельных залов мечетей на примере соборной мечети в Москве. *Фундаментальные, поисковые и прикладные исследования РААСН по научному обеспечению развития архитектуры, градостроительства и строительной отрасли Российской Федерации в 2016 году. Сборник научных трудов РААСН. Сер. «Научные труды РААСН»*. Российская академия архитектуры и строительных наук. Москва, 2017. С. 61–67.
4. Щиржецкий Х.А., Сухов В.Н. Теория и практика применения низкочастотных резонаторов для решения проблем реверберации в православных храмах // *Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности*. 2018. № 3 (375). С. 241–247.
5. Алешкин В.М., Bouttout A., Субботкин А.О., Benferhat M.L., Amara M. Акустика мечети Кетшава в Алжире // *Акустический Журнал*. 2021. Т. 67. № 3. С. 308–318. DOI: 10.31857/S0320791921030011
6. Aleshkin V., Schirjetsky Ch., Subbotkin A. Estimating sound absorption coefficient of prayers in mosques. *Akustika*. 2019. Vol. 32, pp. 227–230.
7. Щиржецкий Х.А., Алешкин В.М., Щиржецкий А.Х. Особенности акустических требований к молельным залам канонических конфессиональных зданий и сооружений. *Труды Всероссийской акустической конференции. Материалы III Всероссийской конференции*. 2020. С. 475–482.
8. Щиржецкий Х.А., Алешкин В.М., Субботкин А.О. Оценка акустики храмовых зданий и сооружений на основе параметра меры высоты. *Строительство и реконструкция*. 2021. № 5 (97). С. 115–121. DOI: 10.33979/2073-7416-2021-97-5-115-121
9. Фурдуев В.В. Акустические основы вещания. М.: Связьиздат, 1960. 320 с.
10. Вятчанина Т.Н. О взаимодействии архитектурной формы и религиозного сознания в русском храмовом зодчестве XV века. Световой символ // *Academia. Архитектура и строительство*. 2008. № 4. С. 30–36.
11. Анерт В., Штеффен Ф. Техника звукоусиления. М.: ЭРА; Леруша. 2003. 416 с.
12. Beranek L. Concert Halls and Opera Houses: Music, Acoustics and Architecture. 2nd edition. New York: Springer Verlag. 2004. 684 p.
13. Вахитов Я.Ш. Слух и речь. Л.: Союзполиграфпром, 1973. 124 с.
2. Aleshkin V.M., Shchirzhetsky H.A., Sukhov V.N. Problems of the current state of acoustic design of prayer halls of mosques. *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya*. 2016. No. 3 (65), pp. 88–95. (In Russian).
3. Aleshkin V.M., Shchirzhetsky H.A., Sukhov V.N. On the issue of solving the problems of acoustics of prayer halls of mosques on the example of a cathedral mosque in Moscow. *Fundamental, exploratory and applied research of the RAASN on scientific support for the development of architecture, urban planning and the construction industry of the Russian Federation in 2016. Collection of scientific papers RAASN. Ser. "Scientific works of RAASN"*. Russian Academy of Architecture and Building Sciences. Moscow, 2017, pp. 61–67. (In Russian).
4. Shchirzhetsky Kh.A., Sukhov V.N. Theory and practice of using low-frequency resonators to solve reverberation problems in Orthodox churches. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Tekhnologiya tekstil'noy promyshlennosti*. 2018. No. 3 (375), pp. 241–247.
5. Aleshkin V.M. et al. Acoustics of the Ketchaoua Mosque in Algeria. *Akusticheskij Zhurnal*. 2021. Vol. 67. No. 3, pp. 302–311. (In Russian). DOI: 10.31857/S0320791921030011
6. Aleshkin V., Schirjetsky Ch., Subbotkin A. Estimating sound absorption coefficient of prayers in mosques. *Akustika*. 2019. Vol. 32, pp. 227–230.
7. Shchirzhetsky Kh.A., Aleshkin V.M., Shchirzhetsky A.Kh. Features of acoustic requirements for prayer halls of canonical confessional buildings and structures. *Proceedings of the All-Russian Acoustic Conference. Materials of the III All-Russian Conference*. 2020, pp. 475–482. (In Russian).
8. Shchirzhetsky Kh.A., Aleshkin V.M., Subbotkin A.O. Evaluation of the acoustics of temple buildings and structures based on the height measure parameter. *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya*. 2021. No. 5 (97), pp. 115–121. (In Russian). DOI: 10.33979/2073-7416-2021-97-5-115-121
9. Furduev V.V. *Akusticheskiye osnovy veshchaniya [Acoustic fundamentals of broadcasting]*. Moscow: Svyazizdat, 1960. 320 p.
10. Vyatchanina T.N. On the interaction of architectural form and religious consciousness in Russian temple architecture of the 15th century. Light symbol. *Academia. Arkhitektura i stroitel'stvo*. 2008. No. 4, pp. 30–36. (In Russian).
11. Anert V., Steffen F. *Tekhnika zvukousileniya [Sound amplification technique]*. Moscow: "ERA", "Lerusha". 2003. 416 p.
12. Beranek L. Concert Halls and Opera Houses: Music, Acoustics and Architecture. 2nd edition. New York: Springer Verlag. 2004. 684 p.
13. Vakhitov Ya.Sh. *Slukh i rech' [Hearing and speech]*. Leningrad: Soyuzpoligrafprom. 1973. 124 p.

УДК 691.32

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-803-6-51-57>

Е.В. РУМЯНЦЕВ<sup>1</sup>, руководитель управления R&D департамента продукта (jekarum@yandex.ru);  
 А.Х. БАЙБУРИН<sup>2</sup>, д-р техн. наук (abayburin@mail.ru)

<sup>1</sup> ООО «ПИК-Строительные Технологии» (Россия, 123242, г. Москва, ул. Баррикадная, 19/1)

<sup>2</sup> Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет) (454080, г. Челябинск, пр. Ленина, 76)

## Особенности применения самоуплотняющихся мелкозернистых бетонных смесей при зимнем бетонировании стыков

Для сокращения сроков жилищного строительства рассматриваются современные технологии индустриального домостроения. Учитывая конструктивные особенности стыков железобетонных конструкций модернизированных крупнопанельных зданий, преимущество отдается монолитным стыкам. Для обеспечения высокой скорости монтажа сборных железобетонных изделий, в том числе в зимних условиях производства работ, требуется применение высокофункциональных бетонов с заданными характеристиками. Рассматриваются вопросы совершенствования технологии зимнего бетонирования стыков за счет применения самоуплотняющихся мелкозернистых бетонных смесей (СУМБС) на основе сухих строительных смесей (ССС) с необходимой интенсивностью набора прочности и жесткости замоноличенного стыка. Рассмотрены основные типы монолитных стыков сборных железобетонных конструкций крупнопанельных зданий. В результате обобщения экспериментальных исследований и обширного производственного опыта применения СУМБС при строительстве сборных зданий даются рекомендации по назначению конструктивно-технологических параметров качества СУМБС, затвердевших бетонов на их основе, особенности технологии по приготовлению СУМБС, бетонированию и контролю качества. Успешное применение СУМБС на основе СССР позволяет обеспечить качество крупнопанельного домостроения с учетом всепогодного характера производства монолитных работ по заделке стыков сборных конструкций, позволяет повысить темпы строительства и сократить его сроки в два-три раза по сравнению с монолитными зданиями.

**Ключевые слова:** монолитные стыки сборных железобетонных изделий, зимнее бетонирование, самоуплотняющиеся мелкозернистые бетонные смеси, «холодные» бетоны, сухие строительные смеси.

**Для цитирования:** Румянцев Е.В., Байбури А.Х. Особенности применения самоуплотняющихся мелкозернистых бетонных смесей при зимнем бетонировании стыков // *Строительные материалы*. 2022. № 6. С. 51–57. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-803-6-51-57>

E.V. RUMYANTSEV<sup>1</sup>, Chief Designer of Product Department (jekarum@yandex.ru); A.Kh. BAYBURIN<sup>2</sup>, Doctor of Sciences (Engineering) (abayburin@mail.ru)

<sup>1</sup> LLC "PIK-Constructional Technologies" (19/1, Barricadnaya Street, Moscow, 123242, Russian Federation)

<sup>2</sup> 2 National Research South Ural State University (76, Lenina Avenue, Chelyabinsk, 454080, Russian Federation)

### The Features of Using Self-Compacting Fine-Grained Fresh Concrete during Winter Concreting of Joints

To reduce the time of housing construction, advanced technologies of industrial housing construction are considered. Given the design features of the joints of reinforced concrete structures of modernized large-panel buildings, preference is given to in-situ joints. To ensure a high speed of installation of precast concrete products, including in winter conditions of work, the use of Ultra High Performance Concretes (UHPC) with specified characteristics is required. The article discusses the issues of improving the technology of winter concreting of joints through the use of fresh of self-compacting fine-grained concrete (SCFGC) based on dry constructional mixes (DCM) with the required intensity of curing and stiffness of concrete for pouring. The main types of in-situ joints of prefabricated reinforced concrete structures of large-panel buildings are considered. As a result of the generalization of experimental studies and extensive industrial experience in the use of SCFGC in the construction of prefabricated buildings, recommendations are given on the designation of structural and technological parameters of the quality of fresh of SCFGC, hardened concretes based on them, the features of the technology for the preparation of fresh of SUMBS, concreting and quality control. The successful application of SCFGC based on DCM allows to ensure the quality of large-panel housing construction, taking into account the all-weather nature of the production of in-situ work on sealing the joints of prefabricated structures, allows you to increase the pace of construction and reduce its time by 2–3 times compared to in-situ buildings.

**Keywords:** in-situ joints of precast concrete structures, winter concreting, self-compacting fine-grained fresh concrete, "cold" concrete, dry constructional mixes.

**For citation:** Rumyantsev E.V., Bayburin A.Kh. The features of using self-compacting fine-grained fresh concrete during winter concreting of joints. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2022. No. 6, pp. 51–57. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-803-6-51-57>

В настоящее время отмечается развитие строительных технологий, направленных на сокращение сроков по возведению жилых зданий [1]. Индустриальное строительство из сборного железобетона имеет конкурентное преимущество перед монолитным домостроением за счет сокращения сроков строительства и себестоимости серийного производства, обеспечения требуемого качества при производстве железобетонных изделий (ЖБИ). Технологии современного крупно-

панельного домостроения (КПД) являются наиболее целесообразными с точки зрения снижения сроков жилищного строительства и отвечает всем основным требованиям потребителей и архитектурно-градостроительных задачам [2–5].

Повышение этажности жилых зданий требует значительного увеличения несущей способности для восприятия высоких нагрузок в современных крупнопанельных зданиях [6]. Применение монолитных

стыков сборных элементов на основе высокофункциональных бетонов отвечает требуемой прочности, надежности и долговечности [7].

В конструкциях модернизированных (отвечающим современным требованиям) крупнопанельных зданий различают следующие виды монолитных стыков:

1. Горизонтальные монолитные стыки: контактно-монолитные; платформенно-монолитные и контактные монолитные. При этом предпочтение отдается применению сборных предварительно напряженных пустотных плит безопалубочного формования (ПБФ) [8–12] (рис. 1).

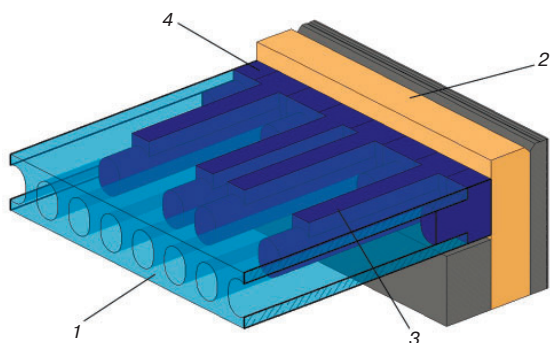
2. Вертикальные монолитные стыки: шпоночные и петлевые по типу «стыков Передерия» с жесткими и гибкими петлями [9, 13–16] (рис. 2).

3. Замоноличиваемые вертикальные и горизонтальные связи штепсельного типа [1, 18–19] (рис. 3).

В Приложении Ж СП 335.1325800.2017 «Крупнопанельные конструктивные системы. Правила про-

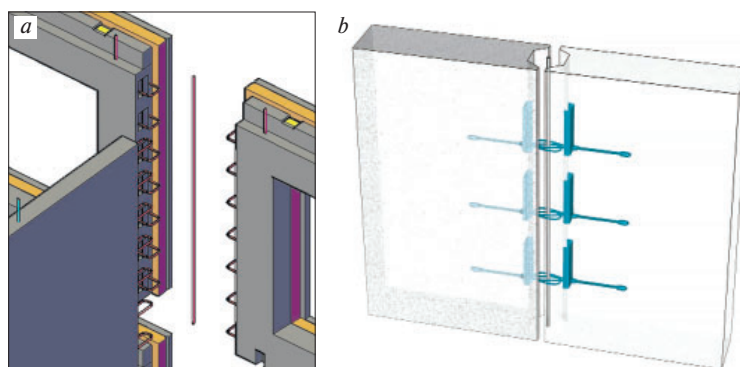
ектирования» регламентированы общие требования к качеству бетонирования стыковых соединений мелкозернистым бетоном. Указывается, что для приготовления бетонных смесей применяют быстротвердеющие цементы и химические добавки. Предлагается использовать бетонные смеси с маркой удобоукладываемости П4, наибольшим размером фракции 8 мм, уплотняемые с помощью глубинных вибраторов с малым диаметром наконечников. Очевидно, что применение вибрируемых бетонных смесей для качественного бетонирования рассмотренных монолитных стыков не представляется возможным. Единственным решением данной задачи является применение растворяемых и бетонных смесей с заданными технологическими характеристиками самоуплотняющегося типа.

Сокращение сроков строительства определяет необходимость всесезонного производства работ без снижения оптимального ритма монтажа КПД при низкой положительной и отрицательной температу-

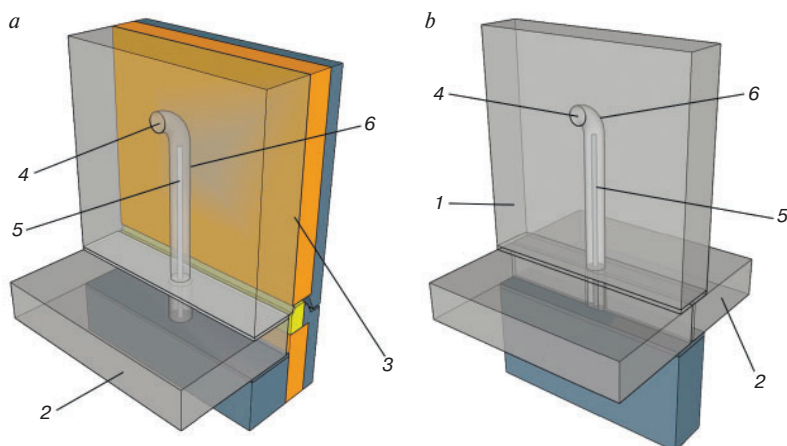


**Рис. 1.** Пример горизонтального монолитного стыка с использованием сборных пустотных ПБФ (арматура не показана): 1 – многпустотная ПБФ; 2 – наружная стенная панель; 3 – штрабы для размещения арматурных связей; 4 – мелкозернистый бетон замоноличивания стыка

**Fig. 1.** An example of a horizontal in-situ joint using prefabricated hollow-core slabs (HCS) without molding (reinforcement is not shown): 1 – HCS; 2 – external wall panel; 3 – fins for placing reinforcing ties; 4 – fine-grained concrete for placing the joint



**Рис. 2.** Вертикальные петлевые стыки с жесткими (а) и гибкими (б) петлями [17]  
**Fig. 2.** Vertical hinge joints with rigid (a) and flexible (b) hinges [17]



**Рис. 3.** Штепсельный стык при одностороннем (а) и двустороннем (б) опирании плит перекрытия: 1 – внутренняя стенная панель; 2 – плита перекрытия; 3 – наружная стенная панель; 4 – мелкозернистая бетонная смесь; 5 – арматурный выпуск; 6 – рифленая трубка или поверхность

**Fig. 3.** Dowel joint with one-sided (a) and two-sided (b) support of floor slabs: 1 – internal wall panel; 2 – floor slab; 3 – external wall panel; 4 – fine-grained concrete mix; 5 – reinforcing dowel; 6 – corrugated tube or surface



**Рис. 4.** Приготовление бетонной смеси на монтажном горизонте в автоматизированной растворо-бетонной установке (а) и с использованием механизированного инструмента (б)

**Fig. 4.** Preparation of concrete mixture on the assembly horizon in an automated mortar-concrete plant (a) and using a mechanized tool (b)

ре [20, 21]. В строительной практике находят распространение самоуплотняющиеся бетонные смеси (СУБС) [22–26], в том числе в зимних условиях производства бетонных работ [27–28]. Применение СУБС для всесезонного бетонирования конструкций обеспечивает требуемые проектные характеристики материалов при сокращении трудоемкости и повышении энергоэффективности производства монолитных работ.

До недавнего времени применение данных технологий в России осложнялось отсутствием действующих нормативных документов по техническим условиям и методам контроля СУБС. В настоящее время в НИИЖБ им. А.А. Гвоздева разработаны и вступили в действие два национальных стандарта по СУБС: ГОСТ Р 59714–2021 «Смеси бетонные самоуплотняющиеся. Технические условия» и ГОСТ Р 59715–2021 «Смеси бетонные самоуплотняющиеся. Методы испытаний» [29, 30]. При этом в стандартах не в полной мере освещены особенности самоуплотняющихся мелкозернистых бетонных смесей (СУМБС). Наблюдается недостаточный объем исследований СУМБС, изготавливаемых из сухих строительных смесей (ССС), в том числе в условиях их твердения при отрицательной температуре — «холодных» бетонов. Поэтому развитие и совершенствование технологий применения СУМБС на основе СССР является актуальной задачей.

Обобщение экспериментальных исследований, выполненных в НИИЖБ им. А.А. Гвоздева, УралНИИСтром, МГСУ, ЮУрГУ при участии авторов, а также обширный производственный опыт, накопленный при строительстве большого количества строительных объектов Компанией ПИК, позволили сформировать представление о требованиях к СУМБС при зимнем бетонировании стыков ЖБИ и выявить их особенности [31, 32].

Высокий темп монтажа сборных конструкций достигается за счет применения СУМБС с необходимой интенсивностью набора прочности и жесткости замоноличенного стыка. Для зимнего бетонирования применяют «зимние» бетоны высокой ранней прочности без дополнительного обогрева (для узлов по типу рис. 1 и 2) и греющие изолированные провода, устанавливаемые при формовке ЖБИ в заводских условиях для прогрева узлов по типу рис. 3.

При применении активных методов тепловой обработки бетона стыков необходимо учитывать особенности «зимних» бетонов на основе СССР, содержащих алюминатные цементы. Следует ограничивать максимальную температуру прогрева таких составов свыше 30°C, так как эта температура является критической из-за перекристаллизации низкоосновных гидроалюминатов кальция в термодинамически устойчивый трехкальциевый гидроалюминат, который характеризуется резким сбросом прочности в течение 1–3 сут [33].

В то же время высокая ранняя прочность бетона приводит к снижению жизнеспособности (сохраняе-

мости первоначальной подвижности) смеси с диапазоном значений порядка 20–30 мин. Это накладывает ограничение на применение товарных бетонов и определяет ограниченный объем приготовления бетонной смеси непосредственно на монтажном горизонте. Предпочтение отдается приготовлению бетонной смеси на основе СССР, что позволяет получить бетонные смеси, которые укладываются в стыки в течение короткого времени (не более 30 мин) без принудительного уплотнения. Технология предусматривает приготовление бетонной смеси с помощью автоматизированных установок (растворно-бетонных узлов) с дозированием компонентов: сухой смеси по весу, воды — по объему, а также ручное приготовление смеси с использованием механизированного инструмента при незначительном объеме заделки (рис. 4).

Необходимо отметить, что интенсификация твердения и формирование структуры бетонов из СУМБС в условиях отрицательной температуры достигается путем модификации их свойств с помощью химических, минеральных (нано- и микронаполнителей) и многокомпонентных (полифункциональных) добавок, а также применения различных типов цементных вяжущих с особыми свойствами [34–43]. Не исключается возможность введения в составы бетонов противоморозных добавок, как правило, бесхлоридных солей щелочных и щелочно-земельных металлов.

СУМБС на основе СССР и затвердевшие бетоны на их основе относятся к бетонам заданного качества и обладают необходимым набором конструктивно-технологических параметров качества, включая высокую подвижность (марка по удобоукладываемости РК4 по ГОСТ Р 59714–2021), обеспечивающую самоуплотняемость; высокую раннюю (через 8 ч — 8 МПа, через 24 ч — 15 МПа) и конечную проектную прочность при сжатии, долговечность (морозостойкость до F2300, водонепроницаемость до W16), высокую адгезию к «старому» бетону, низкое значение усадки или незначительное расширение.

Несмотря на ускорение процесса укладки более подвижных бетонных смесей, на практике следует избегать излишней подвижности, так как это может приводить к протечкам смеси на лицевые поверхности стеновых панелей зданий и требовать тщательной герметизации конструкций опалубки перед заливкой стыковых соединений. Очевидно также, что повышение подвижности бетонной смеси повышает вероятность ее расслоения, поэтому при проектировании составов смесей следует учитывать эту особенность. Это достигается подбором компонентов с учетом оптимального соотношения гранулометрического состава заполнителей, удельной поверхности цементного вяжущего, типа и содержания химических и минеральных добавок для бетонных смесей с рекомендуемым значением водоотделения не более 0,3% (по отношению к общей массе смеси) и вододерживающей способности не менее 95% (по отношению к массе воды).

Надежность стыковых монолитных соединений с применением СУМБС на основе ССС обеспечивается трехступенчатым контролем качества:

- входным лабораторным контролем ССС и СУМБС на ее основе;
- операционным контролем СУМБС на строительной площадке с привлечением строительных лабораторий, в том числе с использованием автоматизированного температурно-прочностного контроля [21];
- приемочным визуальным и инструментальным контролем качества монолитного бетона стыков.

### Заключение

Успешное применение СУМБС на основе ССС позволяет обеспечить качество крупнопанельного домостроения с учетом всепогодного характера производства монолитных работ по заделке стыков сборных конструкций. Разработаны, апробированы и успешно внедрены современные ресурсосберегающие технологии по зимнему бетонированию монолитных стыков сборных железобетонных конструкций крупнопанельных зданий. Подтверждена возможность безоб-

### Список литературы

1. Singhal S., Chourasia A., Chellappa S., Parashar J. Precast reinforced concrete shear walls: State of the art review. *Structural Concrete*. 2019. <https://doi.org/10.1002/suco.201800129>
2. Alfred A. Yee, Hon. D. Structural and economic benefits of precast/prestressed concrete construction. *PCI Journal*. 2001. Vol. 46. No. 4, pp. 34–42.
3. Николаев С.В., Шрейбер А.К., Этенко В.П. Панельно-каркасное домостроение – новый этап развития КЖД // *Жилищное строительство*. 2015. № 2. С. 3–7.
4. Дубынин Н.В. От крупнопанельного домостроения XX в. к системе панельно-каркасного домостроения XXI в. // *Жилищное строительство*. 2015. № 10. С. 12–19.
5. Сапачева Л.В. Модернизация крупнопанельного домостроения – локомотив строительства жилья экономического класса // *Жилищное строительство*. 2011. № 6. С. 2–6.
6. Мухамедиев Т.А., Кудинов О.В. Увеличение этажности сборных крупнопанельных зданий // *Бетон и железобетон*. 2006. № 3. С. 7–9.
7. Фаликман В.Р. Бетоны заданной функциональности – «Умные бетоны» / *Материалы конференции ИССХ Россия*. 3–6 декабря 2019. СПб. С. 52–63.
8. Николаев С.В. Возрождение крупнопанельного домостроения в России // *Жилищное строительство*. 2012. № 4. С. 2–8.
9. Блажко В.П. Тенденции в развитии конструктивных систем панельного домостроения // *Жилищное строительство*. 2012. № 4. С. 43–46.
10. Абрамов М.А. Новая серия панельных домов высотой до 25 этажей // *Жилищное строительство*. 2013. № 3. С. 9–14.

гревного зимнего бетонирования узлов КЖД при контроле термодинамического состояния бетона заделки, что обеспечивается интенсивным набором прочности и жесткости замоноличенных стыков. Предложена эффективная технология контроля твердеющего бетона в стыках за счет системы автоматизированного температурно-прочностного мониторинга. Все это позволяет повысить темп возведения строительных конструкций в два-три раза и сократить его сроки по сравнению с монолитными зданиями.

### References

1. Singhal S., Chourasia A., Chellappa S., Parashar J. Precast reinforced concrete shear walls: State of the art review. *Structural Concrete*. 2019. <https://doi.org/10.1002/suco.201800129>
2. Alfred A. Yee, Hon. D. Structural and economic benefits of precast/prestressed concrete construction. *PCI Journal*. 2001. Vol. 46. No. 4, pp. 34–42.
3. Nikolaev S.V., Shreiber A.K., Etenko V.P. Panel-frame housing construction – a new stage in the development of frame-panel housing construction. *Zhilishchnoe Stroitel'stvo* [Housing Construction]. 2015. No. 2, pp. 3–7. (In Russian).
4. Dubynin N.V. From large-panel housing construction of the 20th century to the system of panel-frame housing construction of the 21st century. *Zhilishchnoe Stroitel'stvo* [Housing Construction]. 2015. No. 10, pp. 12–19. (In Russian).
5. Sapacheva L.V. Modernization of large-panel housing construction – the locomotive of economy-class housing construction. *Zhilishchnoe Stroitel'stvo* [Housing Construction]. 2011. No. 6, pp. 2–6. (In Russian).
6. Muhamediev T.A., Kudinov O.V. Increasing the number of storeys of prefabricated large-panel buildings. *Beton i zhelezobeton* [Concrete and reinforced concrete]. 2006. No. 3, pp. 7–9. (In Russian).
7. Falikman V.R. Concretes of established functionality – «Smart concretes». *Conference Proceedings ICCX Russia*. 3–6 December 2019. St. Petersburg, pp. 52–63. (In Russian).
8. Nikolaev S.V. The revival of large-panel housing construction in Russia. *Zhilishchnoe Stroitel'stvo* [Housing Construction]. 2012. No. 4, pp. 2–8. (In Russian).
9. Blazhko V.P. Trends in the development of structural systems of panel housing construction. *Zhilishchnoe Stroitel'stvo* [Housing Construction]. 2012. No. 4, pp. 43–46. (In Russian).
10. Abramov M.A. A new series of panel houses up to 25 floors. *Zhilishchnoe Stroitel'stvo* [Housing Construction]. 2013. No. 3, pp. 9–14. (In Russian).
11. Kireeva E.I. Strength of horizontal joints of panels and multi-hollow floor slabs. *Zhilishchnoe Stroitel'stvo* [Housing Construction]. 2013. No. 10, pp. 2–6. (In Russian).
12. International Federation for Structural Concrete (*fib*). Special design considerations for precast prestressed hollow core floors. bulletin 2000. No. 6. 172 p.



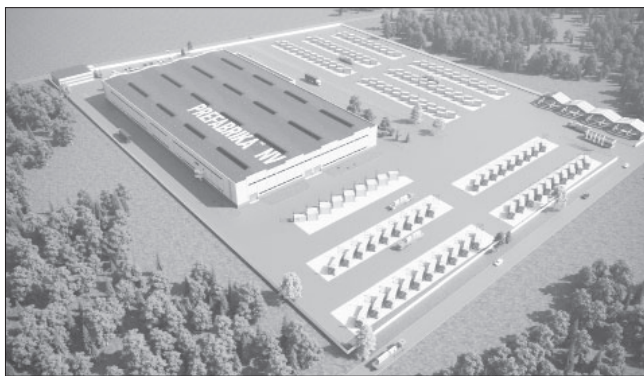
11. Киреева Э.И. Прочность горизонтальных стыков панелей и многопустотных плит перекрытий // *Жилищное строительство*. 2013. № 10. С. 2–6.
12. International Federation for Structural Concrete (*fib*). Special design considerations for precast prestressed hollow core floors. bulletin 2000. No. 6. 172 p.
13. Киреева Э.И. Крупнопанельные здания с петлевыми соединениями конструкций // *Жилищное строительство*. 2013. № 9. С. 47–51.
14. Данель В.В. Совершенствование петлевых стыков стеновых панелей // *Жилищное строительство*. 2014. № 1–2. С. 11–15.
15. Суур-Аскола П. Технологически усовершенствованный продукт от компании Peikko – тросовая петля PVL // *Жилищное строительство*. 2013. № 3. С. 21–23.
16. Зенин С.А. Проектирование жилых крупнопанельных домов с применением бес сварных стыков на тросовых петлях // *Жилищное строительство*. 2013. № 7. С. 14–15.
17. PVL Connecting Loop. Technical Manual. Peikko Group. 2019, 30 p.
18. Зенин С.А., Шарипов Р.Ш., Кудинов О.В. Исследование работы штепсельных стыков в крупнопанельных конструктивных системах зданий // *Бетон и железобетон*. 2021. № 5–6 (607–608). С. 60–66.
19. Provost-Smith Douglas J. Investigation of grouted dowel connection for precast concrete wall construction. Electronic Thesis and Dissertation Repository. 2016. 4298 <https://ir.lib.uwo.ca/etd/4298>
20. Nehdy M., Elsayed M., Provost-Smith D.J. Investigation of grouted precast concrete wall connections at subfreezing conditions. *Material of Conference “Resilient infrastructure”*. London, GB. 2016, pp. 1–10. [https://www.researchgate.net/publication/304115263\\_INVESTIGATION\\_OF\\_GROUTED\\_PRECAST\\_CONCRETE\\_WALL\\_CONNECTIONS\\_AT\\_SUBFREEZING\\_CONDITIONS#fullTextFileContent](https://www.researchgate.net/publication/304115263_INVESTIGATION_OF_GROUTED_PRECAST_CONCRETE_WALL_CONNECTIONS_AT_SUBFREEZING_CONDITIONS#fullTextFileContent)
21. Румянцев Е.В., Видякин А.А., Байбури А.Х. Температурный мониторинг монолитных стыков крупнопанельных зданий при зимнем бетонировании // *Бетон и железобетон*. 2020. № 1 (601). С. 42–48.
22. Okamura M., Ouchi H. Self-compacting high performance concrete. *Progress in Structural Engineering and Materials*. 1998. Vol. 1. Iss. 4, pp. 378–383. DOI: <https://doi.org/10.1002/pse.2260010406>
23. Self-Compacting Concrete. *Proceedings of the First International RILEM Symposium. Edited by A. Skarendahl and O. Petersson*. RELEM Publication S.A.R.L. Stockholm, Sweden. 1999. 578 p.
24. Khayat K.H. Workability, testing, and performance of self-consolidating concrete. *ACI Materials Journal*. 1999. Vol. 96. No. 3, pp. 346–353.
25. Батудаева А.В., Кардумян Г.С., Каприелов С.С. Высокопрочные модифицированные бетоны из
13. Kireeva E.I. Large-panel buildings with loop connections of structures. *Zhilishchnoe Stroitel'stvo [Housing Construction]*. 2013. No. 9, pp. 47–51. (In Russian).
14. Danel' V.V. Improvement of loop joints of wall panels. *Zhilishchnoe Stroitel'stvo [Housing Construction]*. 2014. No. 1–2, pp. 11–15. (In Russian).
15. Suur-Askola P. Technologically improved product from the company Peikko – PVL cable loop. *Zhilishchnoe Stroitel'stvo [Housing Construction]*. 2013. No. 3, pp. 21–23. (In Russian).
16. Zenin S.A. Designing residential large-panel houses using non-welded joints on cable loops. *Zhilishchnoe Stroitel'stvo [Housing Construction]*. 2013. No. 7, pp. 14–15. (In Russian).
17. PVL Connecting Loop. Technical Manual. Peikko Group. 2019, 30 p.
18. Zenin S.A., Sharipov R.Sh., Kudinov O.V. Investigation of the work of plug joints in large-panel constructive systems of buildings. *Beton i zhelezobeton [Concrete and reinforced concrete]*. 2021. No. 5–6 (607–608), pp. 60–66. (In Russian).
19. Provost-Smith Douglas J. Investigation of grouted dowel connection for precast concrete wall construction. Electronic Thesis and Dissertation Repository. 2016. 4298 <https://ir.lib.uwo.ca/etd/4298>
20. Nehdy M., Elsayed M., Provost-Smith D. J. Investigation of grouted precast concrete wall connections at subfreezing conditions. *Material of Conference “Resilient infrastructure”*. London, GB. 2016, pp. 1–10. [https://www.researchgate.net/publication/304115263\\_INVESTIGATION\\_OF\\_GROUTED\\_PRECAST\\_CONCRETE\\_WALL\\_CONNECTIONS\\_AT\\_SUBFREEZING\\_CONDITIONS#fullTextFileContent](https://www.researchgate.net/publication/304115263_INVESTIGATION_OF_GROUTED_PRECAST_CONCRETE_WALL_CONNECTIONS_AT_SUBFREEZING_CONDITIONS#fullTextFileContent)
21. Rumyantsev E.V., Vidyakin A.A., Bayburin A.Kh. Temperature monitoring of monolithic joints of large-panel buildings during winter concreting. *Beton i zhelezobeton [Concrete and reinforced concrete]*. 2020. No. 1 (601), pp. 42–48. (In Russian).
22. Okamura M., Ouchi H. Self-compacting high performance concrete. *Progress in Structural Engineering and Materials*. 1998. Vol. 1. Iss. 4, pp. 378–383. DOI: <https://doi.org/10.1002/pse.2260010406>
23. Self-Compacting Concrete. *Proceedings of the First International RILEM Symposium. Edited by A. Skarendahl and O. Petersson*. RELEM Publication S.A.R.L. Stockholm, Sweden. 1999. 578 p.
24. Khayat K.H. Workability, testing, and performance of self-consolidating concrete. *ACI Materials Journal*. 1999. Vol. 96. No. 3, pp. 346–353.
25. Batudaeva A.V., Kardumyan G.S., Kaprielov S.S. High-strength modified concrete from self-compacting mixtures. *Beton i zhelezobeton [Concrete and reinforced concrete]*. 2005. No. 4, pp. 14–18. (In Russian).
26. Nesvetaev G.V., Lopatina Yu.Yu. Designing the macrostructure of a self-compacting concrete mix and its mortar component. *Internet-zhurnal «Naukovedeniye»*.

- самовыравнивающихся смесей // *Бетон и железобетон*. 2005. № 4. С. 14–18.
26. Несветаев Г.В., Лопатина Ю.Ю. Проектирование макроструктуры самоуплотняющейся бетонной смеси и ее растворной составляющей // *Интернет-журнал «Науковедение»*. 2015. Т. 7. № 5. DOI: <http://dx.doi.org/10.15862/48TVN515>.
  27. Мозгалева К.М., Головнев С.Г., Мозгалева Д.А. Эффективность применения самоуплотняющихся бетонов при возведении монолитных зданий в зимних условиях // *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Сер. Строительство и архитектура*. 2014. Т. 14. № 1. С. 33–37.
  28. Минаков Ю.А., Кононова О.В., Анисимов С.Н., Грязина М.В. Управление кинетикой твердения бетона при отрицательных температурах // *Фундаментальные исследования*. 2013. № 4. 2013. С. 307–311.
  29. Каприелов С.С., Шейнфельд А.В., Арзуманов И.А., Чилин И.А. Новый национальный стандарт на самоуплотняющиеся бетонные смеси // *Вестник НИЦ «Строительство»*. 2021. № 30 (3). С. 30–40. DOI: [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2021-3\(30\)-30-40](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2021-3(30)-30-40)
  30. Титова Л.А., Бейлина М.И., Хлопук В.Л., Шабалин В.А. Разработка национального стандарта на методы испытания самоуплотняющейся бетонной смеси // *Вестник НИЦ «Строительство»*. 2021. № 30 (3). С. 108–116. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2021-3\(30\)-108-116](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2021-3(30)-108-116)
  31. Румянцев Е.В., Байбурун А.Х., Соловьев В.Г., Ахмедьянов Р.М., Бессонов С.В. Технологические параметры качества самоуплотняющихся мелкозернистых бетонных смесей для зимнего бетонирования стыков // *Строительные материалы*. 2021. № 5. С. 4–14. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-791-5-4-14>
  32. Румянцев Е.В., Байбурун А.Х., Соловьев В.Г., Ахмедьянов Р.М., Бессонов С.В. Динамика набора прочности «холодных» самоуплотняющихся мелкозернистых бетонов при зимнем бетонировании стыков // *Строительные материалы*. 2021. № 10. С. 12–20. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-796-10-12-20>
  33. Кузнецова Т.В. Состав, свойства и применение сульфалоуминатного цемента // *Вестник науки и образования Северо-Запада России*. 2018. Т. 4. № 1. С. 1–7.
  34. Баженов Ю.М., Алимов В.В., Воронин В.В. Наномодифицированные высококачественные бетоны. М.: АСВ, 2017. 198 с.
  35. Батраков В.Г. Модификаторы бетона: новые возможности и перспективы // *Строительные материалы*. 2006. № 10 (622). С. 4–7.
  36. Бикбау М.Я., Нefeldов А.С. Наномодифицированный цемент и бетон на его основе // *ALITinform*. 2020. № 2 (59). С. 2–13.
  37. Каприелов С.С., Травуш В.И., Карпенко Н.И., Шейнфельд А.В., Кардумян Г.С., Киселева Ю.А., 2015. Vol. 7. No. 5. (In Russian). DOI: <http://dx.doi.org/10.15862/48TVN515>
  27. Mozgalev K.M., Golovnev S.G., Mozgaleva D.A. Efficiency of use of self-compacting concretes in the construction of monolithic buildings in winter conditions. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya "Stroitel'stvo i arhitektura"*. 2014. Vol. 14. No. 1, pp. 33–37. (In Russian).
  28. Minakov Yu.A., Kononova O.V., Anisimov S.N., Gryazina M.V. Management of concrete hardening kinetics at negative temperatures. *Fundamental'nye issledovaniya*. 2013. No. 4, pp. 307–311. (In Russian).
  29. Kapriyelov S., Sheynfeld A., Arzumanov I., Chilin I. New national standard for self-compacting concrete mixes. *Bulletin of Science and Research Center of Construction*. 2021. Vol. 30 (3), pp. 30–40. DOI: [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2021-3\(30\)-30-40](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2021-3(30)-30-40). (In Russian).
  30. Titova L., Beylina M., Khlopuk V., Shabalin V. Development of a national standard for testing methods for self-compacting concrete mixture. *Bulletin of Science and Research Center of Construction*. 2021. Vol. 30 (3), pp. 108–116. DOI: [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2021-3\(30\)-108-116](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2021-3(30)-108-116). (In Russian).
  31. Rumyantsev E.V., Bayburin A.Kh., Solov'ev V.G., Ahmed'yanov R.M., Bessonov S.V. Technological parameters of the quality of self-compacting fine-grained fresh concrete for winter concreting. *Stroitel'nye Materialy [Construction Materials]*. 2021. No. 5, pp. 4–14. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-791-5-4-14>
  32. Rumyantsev E.V., Bayburin A.Kh., Solov'ev V.G., Ahmed'yanov R.M., Bessonov S.V. Dynamics of strength gain of “cold” self-compacting fine-grained concretes during winter concreting of joints. *Stroitel'nye Materialy [Construction Materials]*. 2021. No. 10, pp. 12–20. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-796-10-12-20>
  33. Kuznecova T.V. Composition, properties and application of sulfoaluminate cement // *Vestnik nauki i obrazovaniya Severo-Zapada Rossii*. 2018. Vol. 4. No. 1, pp. 1–7. (In Russian).
  34. Bazhenov Yu.M., Demyanova V.S., Kalashnikov V.I. Modificirovannye vysokokachestvennye betony [Modified high-quality concrete]. Moscow: ASV. 2006. 368 p.
  35. Batrakov V.G. Concrete modifiers: new opportunities and prospects. *Stroitel'nye Materialy [Construction Materials]*. 2006. No. 10 (622), pp. 4–7. (In Russian).
  36. Bikbau M.YA., Nefeldov A.S. Nanomodified cement and concrete based on it. *ALITinform*. 2020. No. 2 (59), pp. 2–13. (In Russian).
  37. Kapriyelov S.S., Travush V.I., Karpenko N.I., Sheynfeld A.V., Kardumyan G.S., Kiseleva YU.A., Prigozhenko O.V. Modified concretes of a new generation in the structures of the MIBC “Moscow-City”. *Stroitel'nye Materialy [Construction Materials]*. 2006. No. 10 (622), pp. 13–17. (In Russian).

- Пригоженко О.В. Модифицированные бетоны нового поколения в сооружениях ММДЦ «Москва-Сити» // *Строительные материалы*. 2006. № 10 (622). С. 13–17.
38. Красновский Б.М., Долгополов Н.Н., Загреков В.В., Суханов В.А., Лореттова Р.Н. Твердение бетонов на ВНВ при отрицательных температурах // *Бетон и железобетон*. 1991. № 2. С. 17–18.
39. Несветаев Г.В. Эффективность применения суперпластификаторов в бетонах // *Строительные материалы*. 2006. № 10 (622). С. 23–25.
40. Сорокин Ю.В., Калашников О.О., Фаликман В.Р. Строительно-технические свойства особо высокопрочных быстротвердеющих бетонов. *80-летие НИИЖБ им. А.А. Гвоздева. Сборник научных статей*. Москва. 2007. С. 178–194.
41. Ушеров-Маршак А.В. Добавки в бетон: прогресс и проблемы // *Строительные материалы*. 2006. № 10 (622). С. 8–12.
42. Юань Ю., Лин В., Пе Т. Высококачественный цементный бетон с улучшенными свойствами. М.: АСВ, 2014. 448 с.
43. Han B., Ding D, Wang J., Ou J. Nano-engineered cementitious composites. principles and practices. Singapore, Springer Nature Singapore Pte Ltd. 2019. 731 p.
38. Krasnovskiy B.M., Dolgopolov N.N., Zagrekov V.V., Suhanov V.A., Lorettova R.N. Hardening of concretes on VNV at negative temperatures. *Beton i zhelezobeton* [Concrete and reinforced concrete]. 1991. No. 2, pp. 17–18. (In Russian).
39. Nesvetaev G.V. The effectiveness of the use of superplasticizers in concrete. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2006. No. 10 (622), pp. 23–25. (In Russian).
40. Sorokin Yu.V., Kalashnikov O.O., Falikman V.R. Structural and technical properties of especially high-strength fast-hardening concretes. *80th anniversary of NIIZhB named after A.A. Gvozdev Proceedings*. Moscow. 2007, pp. 178–194. (In Russian).
41. Usharov-Marshak A.V. Additives in concrete: progress and problems // *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2006. No. 10 (622), pp. 8–12. (In Russian).
42. Yuan Yu., Lin V., Pe T. Vysokokachestvennyj cementnyj beton s uluchshennymi svojstvami [High-performance cement concrete with improved properties] Moscow: ASV. 2014. 448 p.
43. Han B., Ding D, Wang J., Ou J. Nano-engineered cementitious composites. principles and practices. Singapore, Springer Nature Singapore Pte Ltd. 2019. 731 p.

## НОВОСТИ

### Новый завод крупнопанельного домостроения в Новгородской области»



*Строительство высокотехнологичного завода по производству домокомплектов планируется в ОЭЗ ППТ «Новгородская» в рамках соглашения о взаимодействии, подписанного 15 июня 2022 г. между правительством Новгородской области и компанией «Префабрика АГ» на площадке Петербургского экономического форума. Соглашение подписали губернатор А. Никитин и генеральный директор компании «Префабрика АГ» А. Горнов.*

Плановый объем инвестиций в экономику Новгородской области на период до 2025 г. превысит 3 млрд р. Запуск современного производства обеспечит работой более 270 жителей региона и будет содействовать развитию

жилищного строительства и смежных отраслей не только в области, но и в Северо-Западном федеральном округе в целом.

Строительство производственного корпуса, складских и административных помещений планируется на участке площадью 10 га. На инновационном автоматизированном заводе будут производиться домокомплекты по индустриальной технологии, которая позволяет сократить себестоимость и сроки строительства, а также обеспечить стабильно высокое качество продукции.

Домокомплекты будут разрабатываться специалистами подразделения компании «Префабрика АГ» в Санкт-Петербурге. Оптимальные объемно-планировочные решения в сочетании с широким шагом вертикальных несущих конструкций и различными типами фасадных решений позволят строить комфортное жилье различной этажности, а также объекты социнфраструктуры в срок и с прозрачной себестоимостью в субъектах Северо-Западного и Центрального федеральных округов.

По словам А. Горнова, проект получил серьезную поддержку правительства Новгородской области. Специалисты компании «Префабрика АГ» готовы предложить строительной отрасли региона современные технологические решения для возведения жилья на основе сокращенного инвестиционно-строительного цикла.

В настоящее время компания «Префабрика АГ» оформляет статус резидента ОЭЗ ППТ «Новгородская» и приступает к поэтапной реализации проекта. Кроме того, компания ведет строительство флагманского завода по производству домокомплектов в ОЭЗ «Кашира» Московской области, производственный корпус площадью более 20 тыс. м<sup>2</sup> будет возведен на участке 8,4 га во II кв. 2024 г.

Д.Г. ЗЮКИН, руководитель технического отдела (dg@bpb.su)

Производственно-строительное предприятие ООО «БлокПластБетон» (141075, Московская обл., г. Королев, ул. М. Цветаевой, 1)

## Крупноформатные полистиролбетонные панели — залог успешного строительства

Стремительный рост строительства индивидуального жилья требует внедрения новых технологий возведения зданий. Данные технологии должны соответствовать основным требованиям: высокая скорость строительства, доступная стоимость, качество, долговечность и энергосбережение. Полистиролбетон является идеальным материалом и в плане применения, и в плане производства. Технология строительства с применением крупноформатных полистиролбетонных панелей позволит в оптимальные сроки возводить энергоэффективные дома высокого качества.

**Ключевые слова:** полистиролбетон, панель, бетон, энергоэффективность, дом, технология строительства.

**Для цитирования:** Зюкин Д.Г. Крупноформатные полистиролбетонные панели – залог успешного строительства // *Строительные материалы*. 2022. № 6. С. 58–60. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-803-6-58-60>

D.G. ZYUKIN, Head of Technical Department (dg@bpb.su)

Production and Construction Enterprise "BlockPlastBeton" LLC (BlockPlastBeton) (1, Tsvetaevoy Street, Korolev, 141075, Moscow Region, Russian Federation)

### Large-Format Polystyrene Concrete Panels – the Key to Successful Construction

The rapid growth in the construction of individual housing requires the introduction of new technologies for the construction of buildings. These technologies must meet the basic requirements: high speed of construction, affordable cost, quality, durability and energy saving. Polystyrene concrete is an ideal material both in terms of application and in terms of production. The construction technology with the use of large-format polystyrene concrete panels will make it possible to build energy-efficient houses of the highest quality in the shortest possible time.

**Keywords:** polystyrene concrete, panel, concrete, energy efficiency, house, construction technology.

**For citation:** Zyukin D.G. Large-format polystyrene concrete panels – the key to successful construction. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2022. No. 6, pp. 58–60. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-803-6-58-60>

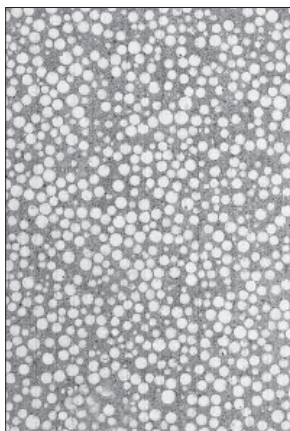
В 2019 г. Минстрой России разработал проект программы по развитию индивидуального жилищного строительства, которая рассчитана до 2024 г. и должна увеличить объемы строительства индивидуальных домов с нынешних 30–36 млн м<sup>2</sup> в год до 40 млн м<sup>2</sup>. Реализация данной программы напрямую зависит от темпов строительства и наличия квалифицированной рабочей силы. Помимо этого, построенные дома должны быть энергоэффективными и обладать достаточной надежностью и долговечностью, т. е. полностью соответствовать современным нормам. В первую очередь под эти критерии подпадают каменные дома. При этом классические варианты возведения индивидуальных домов на основе каменной кладки не могут в полной мере обеспечить реализацию данной программы.

Компания «БлокПластБетон» более десяти лет производит стеновые каменные материалы на основе энергоэффективного композитного бетона – полистиролбетона (рис. 1), соответствующего требованиям СП 50.13330.2012 «СНиП 23-02–2003 Тепловая защита зданий». Для реализации программы индивидуального жилищного строительства специалистами ООО «БлокПластБетон» разработана технология строительства с применением

крупноформатных полистиролбетонных панелей с системой паз-гребень.

Преимущества данной технологии по сравнению с обычной каменной кладкой заключаются в скорости, качестве, безопасности и надежности (рис. 2). В первую очередь это должно заинтересовать крупных застройщиков и обладателей земельных участков под коттеджную застройку (рис. 3). Но и для частного собственника, решившего построить собственный дом, эта технология актуальна и поможет воплотить в реальность самые смелые идеи при минимальных финансовых затратах.

Строительство дома из крупноформатных полистиролбетонных панелей напоминает сборку детского конструкторского набора с прилагаемой инструкцией (рис. 4). На стройплощадку доставляют уже готовые детали сооружения, которые строителям остается лишь смонтировать. При этом для доставки крупноформатных панелей не требуется специальная техника, может использоваться практически любой вид грузового транспорта. В результате производительность труда на такой стройке очень высока. Площадь строительной площадки гораздо меньше необходимой при строительстве кирпичного дома. Такие длительные



**Рис. 1.** Структура полистиролбетона  
**Fig. 1.** Structure of polystyrene concrete



**Рис. 2.** Внешний вид и цеха ООО «БлокПластБетон»  
**Fig. 2.** Appearance and workshops of "BlockPlastBeton" LLC

и трудоемкие процессы, как мелкоштучная каменная кладка, применяемая при классическом строительстве, полностью исключены. И как раз в этом специалисты и видят главное преимущество данного домостроения перед другими типами строительства. Еще один плюс домов из крупноформатных полистиролбетонных панелей с системой паз-гребень — они не будут давать усадку после постройки, а помещения в таких домах не потребуют особого ремонта и выравнивания поверхностей.

На данный момент по этой технологии построено более трехсот индивидуальных домов и получены десятки предзаказов. Это говорит о том, что крупноформатные полистиролбетонные панели набирают популярность и с каждым годом спрос только растет (рис. 4).

В условиях рыночной экономики строительство можно считать успешным лишь при условии полного соответствия четырем основным факторам: скорость, качество, безопасность и стоимость. Рассмотрим соответствие полистиролбетонных панелей с системой паз-гребень этим факторам.

#### Скорость

Сборное строительство позволяет застройщику построить больше домов в те же сроки по сравнению с использованием классической кладки из кирпича или

блоков; крупноформатные полистиролбетонные панели — это промышленный способ строительства. Панели производятся в заводских условиях, потребность в рабочей силе на строительной площадке значительно снижается. Требуется примерно на 50% меньше рабочей силы, а сборка полистиролбетонных панелей выполняется в три-четыре раза быстрее. На возведение стен одноэтажного дома на готовый фундамент площадью 100–150 м<sup>2</sup> понадобится не более двух дней.

Современная производственная линия позволяет производить свыше 100 тыс. м<sup>3</sup> крупноформатных полистиролбетонных панелей в год и возводить более 60 тыс. м<sup>2</sup> индивидуального жилья ежегодно.

*Вывод:* соответствует.

#### Качество

Производство полистиролбетонных панелей в заводских условиях обеспечивает неизменно высокое качество. Полистиролбетонные панели обладают низкой теплопроводностью, высокой долговечностью, не говоря уже о звукоизоляции, гидрофобности и огнестойкости готовых конструкций. Общероссийские и региональные принципы, стандарты и новые технологии производства и строительства также помогают поддерживать и развивать качество выпускаемой продукции.

*Вывод:* соответствует.



**Рис. 3.** Готовые малоэтажные коттеджи  
**Fig. 3.** Ready-made low-rise cottages



**Рис. 4.** Строительство дома из крупноформатных полистиролбетонных панелей  
**Fig. 4.** Construction of a house made of large-format polystyrene concrete panels



**Рис. 5.** Современный жилой дом из полистиролбетонных блоков  
**Fig. 5.** Modern residential building made of polystyrene concrete blocks

### **Безопасность**

Технологичное строительство – это контролируемая среда, в которой тщательно продуманы вопросы безопасности как сотрудников, так и оборудования. Кроме того, чем меньше людей на строительной площадке, тем меньше вероятность несчастных случаев.

*Вывод:* соответствует.

### **Стоимость**

Применение крупноформатных полистиролбетонных панелей позволяет на 20–30% сократить строительные и расходные материалы при возведении дома. Стоимость самих панелей сопоставима с ценой других ячеистых бетонов и значительно дешевле дерева. Дополнительная экономия достигается за счет низкой теплопроводности полистиролбетона и системы паз-гребень, при которой исключаются мостики холода. Это значительно повышает энергоэффективность и снижает энергозатраты на отопление в два раза по сравнению с традиционными материалами. Следует отметить, что охлаждение здания в жаркий период тоже требует определенных затрат, которые сведутся к минимуму благодаря свойству по-

листиролбетона аккумулировать тепло и не пропускать излишки внутрь помещения. Долговечность полистиролбетона способствует более длительной эксплуатации здания без проведения ремонтных работ. При этом застройщик сможет предложить увеличенный срок гарантии, что значительно повысит интерес заказчика.

*Вывод:* соответствует.

Таким образом, полистиролбетонные панели с системой паз-гребень соответствуют всем факторам успешного строительства. Вышеупомянутые основные преимущества крупноформатных полистиролбетонных панелей оценили множество частных заказчиков, а также признали ведущие строительные компании и застройщики (рис. 5).

Работа в команде и сотрудничество – важнейший аспект на протяжении всего цикла от планирования до завершения строительства. Быстровозводимые дома с применением крупноформатных полистиролбетонных панелей полностью соответствуют требованиям программы развития индивидуального жилищного строительства.

УДК 666.9

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-803-6-61-66>

V.V. СТРОКОВА<sup>1</sup>, д-р техн. наук (vvstrokova@gmail.com),  
 V.V. НЕЛЮБОВА<sup>1</sup>, д-р техн. наук (nelubova@list.ru),  
 Н.О. ХМАРА<sup>1</sup>, инженер, старший преподаватель (nataly26071992@mail.ru);  
 А.И. БУКОВЦОВА<sup>2</sup>, канд. техн. наук; Ю.В. ДЕНИСОВА<sup>1</sup>, канд. техн. наук

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

<sup>2</sup> Старооскольский технологический институт им. А.А. Угарова (филиал НИТУ МИСИС) (309516, г. Старый Оскол, мкр. им. Макаренко, 42)

## Вспученный перлитовый песок как эффективная добавка к вяжущему

Обоснована и экспериментально подтверждена возможность использования вспученного перлитового песка, предварительно активированного в планетарной мельнице, как минеральной добавки к белому цементу для повышения технико-экономической эффективности малых архитектурных форм на его основе. Показано, что незначительное измельчение перлитового песка приводит к его активации, это выражается ростом сорбционной емкости по поглощению свободного СаО из раствора (метод Запорожца) и активных брэнстедовских центров (индикаторный способ). Добавка измельченного вспученного песка обеспечивает сокращение сроков схватывания без внесения существенных изменений в процессы гидратации цемента в ранние сроки (до 72 ч); увеличение нормальной плотности теста; загущение системы. Воздействие на подвижность цементного теста обусловлено особенностями структуры минеральной добавки – развитой угловатой поверхностью с высокой дисперсностью и пористостью частиц. При этом пластификация теста на основе цемента с активной добавкой снижает водопотребность и позволяет получать цементный камень с сопоставимой прочностью при сниженном расходе цемента.

**Ключевые слова:** малые архитектурные формы, белый цемент, перлитовый песок, измельчение, планетарная мельница.

Работа выполнена в рамках Программы «Приоритет 2030» на базе БГТУ им. В.Г. Шухова. Работа выполнена с использованием оборудования ЦВТ на базе БГТУ им. В.Г. Шухова.

**Для цитирования:** Строчкова В.В., Нелюбова В.В., Хмара Н.О., Буковцова А.И., Денисова Ю.В. Вспученный перлитовый песок как эффективная добавка к вяжущему // *Строительные материалы*. 2022. № 6. С. 61–66. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-803-6-61-66>

V.V. STROKOVA<sup>1</sup>, Doctor of Sciences (Engineering) (vvstrokova@gmail.com), V.V. NELYUBOVA<sup>1</sup>, Doctor of Sciences (Engineering) (nelubova@list.ru), N.O. KHMARA<sup>1</sup>, Engineer Senior Lecturer (nataly26071992@mail.ru); A.I. BUKOVSOVA<sup>2</sup>, Candidate of Sciences (Engineering); Yu.V. DENISOVA<sup>1</sup>, Candidate of Sciences (Engineering)

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

<sup>2</sup> Starooskol Technological Institute named after A.A. Ugarova (42, Microdistrict named after Makarenko, Stary Osko, Belgorod Region, 309516, Russian Federation)

### Expanded Perlite Sand as an Effective Binder Additive

Substantiated and experimentally confirmed the possibility of using expanded perlite sand, pre-activated in a planetary mill, as a mineral additive to white cement to improve the technical and economic efficiency of small architectural forms based on it. It is shown that a slight grinding of perlite sand leads to its activation, which is expressed by an increase in the sorption capacity for the absorption of free CaO from solution (Zaporozhets method) and active Brönsted centers (indicator method). The addition of activated expanded sand provides a reduction in the setting time without making significant changes to the cement hydration processes in the early stages (up to 72 hours); an increase in the normal density of the dough; thickening of the system. The impact on the mobility of the cement paste is due to the peculiarities of the structure of the mineral additive: a developed angular surface with high dispersion and porosity of the particles. At the same time, the plasticization of dough based on cement with an active additive reduces water demand and makes it possible to obtain a cement stone with comparable strength at a reduced consumption of cement.

**Keywords:** small architectural forms, white cement, perlite sand, grinding, planetary mill.

This work was realized in the framework of the Program «Priority 2030» on the base of the Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. The work was realized using equipment of High Technology Center at BSTU named after V.G. Shukhov.

**For citation:** Strokova V.V., Nelyubova V.V., Khmara N.O., Bukovsova A.I., Denisova Yu.V. Expanded perlite sand as an effective binder additive. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2022. No. 6, pp. 61–66. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-803-6-61-66>

Современное строительство и соответствующее ему производство строительных материалов отличаются ориентацией не только на функциональность изделий и сооружений из них, но и декоративность и эстетичность формируемой среды. В этой связи особую актуальность приобретают малые архитектурные формы (МАФ), являющиеся вспомогательным элементом городского ландшафта. При этом специфика натурной экспозиции МАФ различной конфигурации (вазоны, лавочки, песочницы и многое дру-

гое), как правило, предопределяет необходимость применения для их получения высококачественных бетонных смесей с использованием дорогостоящих компонентов: белых цементов; пигментов специального назначения; фракционированных заполнителей и наполнителей из ценных пород [1–4]. Так, одним из наиболее распространенных видов вяжущих для получения МАФ, является белый портландцемент, использование которого обеспечивает высокую декоративность изделий при формировании

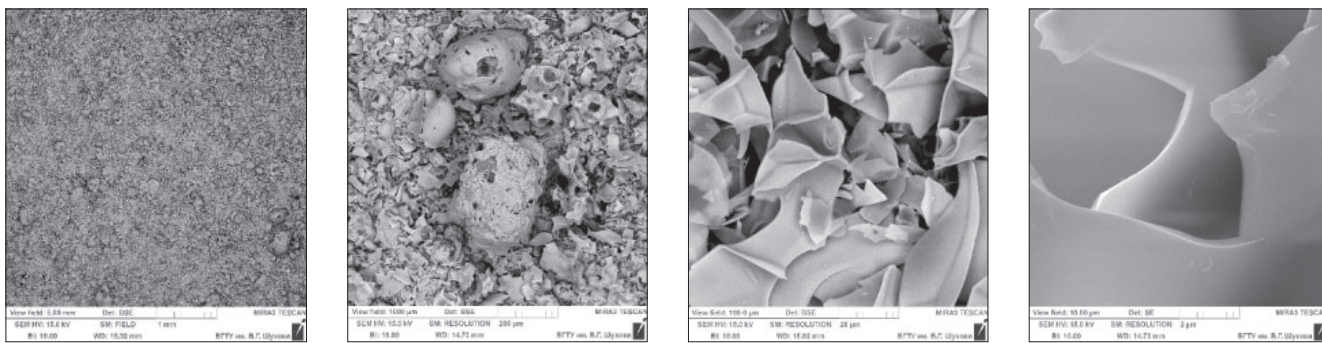


Рис. 1. Микроструктура исходного вспученного перлитового песка  
 Fig. 1. Microstructure of the original expanded perlite sand

заданной прочности и водонепроницаемости [5–8]. Однако высокая доля продукции на российском рынке от зарубежных производителей ставит задачи по поиску эффективных способов сокращения ресурсозатрат на производство таких материалов при сохранении уровня их функциональности и долговечности [9]. Такой подход особенно актуален в реалиях необходимости развития экономики в условиях санкций.

Специфика белого цемента (высокая степень отражения/близны) существенно сокращает спектр компонентов с пуццолановой активностью, поскольку изменение конечного композиционного вяжущего приведет к снижению эстетической выразительности изделий. В этой связи по первичным критериям (цвет и «генетически заложенная» активность) в качестве добавки к вяжущему предлагается рассмотреть вспученный перлитовый песок. Поэтому целью настоящей работы стала оценка возможности использования вспученного перлитового песка как активной добавки к белому цементу, эффективность которого в качестве заполнителя и наполнителя обоснована ранее [10–16].

В качестве сырьевых компонентов в работе изучены вспученный перлитовый песок ООО «Оскол-Снаб» (Белгородская обл.); белый портландцемент СЕМ I 52,5 R производства СІMSA (Турция); пластификатор на поликарбоксилатной основе MELFLUX 1641 F производства BASF (Германия).

Исходный перлитовый песок относится к группе мелких: размеры частиц песка находятся в диапазоне 0,16–1,25 мм; модуль крупности по данным ситового анализа составляет 1,7; насыпная плотность до 75 кг/м<sup>3</sup>.

Химический состав песка представлен преимущественно SiO<sub>2</sub> и Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (табл. 1), что согласуется с его минеральным составом: несмотря на высокую

долю рентгеноаморфного вещества (более 80%), отмечаются пики кварца, полевого шпата, кристобалита.

По данным растровой электронной микроскопии, средний размер частиц перлита колеблется от 0,5 до 10 мкм с характерной открытопористой структурой (рис. 1), при этом внутри округлых зерен наблюдается шелевидная оскольчатая система. Несмотря на достаточно разнообразную форму зерен, поверхность частиц гладкая, с множеством острых углов, выступающих по всему объему.

Ввиду повышенной по сравнению с традиционным портландцементом дисперсностью в случае белого цемента, для лучшей гомогенизации активной минеральной добавки и вяжущего перлитовый песок измельчали в планетарной мельнице с корундовой футеровкой для исключения примесного металлического намола. Измельчение осуществляли до размеров частиц, сопоставимых с цементом. Из-за высокой пористости вспученного песка определение удельной поверхности традиционным способом воздухопроницаемости практически нереализуемо. В этой связи время помола подбирали, анализируя распределение частиц по размерам исходного цемента и измельченного в течение разного времени (3, 5, 15, 30 мин) вспученного перлитового песка методом лазерной гранулометрии с использованием прибора Analysette 22 NanoTec plus.

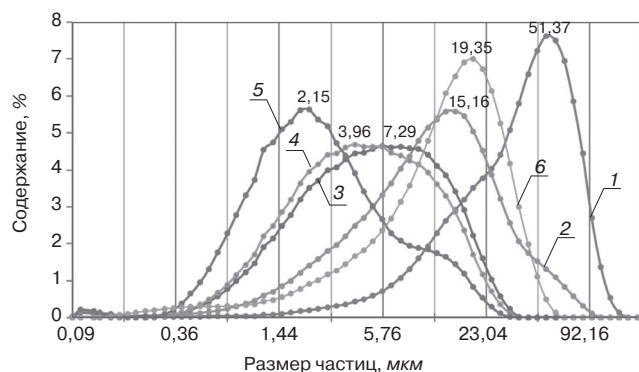


Рис. 2. Гранулометрический состав цемента и вспученного перлитового песка в зависимости от времени измельчения: 1 – исходный; 2 – 3 мин; 3 – 5 мин; 4 – 15 мин; 5 – 30 мин; 6 – цемент  
 Fig. 2. Granulometric composition of cement and expanded perlite sand depending on the grinding time: 1 – initial; 2 – 3 min; 3 – 5 min; 4 – 15 min; 5 – 30 min; 6 – cement

Таблица 1  
 Table 1

Химический состав вспученного перлитового песка  
 Chemical composition of expanded perlite sand

Оксиды	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO
Содержание, %	74,08	14,38	4,49	4,42	1,2	0,64	0,23



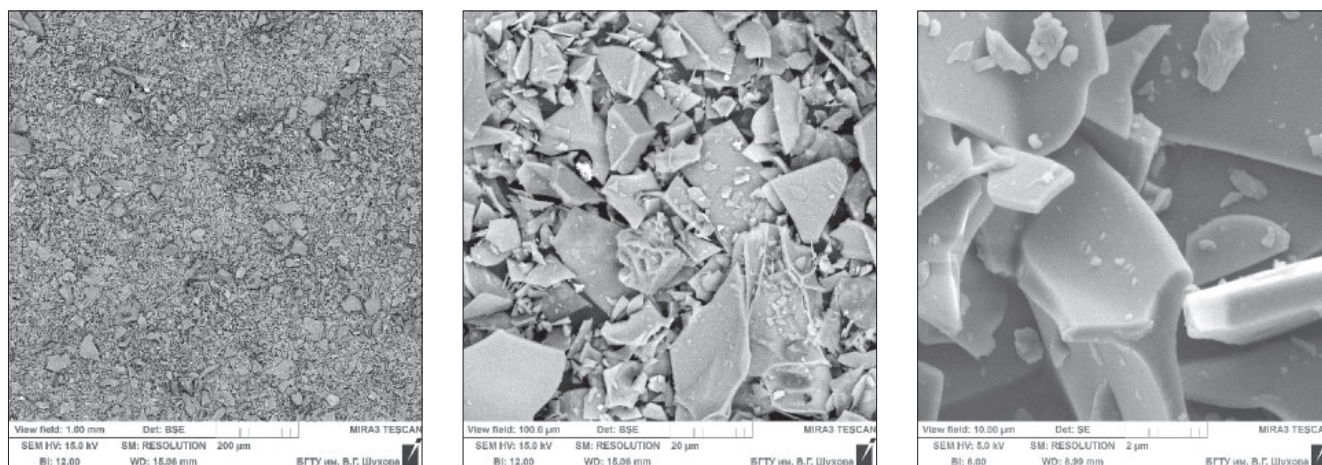


Рис. 3. Микроструктура вспученного перлитового песка, измельченного в течение 3 мин  
Fig. 3. Microstructure of expanded perlite sand, crushed for 3 minutes

Согласно полученным данным (рис. 2), исходный песок отличается пиком в области 50 мкм при максимальном содержании данной фракции около 8% от общего объема, тогда как белый цемент характеризуется большей дисперсностью с максимальным размером частиц 19 мкм. Незначительное измельчение перлита (в течение 3 мин) приводит к смещению пика размеров частиц в область 10–20 мкм и обеспечивает сопоставимую с вяжущим дисперсность: рассчитанное прибором значение удельной поверхности для цемента составляет  $4300 \text{ м}^2/\text{кг}$ , а для измельченного песка –  $4900 \text{ м}^2/\text{кг}$ . Увеличение времени диспергации до 5 мин обеспечивает значительное уменьшение размеров частиц с формированием своеобразного плато в диапазоне 3–10 мкм с превышением удельной поверхности по сравнению с цементом более чем в два раза. Дальнейший помол перлита нецелесообразен, поскольку значительного прироста дисперсности не происходит, что, вероятно, связано с агломерацией частиц ввиду высокой активности. Таким образом, для дальнейшей работы выбрано время измельчения 3 мин.

Микроструктура измельченного песка (рис. 3) представлена преимущественно осколочными частицами угловатой неправильной формы, сформированными при дроблении округлых частиц с развитой поровой структурой. При этом общая полидисперсность твердой фазы сохраняется.

Для оценки эффективности измельченного перлитового песка не только в качестве наполнителя, но и в качестве активной добавки изучали сорбционную емкость методом Запорожца, концентрацию кислотных центров Бренстеда индикаторным методом и свободную энергию поверхности (табл. 2). Так, увеличение дисперсности незначительно влияет на сорбционную емкость перлитового песка: прирост составляет около 15% и, вероятнее всего, обусловлен, с одной стороны, высвобождением дополнительного пористости за счет разлома частиц, а с другой – некоторой активацией поверхности твердой фазы. Последнее хорошо согласуется с данными по

Таблица 2  
Table 2

Активность вспученного перлитового песка  
Activity of expanded perlite sand

Вспученный перлитовый песок	Количество поглощенного CaO по методу Запорожца, мг/г	Количество кислотных бренстедовских центров, моль/г	Свободная энергия поверхности, мН/м
Исходный	23,2	5,5	70,1
Измельченный	27,4	14,3	71,2

Таблица 3  
Table 3

Физико-механические свойства цементного теста  
Physical and mechanical properties of cement paste

Вид системы	Состав			Свойства	
	Цемент, %	ВСП <sub>м</sub> , %	СП, %	НГ, %	Начало схватывания, мин
Цемент чистый	100	–	–	33	65
Цемент с СП	100	–	0,3	28	85
Цемент с ВСП <sub>м</sub>	90	10	–	43	52
Цемент с ВСП <sub>м</sub> и СП	90	10	0,3	36	74

концентрации кислотных центров Бренстеда: измельчение обеспечивает прирост активности почти в три раза. При этом оценка изменения количества поглощенного CaO во времени свидетельствует, что максимальная сорбция из раствора происходит в первые 3 ч – за это время поглощается более 80% CaO. Значительного увеличения свободной энергии поверхности, рассчитанной на основе измерения краевого угла смачивания, не отмечается, что обусловлено превалированием физической сорбции над химическими процессами: происходит впитывание капли поверхностью запрессованных сильнопористых образцов. Следовательно, даже незначительный помол перлитового песка приводит к его механоактивации.

Оценку возможности использования измельченного вспученного перлитового песка как активной добавки к белому цементу осуществляли по данным

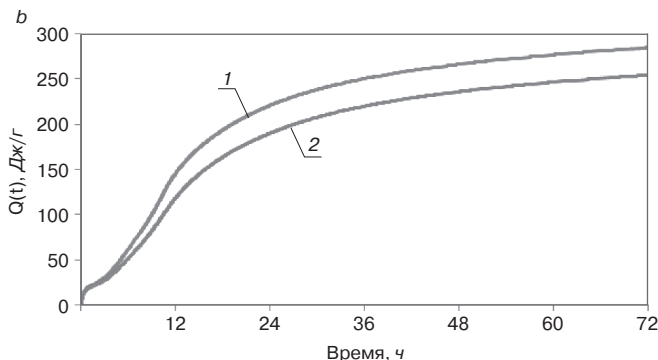
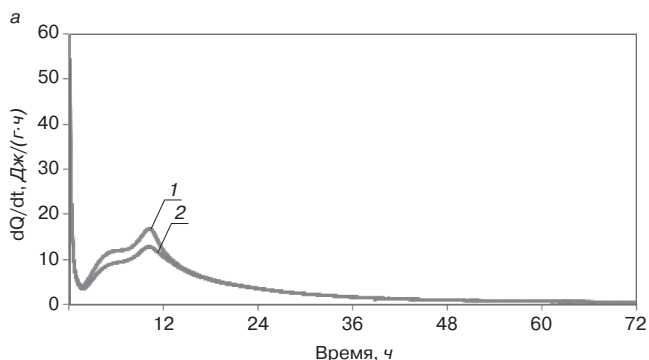


Рис. 4. Кинетика тепловыделения цементного теста в зависимости от состава: а – скорость тепловыделения; б – суммарное количество выделившейся теплоты; 1 – цемент чистый; 2 – цемент с ВСПМ

Fig. 4. Heat release kinetics of cement paste depending on the composition: a – heat release rate; b – total amount of released heat; 1 – cement (no additive); 2 – cement with crushed expanded perlite sand

Таблица 4

Table 4

Изменение количества выделившегося тепла во времени  
Change in the amount of heat released over time

Время съемки	Количество выделившегося тепла, Дж/кг	
	Цемент	Цемент с ВСПМ
12 ч	146,4	119,4
24 ч	220,9	190,8
72 ч	284,7	254,5

Таблица 5

Table 5

Прочность цементного камня в зависимости от состава  
The strength of cement stone depending on the composition

Состав			Предел прочности (28 сут), МПа	
Цемент, %	ВСПМ, %	СП, %	При сжатии	При изгибе
100	–	0,3	44,9	9,7
90	10		43,5	9,2

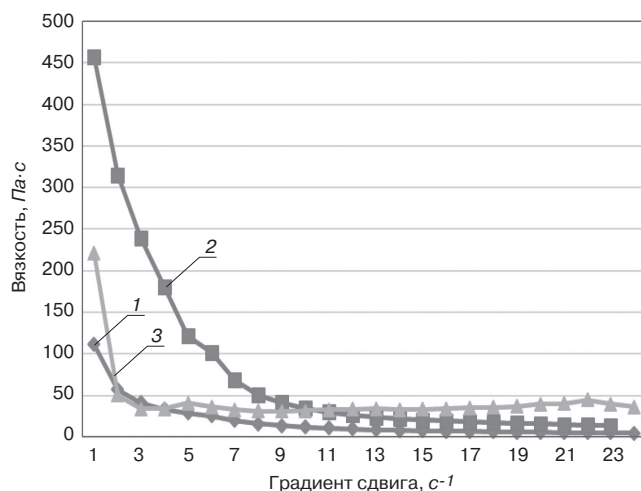


Рис. 5. Реограммы цементного теста в зависимости от состава: 1 – цемент; 2 – цемент+ВСПМ; 3 – цемент+ВСПМ+СП

Fig. 5. Rheograms of cement paste depending on the composition: 1 – cement; 2 – cement with crushed expanded perlite sand; 3 – cement with crushed expanded perlite sand and superplasticizer

физико-механических и физико-химических свойств вяжущего с добавкой: нормальная плотность, сроки схватывания, реология цементного теста, гидратация в ранние сроки (до 72 ч), прочность цементного камня. С учетом предварительного анализа определена предельная концентрация измельченного песка (ВСПМ) в количестве 10% путем замены вяжущего. Концентрация пластификатора (СП) составляет 0,3% от массы цемента.

Добавка вспученного песка, измельченного в течение 3 мин, приводит к росту нормальной плотности цементного теста на 30%, что связано с физической сорбцией дисперсным пористым веществом перлита (табл. 3). Пластифицированное цементное тесто характеризуется снижением водопотребности смеси на 18%. Совместное использование активного компонента в виде перлитового песка и пластификатора снижает негативное воздействие первого: отмечается увеличение нормальной плотности теста по сравнению с чистым цементом всего на 10%.

Сроки схватывания характеризуются следующими изменениями: при введении пластификатора отмечается увеличение начала схватывания в 1,3 раза,

что связано с формированием оболочек, препятствующих доступу воды к цементным частицам. Вспученный перлитовый песок обеспечивает сокращение начала схватывания на 22%. Добавка измельченного песка к пластифицированному цементному тесту приводит к увеличению начала схватывания всего на 13% по сравнению с чистым цементом.

Оценка влияния перлитового песка на кинетику процессов гидратации белого цемента в ранние сроки (до 72 ч) производилась с использованием дифференциального калориметра ToniCAL Trio модель 7339. Для этого готовились образцы цементного теста при водотвердом отношении, равном 0,5.

Анализ кинетики тепловыделения при гидратации цемента исходного и в присутствии активной добавки позволяет сделать вывод об отсутствии фактического ее влияния на гидратацию цемента до 72 ч: характер тепловыделения идентичен для исходного и добавочного теста (рис. 4). Отличия заключаются лишь в количестве выделившегося тепла как в конкретный момент времени (табл. 4), так и в суммарное время: при введении перлитового песка взамен доли цемента отмечается снижение уровня

тепловыделения в пределах 10%, что связано со снижением на аналогичную величину количества цемента в системе.

Оценку влияния добавок на реологию цементного теста осуществляли методом ротационной вискозиметрии с использованием прибора Rheotest. Для этого готовили цементное тесто с добавками при водотвердом отношении, равном 0,5. Полученные данные коррелируют с результатами оценки нормальной густоты цементного теста. Так, введение пористого компонента с высокой сорбционной емкостью в виде измельченного перлитового песка приводит к существенному загущению системы: отмечается рост начальной вязкости в 4,5 раза (рис. 5). Добавка пластификатора к цементному тесту с перлитом обеспечивает разжижение системы: отмечается снижение вязкости по сравнению с непластифицированным тестом в два раза.

Установлено, что частичная замена цемента на измельченный вспученный перлитовый песок в при-

сутствии пластифицирующей добавки ( $V/T=0,4$ ) обеспечивает сохранение прочности цементного камня (табл. 5) как при сжатии, так и при изгибе по сравнению с пластифицированным цементным камнем, это обусловлено повышенной активностью минеральной добавки.

Таким образом, в работе показана возможность использования вспученного перлитового песка, активированного в планетарной мельнице, в качестве активной добавки к белому цементу. Незначительное измельчение исходного пористого вещества позволяет повысить его физико-химическую активность. Это обеспечивает условия для сохранения ключевых свойств белого цемента при снижении его расхода при замене на активную минеральную добавку. Однако высокая сорбционная емкость минеральной компоненты ставит необходимостью использование пластифицирующих добавок для нивелирования негативного влияния активированных порошков на водопотребность теста и другие характеристики.

### Список литературы

1. Баженова О.Ю., Фетисова А.А., Щербенёва О.А. Мелкозернистые бетоны для архитектурных деталей и малых форм // *Инновации и инвестиции*. 2020. № 7. С. 144–147.
2. Строкова В.В., Хмара Н.О., Нелюбова В.В., Шаповалов Н.А. Малые архитектурные формы: состав и свойства бетонов для их получения // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2021. № 11. С. 8–31. DOI: <https://doi.org/10.34031/2071-7318-2021-6-11-8-31>
3. Баранов Е.В., Шелковникова Т.И., Хорунжий Т.М. Модифицированный декоративный мелкозернистый бетон с добавкой пластификатором и наполнителем // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2018. № 4. С. 13–17. DOI: [https://doi.org/10.12737/article\\_5ac24a27c93945.06235016](https://doi.org/10.12737/article_5ac24a27c93945.06235016)
4. Сулейманова Л.А., Малюкова М.В., Рябчевский И.С., Корякина А.А., Левшина Д.Э. Светящиеся декоративные бетоны с использованием отходов камнедробления горных пород // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2020. № 12. С. 8–16. DOI: <https://doi.org/10.34031/2071-7318-2020-5-12-8-16>
5. Марченко И.Н. Практика применения белого цемента // *Цемент и его применение*. 2010. № 3. С. 46–49.
6. Морозова Н.Н., Кузнецова Г.В., Майсурадзе Н.В., Ахтариев Р.Р., Абдрашитова Л.Р., Низамутдинова Э.Р. Исследование активности пуццоланового компонента и суперпластификатора для гипсоцементно-пуццоланового вяжущего белого цвета // *Строительные материалы*. 2018. № 8. С. 26–30. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2018-762-8-26-30>
7. Ди Марино М., Нильсен Э.П., Би Ч.Ц. Сверхвысокопрочный бетон нового поколения Aalborg

### References

1. Bazhenova O.Yu., Fetisova A.A., Shcherbeneva O.A. Fine-grained concrete for architectural details and small forms. *Innovatsii i investitsii*. 2020. No. 7, pp. 144–147. (In Russian).
2. Strokova V.V., Khmara N.O., Nelyubova V.V., Shapovalov N.A. Small architectural forms: composition and properties of concrete for their production. *Vestnik BGTU im. V.G. Shukhova*. 2021. No. 11, pp. 8–31. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.34031/2071-7318-2021-6-11-8-31>
3. Baranov E.V., Shelkovnikova T.I., Khorunzhii T.M. Modified decorative fine-grained concrete with addition of plasticizer and filler. *Vestnik BGTU im. V.G. Shukhova*. 2018. No. 4, pp. 13–17. (In Russian). DOI: [https://doi.org/10.12737/article\\_5ac24a27c93945.06235016](https://doi.org/10.12737/article_5ac24a27c93945.06235016)
4. Suleymanova L.A., Maliukova M.V., Ryabchevskiy I.S., Koryakina A.A., Levshina D.E. Illuminated concrete using rock crushing waste. *Vestnik BGTU im. V.G. Shukhova*. 2020. No. 12, pp. 8–16. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.34031/2071-7318-2020-5-12-8-16>
5. Marchenko I.N. The practice of using white cement. *Cement i ego primenenie*. 2010. No. 3, pp. 46–49 (In Russian).
6. Morozova N.N., Kuznetsova G.V., Maysuradze N.V., Akhtariev R.R., Abdrashitova L.R., Nizamutdinova E.R. Research in the activity of a pozzolanic component and superplasticizer for gypsum cement pozzolanic binder of white colour (GCPB). *Stroitel'nye Materialy [Construction Materials]*. 2018. No. 8, pp. 26–30. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2018-762-8-26-30>
7. Di Marino M., Nil'sen E.P., Bi Ch.Ts. New generation ultra-high strength Aalborg extreme® concrete based on white cement. *Tsement i ego primenenie*. 2019. No. 4, pp. 96–101. (In Russian).

- extreme® на основе белого цемента // *Цемент и его применение*. 2019. № 4. С. 96–101.
8. Ashteyata A., Haddadb R., Obaidatb Y. Case study on production of self compacting concrete using white cement by pass dust. *Case Studies in Construction Materials*. 2018. No. 9, pp. 1–11. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2018.e00190>
  9. Потапова Е.Н., Гусева Т.В., Тихонова И.О., Канишев А.С., Кемп Р.Г. Производство цемента: аспекты повышения ресурсоэффективности и снижения негативного воздействия на окружающую среду // *Строительные материалы*. 2020. № 9. С. 15–20. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-784-9-15-20>
  10. Яковлев Г.И., Калабина Д.А., Грахов В.П., Бурьянов А.Ф., Гордина А.Ф., Баженов К.А., Никитина С.В. Фторангидритовые композиции с легким заполнителем на основе вспученного перлитового песка // *Строительные материалы*. 2019. № 5. С. 57–61. DOI: [10.31659/0585-430X-2019-770-5-57-61](https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-770-5-57-61)
  11. Загороднюк Л.Х., Рахимбаев Ш.М., Сумской Д.А., Рыжих В.Д. Особенности процессов гидратации вяжущих композиций с использованием отходов вспученного перлитового песка // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2020. № 11. С. 75–88. DOI: [10.34031/2071-7318-2020-5-11-75-88](https://doi.org/10.34031/2071-7318-2020-5-11-75-88).
  12. Pokorný J., Pavlíková M., Pavlík Z. Properties of cement-lime render containing perlite as lightweight aggregate. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. Vol. 596. Iss. 1. 012015. DOI: <http://doi.org/10.1088/1757-899X/596/1/012015>
  13. Vyšvařil M., Pavlíková M., Záleská M., Bayer P., Pavlík Z. Non-hydrophobized perlite renders for repair and thermal insulation purposes: Influence of different binders on their properties and durability // *Construction and Building Materials*. 2020. No. 263. 120617. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120617>
  14. Panagiotopoulou Ch., Angelopoulos P.M., Kosmidi D., Angelou I., Sakellariou L., Taxiarchou M. Study of the influence of the addition of closed-structure expanded perlite microspheres on the density and compressive strength of cement pastes // *Materials Today: Proceedings*. No. 54. P. 1, 2022, pp. 118–124. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.02.149>
  15. Gencil O., Bayraktar O.Y., Kaplan G., Arslan O., Nodehi M., Benli A., Gholampour A., Ozbakkaloglu T. Lightweight foam concrete containing expanded perlite and glass sand: Physico-mechanical, durability, and insulation properties // *Construction and Building Materials*. No. 320. 2022. 126187. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.126187>
  16. Szabó R., Dolgos F., Debreczeni Á., Muksi G. Characterization of mechanically activated fly ash-based lightweight geopolymer composite prepared with ultrahigh expanded perlite content // *Ceramics International*. 2022. No. 48. Iss. 3, pp. 4261–4269. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.10.218>
  8. Ashteyata A., Haddadb R., Obaidatb Y. Case study on production of self compacting concrete using white cement by pass dust. *Case Studies in Construction Materials*. 2018. No. 9, pp. 1–11. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2018.e00190>
  9. Potapova E.N., Guseva T.V., Tihonova I.O., Kanishev A.S., Kemp R.G. Cement production: aspects of increasing resource efficiency and reducing the negative impact on the environment. *Stroitel'nye Materialy [Construction Materials]*. 2020. No. 9, pp. 15–20. (In Russian). DOI: [10.31659/0585-430X-2020-784-9-15-20](https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-784-9-15-20)
  10. Yakovlev G.I., Kalabina D.A., Grakhov V.P., Buryanov A.F., Gordina A.F., Bazhenov K.A., Nikitina S.V. Fluoro-anhydrite compositions with a light filler based on expanded perlite sand. *Stroitel'nye Materialy [Construction Materials]*. 2019. No. 5, pp. 57–61. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-770-5-57-61>
  11. Zagorodnjuk L.H., Rahimbaev Sh.M., Sumskoj D.A., Ryzhik V.D. Features of the processes of hydration of binder compositions using expanded perlite sand waste. *Vestnik BGTU im. V.G. Shuhova*. 2020. No. 11, pp. 75–88 (In Russian). DOI: [10.34031/2071-7318-2020-5-11-75-88](https://doi.org/10.34031/2071-7318-2020-5-11-75-88)
  12. Pokorný J., Pavlíková M., Pavlík Z. Properties of cement-lime render containing perlite as lightweight aggregate. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. Vol. 596. Iss. 1. 012015. DOI: <http://doi.org/10.1088/1757-899X/596/1/012015>
  13. Vyšvařil M., Pavlíková M., Záleská M., Bayer P., Pavlík Z. Non-hydrophobized perlite renders for repair and thermal insulation purposes: Influence of different binders on their properties and durability. *Construction and Building Materials*. 2020. No. 263. 120617. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120617>
  14. Panagiotopoulou Ch., Angelopoulos P.M., Kosmidi D., Angelou I., Sakellariou L., Taxiarchou M. Study of the influence of the addition of closed-structure expanded perlite microspheres on the density and compressive strength of cement pastes. *Materials Today: Proceedings*. No. 54. P. 1, 2022, pp. 118–124. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.02.149>
  15. Gencil O., Bayraktar O.Y., Kaplan G., Arslan O., Nodehi M., Benli A., Gholampour A., Ozbakkaloglu T. Lightweight foam concrete containing expanded perlite and glass sand: Physico-mechanical, durability, and insulation properties. *Construction and Building Materials*. No. 320. 2022. 126187. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.126187>
  16. Szabó R., Dolgos F., Debreczeni Á., Muksi G. Characterization of mechanically activated fly ash-based lightweight geopolymer composite prepared with ultrahigh expanded perlite content. *Ceramics International*. 2022. No. 48. Iss. 3, pp. 4261–4269. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.10.218>

УДК 666.973.6

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-803-6-67-74>

Г.В. КУЗНЕЦОВА<sup>1</sup>, инженер (Kuznetzowa.gal@yandex.ru);  
 Н.Н. УСМАНОВ<sup>2</sup>, канд. пед. наук, представитель;  
 Д.И. МИФТАХОВА<sup>1</sup>, студентка, Н.Э. КАДЫРОВА<sup>1</sup>, студентка

<sup>1</sup> Казанский государственный архитектурно-строительный университет (г. Казань, ул. Зеленая, 1)

<sup>2</sup> HAIYUAN GROUP в РФ и СНГ (142025, г. Казань, ул. Джаудата Файзи, 14)

## Исследование влияния группы песка на структуру песочных смесей в производстве прессованных изделий

Расширение номенклатуры на действующих производствах неизбежно ставит вопрос повышения сырцово-прочности и конкурентоспособности силикатных изделий. Новые производства осваивают сырьевые источники, и возникает вопрос по песку: возможности использования нескольких его видов в производстве. Правильно подобранная песочная смесь в производстве силикатных прессованных изделий способствует хорошей формуемости, достаточной плотности, прочности и экономичности. Наилучшей гранулометрией песка является та, при которой наличие более крупной по размеру фракции в количественном отношении преобладает над мелкой. Приведены исследования составов песочных смесей. Рассматривались смеси из песков в пределах одной группы, смежных групп и с интервалом через группу. Путем математического моделирования проведены расчеты зернового состава по каркас-образующим зерновым остаткам размеров 0,16 и 0,315 мм. Полученные результаты показывают, что песочные смеси в пределах одной группы характеризуются ростом модуля крупности и отсутствием изменения структуры каркас-образования, что указывает на нецелесообразность их смешения. Песочные смеси песков соседних групп дают положительный результат при соотношении не менее 50/50. Песочные смеси с интервалом через группу увеличивают соотношение в пользу крупного песка от 70 до 90%. На основании расчетов произведены определения плотности и сырцово-прочности прессованных образцов на основе рассмотренных соотношений песка и подтверждены расчетные результаты.

**Ключевые слова:** песок, песочная смесь, известково-песчаная смесь, силикатный кирпич, сырцовая прочность.

**Для цитирования:** Кузнецова Г.В., Усманов Н.Н., Мифтахова Д.И., Кадырова Н.Э. Исследование влияния группы песка на структуру песочных смесей в производстве прессованных изделий // *Строительные материалы*. 2022. № 6. С. 67–74. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-803-6-67-74>

G.V. KUZNETSOVA<sup>1</sup>, Engineer, (Kuznetzowa.gal@yandex.ru); N.N. USMANOV<sup>2</sup>, Candidate of Sciences (Pedagogy), representative;  
 D.I. MIFTAHOVA<sup>1</sup>, student, N.E. KADYROVA<sup>1</sup>, student  
 Kazan State University of Architecture and Engineering (1, Zelenaya Street, 420043, Kazan, Russian Federation)

### Investigation of the Influence of the Sand Group on the Structure of Sand Mixtures in the Production of Pressed Products

The expansion of the nomenclature at existing production facilities inevitably raises the question of increasing the raw strength and competitiveness of silicate products. New productions are developing raw materials sources and there are questions about sand: the possibility of using several types of sand in production. Properly selected sand mixture in the production of silicate pressed products contributes to good formability, sufficient density, strength and economy. The best granulometry of sand is the one in which the presence of a larger fraction in quantitative terms prevails over a small one. Studies of the compositions of sand mixtures are given. Mixtures of sands within one group, adjacent groups and with an interval through the group were considered. By mathematical modeling, calculations of the grain composition were carried out on the framework-forming grain residues of sizes 0.16 and 0.315 mm. The results obtained show that sand mixtures within one group are characterized by an increase in the size modulus and the absence of changes in the structure of the framework formation, which indicates the inexpediency of mixing them. Sand mixtures of sands of neighboring groups give a positive result with a ratio of at least 50/50. Sand mixtures with an interval through the group increase the ratio in favor of coarse sand from 70 to 90%. Based on the calculations, the density and raw strength of the pressed samples were determined on the basis of the sand ratios considered and the calculated results were confirmed.

**Keywords:** sand, sand mixture, lime-sand mixture, silicate brick, raw strength.

**For citation:** Kuznetsova G.V., Usmanov N.N., Miftahova D.I., Kadyrova N.E. Investigation of the influence of the sand group on the structure of sand mixtures in the production of pressed products. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2022. No. 6, pp. 67–74. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-803-6-67-74>

За последние годы количество силикатных заводов на территории РФ сократилось вдвое. На это повлияло изменение структуры современного строительства и потребности в высотных зданиях в крупных городах, где, в свою очередь, по технологии силикатный кирпич заменили на неармированные блоки из газобетона. Также на сокращение производств повлияло состояние заводов и нежелание их руководителей прислушиваться к новым требованиям времени. Тем не менее на рынке появляются об-

новленные после реконструкции производства и строятся новые.

Изменение номенклатуры изделий потребовало от производителя увеличения в 1,5–2 раза сырцово-прочности в зависимости от вида прессуемых изделий. Один из возможных вариантов влияния на данный показатель — увеличение расхода известки, но это неизменно ведет к удорожанию продукции. Альтернативой может служить шихтовка или смена песка с речного на овражный, содержащий глинистые примеси [1].

В технологии силикатного кирпича раньше производитель стремился к речному песку и белизне своей продукции, но блоки и перегородки – это уже внутренняя стена, и здесь цвет уходит на второй план. Проведенные ранее исследования А.Н. Володченко установили, что вещественный состав глинистых пород и наличие термодинамически неустойчивых соединений позволят получить эффективные строительные композиты [2]. Минеральные добавки, вводимые в состав вяжущего, оказывают влияние на свойства самого вяжущего и формовочной смеси [3].

Известны примеры, когда после реконструкции прессового отделения производитель переходит на прямую технологию, но при этом остается на использовании песка с модулем крупности 0,75–1,6. Это приводит к тому, что для заполнения пустот в песке нередко расход извести в смеси может составить 12–14%, что и наблюдается на ряде заводов.

Силикатные заводы потребляют 2,2–2,4 м<sup>3</sup> песка на 1 тыс. шт. кирпича они строились вблизи рек и песчаных карьеров. Доставка песка и ее цена играют в современных условиях не последнюю роль [4].

Таблица 1  
Table 1

Группы песка  
Sand groups

Группа песка	Модуль крупности $M_{кр}$	
	Повышенной крупности	Свыше 3
Крупный	Свыше 2,5	До 3
Средний	Свыше 2	До 2,5
Мелкий	Свыше 1,5	До 2
Очень мелкий	Свыше 1	До 1,5
Тонкий	Свыше 0,7	До 1
Очень тонкий	До 0,7	

Новые производства осваивают сырьевые источники, и возникают вопросы по песку и возможности использования нескольких песков в производстве. Пески характеризуются насыпной плотностью, пустотностью и модулем крупности, и чем больше цифровое значение числа модуля крупности, тем крупнее песок (рис. 1).

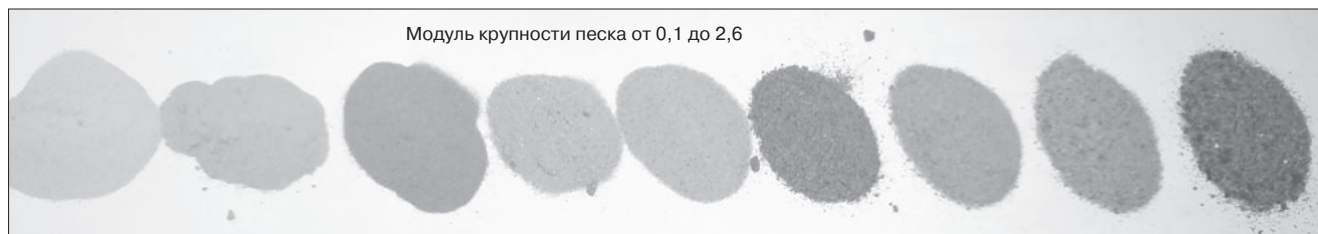


Рис. 1. Пески силикатных заводов России  
Fig. 1. Sands of silicate plants in Russia

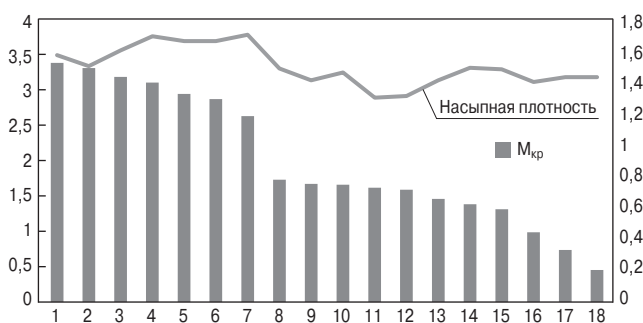


Рис. 2. Модуль крупности и насыпная плотность сухих песков  
Fig. 2. Size modulus and bulk density of dry sands

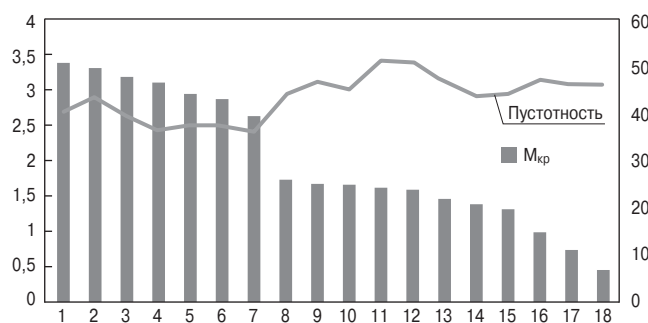


Рис. 3. Модуль крупности и расчетная пустотность сухих песков  
Fig. 3. Grain modulus and design voidness of dry sands

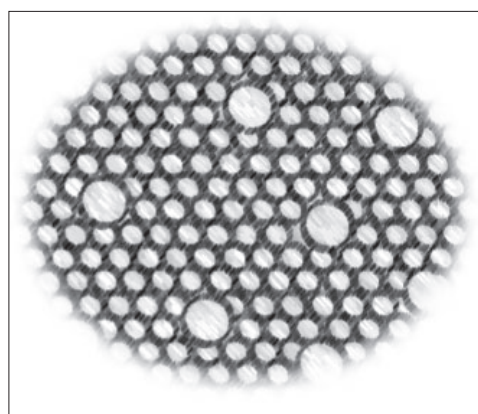


Рис. 4. Структура прессованной смеси при преобладании в песке фракции 0,16 мм, являющейся каркас-образующей  
Fig. 4. The structure of the pressed mixture with a predominance of 0.16 mm fraction in the sand and being a frame-forming

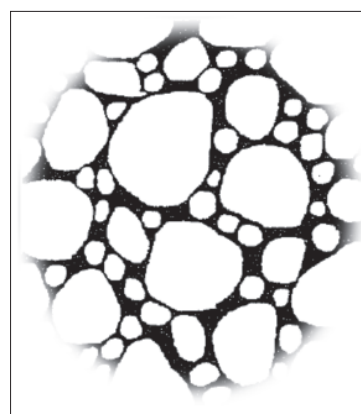


Рис. 5. Структура прессованной смеси при преобладании в песке фракции 0,315 мм, являющейся каркас-образующей  
Fig. 5. The structure of the pressed mixture with a predominance of a fraction of 0.315 mm in the sand and which is the frame forming

Таблица 2  
Table 2Характеристики песков, применяемых в производстве силикатного кирпича  
Characteristics of sands used in the production of silicate bricks

Группа песка	M <sub>кр</sub>	Остатки на ситах, %	Номер сита					
			2,5	1,25	0,63	0,315	0,16	<0,16
Очень тонкий	0,008	Частные	0	0	0	0	0,8	<b>99,2</b>
		Полные	0	0	0	0	0,8	100
	0,16	Частные	0	0,1	0,1	0,1	15,3	<b>84,4</b>
		Полные	0	0,1	0,2	0,3	15,6	100
	0,044	Частные	0	0	0	0	4,4	<b>95,6</b>
		Полные	0	0	0	0	4,4	100
	0,045	Частные	0	0	0	0,4	7,6	<b>92</b>
		Полные	0	0	0	0,4	8	100
0,45	Частные	–	–	0,1	0,2	44,3	<b>55,4</b>	
	Полные	–	–	2,1	0,3	44,6	100	
Тонкий	0,75	Частные	–	–	–	3,2	<b>68,4</b>	28,4
		Полные				3,2	71,6	100
	0,94	Частные	0	0	0,7	9,6	<b>73,3</b>	16,4
		Полные	0	0	0,7	10,3	83,6	100
	0,99	Частные	–	0,25	1	15,5	<b>64,25</b>	19
Полные		–	0,25	1,25	16,75	81	100	
Очень мелкий	1,07	Частные	0,2	0,2	0,4	14,69	<b>74,25</b>	10,26
		Полные	0,2	0,4	0,8	15,49	89,74	100
	1,12	Частные	0	0,41	0,82	15,71	<b>76,12</b>	6,94
		Полные	0	0,41	1,22	16,94	93,06	100
	1,2	Частные	0	0,1	5	29,5	<b>67,9</b>	2
		Полные	0	0,1	0,6	30,1	98	100
	1,3	Частные	0,2	0,2	0,6	16,5	<b>65,3</b>	17,2
		Полные	0,2	0,4	1	17,5	82,8	100
	1,4	Частные	0,5	0,75	1,25	40	<b>52,5</b>	5
		Полные	0,5	1,25	2,5	42,5	95	100
	1,47	Частные	0,4	0,6	2,6	41	<b>53</b>	2,4
		Полные	0,4	1	3,6	44,6	97,6	100
Мелкий	1,54	Частные	0,5	0,5	2	<b>49</b>	45,5	2,5
		Полные	0,5	1	3	52	97,5	100
	1,56	Частные	0,3	0,2	1	<b>52</b>	44,5	2
		Полные	0,3	0,5	1,5	53,5	98	100
	1,7	Частные	0,5	0,75	3,25	<b>61</b>	33	1,5
		Полные	0,5	1,25	4,5	65,5	98,5	100
	1,79	Частные	0,25	0,5	13,5	<b>50,75</b>	33,75	1,25
		Полные	0,25	0,75	14,25	65	98,75	100
	1,85	Частные	1,6	2	8,4	<b>59</b>	26	30
		Полные	1,6	3,6	12	71	97	100
	1,9	Частные	2,3	2,6	10,9	<b>58,8</b>	21,1	4,3
		Полные	2,3	4,8	15,8	74,5	95,7	100
	2	Частные	8,9	3,1	2,9	<b>53,7</b>	26,7	4,6
		Полные	8,9	12,1	15	68,7	95,4	100

Таблица 3  
Table 3

Гранулометрический состав песков группы «Очень мелкий»  
Granulometric composition of sands of the «Very small» group

Группа песка	M <sub>кр</sub>	Остатки на ситах, %	Номер сита					
			2,5	1,25	0,63	0,315	0,16	<0,16
Очень мелкий	1,07	Частные	0,2	0,2	0,4	14,69	<b>74,25</b>	10,26
		Полные	0,2	0,4	0,8	15,49	89,74	100
	1,47	Частные	0,4	0,6	2,6	41	<b>53</b>	2,4
		Полные	0,4	1	3,6	44,6	97,6	100

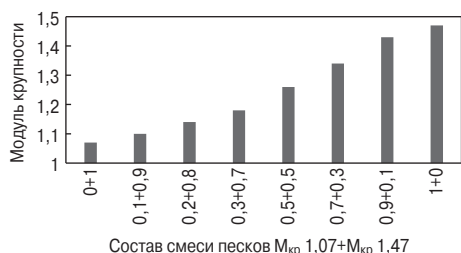


Рис. 6. Влияние состава песочной смеси на модуль крупности  
Fig. 6. Influence of the composition of the sand mixture on the particle size modulus

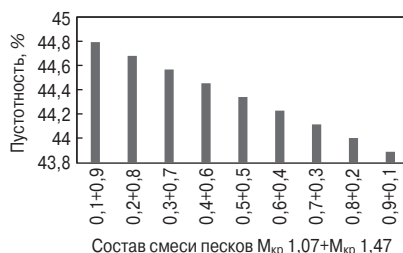


Рис. 7. Изменение пустотности смеси песков M<sub>кр</sub> 1,07 и M<sub>кр</sub> 1,47  
Fig. 7. Change in the voidness of the mixture of sands M<sub>кр</sub> 1,07 and M<sub>кр</sub> 1,47

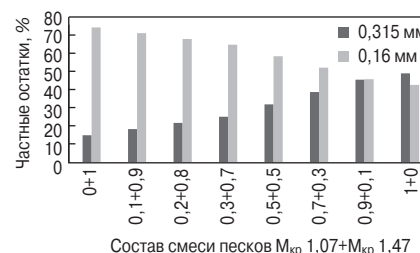


Рис. 8. Влияние состава песочной смеси на структуру  
Fig. 8. Influence of the composition of the sand mixture on the structure

Таблица 4  
Table 4

Гранулометрический состав песков группы «Мелкий»  
Granulometric composition of the sands of the «Small» group

Группа песка	M <sub>кр</sub>	Остатки на ситах, %	Номер сита					
			2,5	1,25	0,63	0,315	0,16	<0,16
Мелкий	1,54	Частные	0,1	0,2	4,7	<b>48,9</b>	41,2	4,9
		Полные	0,1	0,3	5	53,5	95,1	100
	2	Частные	8,9	3,1	2,9	<b>53,7</b>	26,7	4,6
		Полные	8,9	12,1	15	68,7	95,4	100

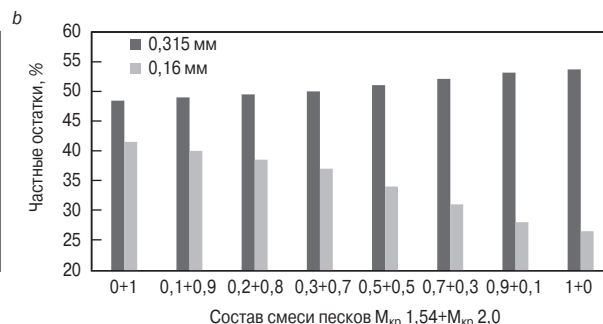
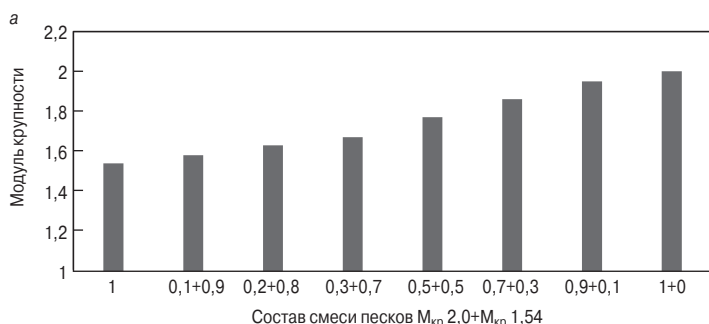


Рис. 9. Влияние состава песочной смеси группы «Мелкий» на: а – модуль крупности; б – структуру  
Fig. 9. Influence of the composition of the sand mixture of the «Small» group on: a – the particle size modulus; b – the structure

В производстве силикатного кирпича гранулометрия песков играет важную роль, так как она в решающей степени определяет формуемость сырца из силикатных смесей. По Л.М. Хавкину [5], наилучшей гранулометрией песка является та, при которой средние зерна размещаются между крупными, а мелкие – между средними и крупными зёрнами. По П.И. Божену [6], наилучшей гранулометрией пе-

ска является та, при которой наличие более крупной по размеру фракции в количественном отношении преобладает над мелкой. Естественно, что при смешивании песков с разным модулем крупности предполагается, что более крупный песок будет в составе более мелкого укрупняющей добавкой и его количество должно быть в пределах 10–20%. Работая с этим предположением, авторы столкнулись с его неодно-



Таблица 5  
Table 5

Гранулометрический состав песков групп «Очень мелкий» и «Мелкий»  
Granulometric composition of sands of the «Very small» and «Small» groups

Группа песка	M <sub>кр</sub>	Остатки на ситах, %	Номер сита					
			2,5	1,25	0,63	0,315	0,16	<0,16
Очень мелкий	1,4	Частные	0,5	0,75	1,25	40	52,5	5
		Полные	0,5	1,25	2,5	42,5	95	100
Мелкий	1,79	Частные	0,25	0,5	13,5	50,75	33,75	1,25
		Полные	0,25	0,75	14,25	65	98,75	100

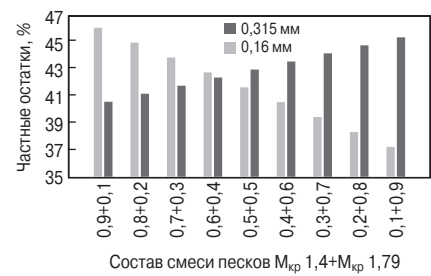
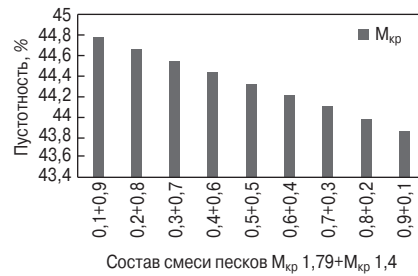
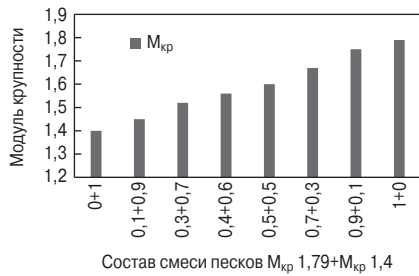


Рис. 10. Влияние состава песочной смеси на модуль крупности  
Fig. 10. Influence of the composition of the sand mixture on the particle size modulus

Рис. 11. Изменение пустотности смеси песков M<sub>кр</sub> 1,79 и M<sub>кр</sub> 1,4  
Fig. 11. Change in the voidness of the mixture of sands M<sub>кр</sub> 1,79 and M<sub>кр</sub> 1,4

Рис. 12. Влияние состава песочной смеси на структуру  
Fig. 12. Influence of the composition of the sand mixture on the structure

Таблица 6  
Table 6

Гранулометрический состав песков групп «Тонкий» и «Мелкий»  
Granulometric composition of the sands of the «Thin» and «Small» groups

Группа песка	M <sub>кр</sub>	Остатки на ситах, %	Номер сита					
			2,5	1,25	0,63	0,315	0,16	<0,16
Тонкий	0,75	Частные	-	-	-	3,2	<b>68,4</b>	28,4
		Полные				3,2	71,6	100
Мелкий	1,7	Частные	0,5	0,75	3,25	<b>61</b>	33	1,5
		Полные	0,5	1,25	4,5	65,5	98,5	100

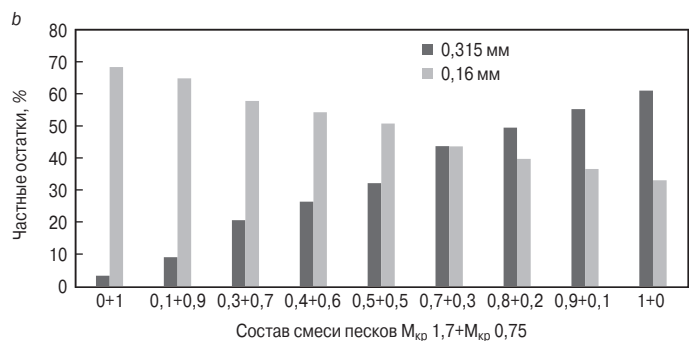
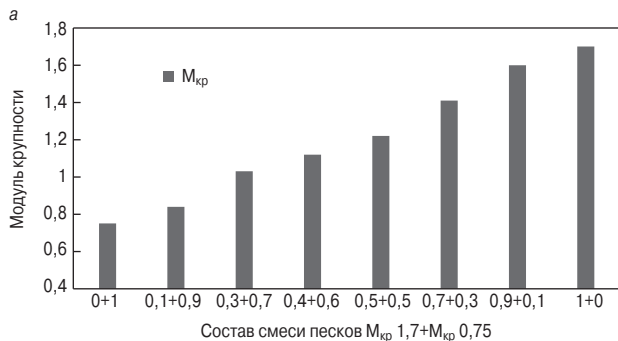


Рис. 13. Влияние состава песочной смеси групп «Тонкий» и «Мелкий» на: а – модуль крупности; б – структуру  
Fig. 13. Influence of the composition of the sand mixture of the «Thin» and «Small» groups on: a – the particle size modulus; b – the structure

значностью: при использовании смеси песков не получается желаемого улучшения плотности и сырьевой прочности. Решение данной проблемы поставило цель исследовать смеси песков разных групп и экспериментально подтвердить влияние группы песка на улучшение состава формовочной известково-песчаной смеси и физико-механических свойств прессованных изделий.

Поставлен ряд задач:  
– исследование зернового состава групп песков;  
– исследование путем математического моделирования изменения составов песочных смесей разных групп;  
– исследование физико-механических свойств изделий на основе улучшенных составов песочных смесей.

Таблица 7  
Table 7

Расход материалов на изготовление образцов  
Consumption of materials for the manufacture of samples

	Ед. изм.	Расход материалов и состав песочной смеси $M_{кр}$							
		1,07+1,8	1,07+1,8	1,07+1,47	1,07+1,47	0,01+1,47	0,01+1,47	0,01+1,07	0,01+1,07
		80+20	20+80	80+20	20+80	90+10	10+90	80+20	20+80
Активность смеси	%	10	10	10	10	10	10	10	10
Количество извести	г	117	117	117	117	117	117	117	117
Количество песка	г	514	514	514	514	514	514	514	514
Количество воды	мл	77	77	77	77	77	77	77	77
Песок $M_{кр}$ 1,07	г	411	103	411	103	0	0	411	103
Песок $M_{кр}$ 1,47	г	0	0	103	411	51	463	0	0
Песок $M_{кр}$ 1,8	г	103	411	0	0	0	0	0	0
Песок $M_{кр}$ 0,01	г	0	0	0	0	463	51	103	411

Песок согласно ГОСТ 8736–2014 по крупности подразделяется на группы. Каждая группа песка характеризуется значением модуля крупности  $M_{кр}$ , указанным в табл. 1.

Проведено исследование гранулометрии песков, используемых на заводах силикатных стеновых материалов. Полученные данные по группам песков приведены в табл. 2.

Известно, что насыпная плотность – это масса единицы объема материала в насыпном (неуплотненном) состоянии с учетом пор и пустот. Пустотность песка зависит от формы зерен, влажности, зернового состава, и ее можно рассчитать по формуле:

$$V_{п} = (1 - \rho_{н} / \rho_{и}) 100\%. \quad (1)$$

На рис. 2, 3 приведены данные группы песков с характеристиками модуля крупности, насыпной плотности и расчетной пористости. Как видно из полученных данных, насыпная плотность, а следовательно, и расчетная пустотность песков с уменьшением модуля крупности увеличиваются (рис. 2, 3).

При рассмотрении зерновых составов песков по группам авторами в табл. 2 выделена фракция, преобладающая в количественном отношении (выделена жирным шрифтом). Так, для песков группы «Очень тонкий» это фракция менее 0,16 мм. Для группы «Тонкий и Очень мелкий» это фракция 0,16 мм. Структура прессованной смеси будет выглядеть, как представлено на рис. 4. Для смесей с такой структурой характерна низкая плотность и прочность.

Для песка группы «Мелкий» это фракция 0,315 мм. Структура прессованной смеси будет выглядеть, как показано на рис. 5.

Для смесей с такой структурой характерна высокая плотность и прочность.

Проведено исследование песочных смесей из двух песков одной группы «Очень мелкий», но с разным модулем крупности по ГОСТ 8736–20014. Гранулометрические составы исследуемых песков представлены в табл. 3.

Путем математического моделирования произведен расчет составов песочных смесей из двух песков

с разным модулем крупности одной группы. Для полученных расчетных составов определен модуль крупности и частные остатки на ситах размером 0,16 и 0,315 мм с целью определения каркас-образующего зерна. Результаты представлены на рис. 6.

Как видно из полученных результатов (рис. 6), изменение состава смеси приводит к росту модуля крупности песочной смеси с 1,07 до 1,47. Насыпная плотность песка  $M_{кр}$  1,07 составила 1,49 кг/л, а песка с  $M_{кр}$  1,47 – 1,46 кг/л. Исследуем изменение пустотности смеси, используя расчетную формулу (1). Результаты представлены на рис. 7. Как видно из полученных результатов, изменение пустотности составило 0,9% для состава 0,9+0,1.

Для полученных расчетных составов определены частные остатки на ситах размером 0,16 и 0,315 мм с целью определения каркас-образующего зерна. Результаты представлены на рис. 8.

Путем математического моделирования произведен расчет составов песочных смесей из двух песков с разным модулем крупности одной группы «Мелкий» по ГОСТ 8736–2014, но с большим интервалом. Гранулометрические составы исследуемых песков для расчетов представлены в табл. 4.

Для полученных расчетных составов определен модуль крупности и частные остатки на ситах размером 0,315 и 0,16 мм с целью определения каркас-образующего зерна. Результаты представлены на рис. 9.

Как видно из полученных результатов, изменение состава смеси приводит к росту модуля крупности песочной смеси, при этом структура песочной смеси также не изменяется. Роль каркас-образующего зерна сохраняется за размером 0,315 мм при любом составе смеси. Смешивать исследуемые пески также не имеет смысла, так как зерновой состав песочной смеси не улучшается и роль каркас-образующего зерна не меняется.

На следующем этапе проведено исследование составов песочных смесей из двух песков разных групп «Очень мелкий» и «Мелкий» по ГОСТ 8736–2014. Гранулометрические составы исследуемых песков для расчетов представлены в табл. 5.

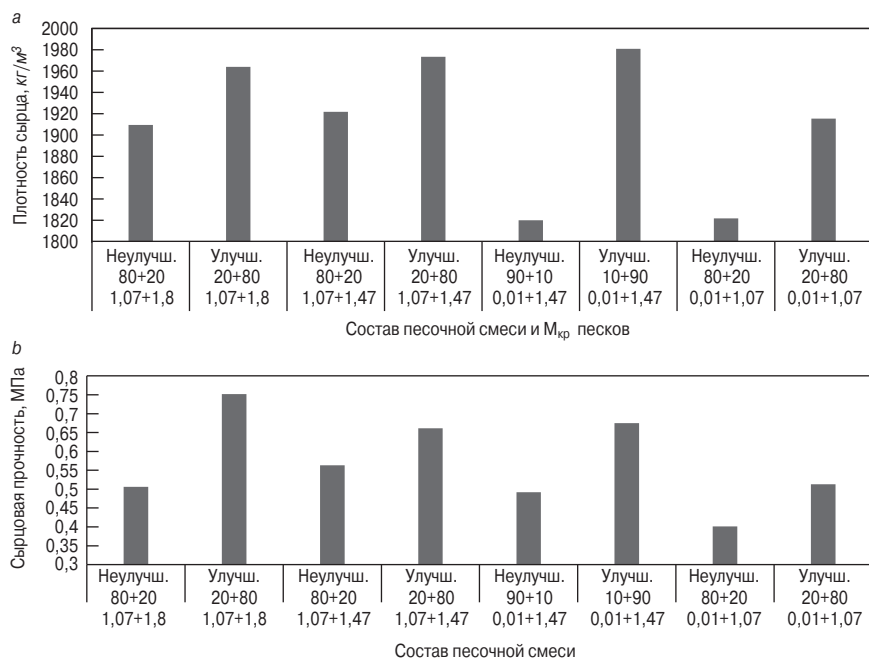


Рис. 14. Влияние состава песочной смеси: а – на плотность прессованного образца; б – на сырцовую прочность прессованного образца

Fig. 14. Influence of the composition of the sand mixture: a – on the density of the pressed sample; b – on raw strength of the pressed sample

Путем математического моделирования произведен расчет частных остатков на ситах размером 0,16 и 0,315 мм песочных смесей с целью определения каркас-образующего зерна. Для полученных расчетных составов определен модуль крупности. Результаты представлены на рис. 5.

Как видно из полученных данных, с увеличением модуля крупности структура песочной смеси изменяется. Точка изменения возникает в составе 0,5+0,5: здесь начинает преобладать размер зерна 0,315 мм. Роль каркас-образующего зерна не изменяется при вводе песка  $M_{кр}$  1,4 в количестве до 50% в песок  $M_{кр}$  1,79 и остается за размером 0,16 мм. Роль каркас-образующего зерна переходит с размера 0,16 мм к размеру 0,315 мм при вводе песка  $M_{кр}$  1,79 в количестве 50% в песок  $M_{кр}$  1,4. Смешивать эти пески имеет смысл при вводе песка  $M_{кр}$  1,4 в песок  $M_{кр}$  1,79 от 10 до 50%. Песок  $M_{кр}$  1,4 может являться уплотняющей добавкой для песка  $M_{кр}$  1,79. Доля песка с большим модулем крупности должна составлять не менее 50%. Песочная смесь из песков групп **n** и **n+1** результативна при количестве песка группы **n+1**  $\geq 50\%$ .

Путем математического моделирования произведен расчет составов песочных смесей их двух песков с разным модулем крупности, разных групп «Тонкий» и «Мелкий» интервал – через группу. Гранулометрические составы исследуемых песков для расчетов представлены в табл. 6.

Для полученных расчетных составов определен модуль крупности и частные остатки с целью определения каркас-образующего зерна. Результаты представлены на рис. 13.

Данные рис. 13 показывают, что изменение состава песочной смеси приводит к росту модуля круп-

ности песочной смеси, при этом изменяется ее структура. Роль каркас-образующего зерна не изменяется при вводе песка  $M_{кр}$  0,75 в количестве до 70% в песок  $M_{кр}$  1,7 и остается за размером 0,16 мм. Роль каркас-образующего зерна переходит с размера 0,16 к 0,315 мм при вводе песка  $M_{кр}$  0,75 в количестве до 20% в песок  $M_{кр}$  1,7. Смешивать эти пески имеет смысл при вводе песка  $M_{кр}$  0,75 в песок  $M_{кр}$  1,7 до 30%, или песка  $M_{кр}$  1,7 в смеси должно быть не менее 70%. Песок  $M_{кр}$  0,75 может являться уплотняющей добавкой для песка  $M_{кр}$  1,7. Смесь из песков групп **n** и **n+2** результативна при количестве песка группы **n+2**  $\geq 70\%$ . Проведено такое же исследование песков с большим интервалом групп и  $M_{кр}$ .

Для проверки полученных результатов произведен расчет и изготовлена партия опытных образцов на четырех песках разных групп и модулей крупности. Состав и расходы материалов приведены в табл. 7. Составы песочных смесей выбирались по двум крайним точкам графиков зернового состава смесей.

Образцы изготовлены методом прессования, прессованные образцы – при усилии прессования 20 МПа. Часть образцов испытана на определение сырцовой прочности, а вторая часть подвергалась автоклавной обработке. Результаты представлены на рис. 14.

Из данных рис. 14 можно заключить, что правильно подобранная песочная смесь показывает увеличение плотности прессованных образцов. При этом видно, что смесь одних и тех же песков показывает различные результаты. Оптимизированная песочная смесь показывает увеличение сырцовой прочности от 30 до 50%.

### Выводы

По результатам проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

- смесь песков с крупностью в пределах одной группы увеличивает модуль крупности, но не изменяет размер каркас-образующего зерна и не улучшает зерновую структуру песочной смеси;
- смесь песков разных групп увеличивает модуль крупности и изменяет размер каркас-образующего зерна и зерновую структуру песочной смеси;
- соотношение песков групп **n** и **n+1** результативно при количестве песка группы **n+1**  $\geq 50\%$ ;
- соотношение песков групп **n** и **n+2** результативно при количестве песка группы **n+2**  $\geq 70\%$ ;
- соотношение песков групп **n** и **n+более 2** результативно при количестве песка группы **n+более 2**  $\geq 90\%$ .

**Список литературы**

1. Кузнецова Г.В., Бабушкина Д.А., Гайнутдинова Г.Х. Комплексное известково-кремнеземистое вяжущее для увеличения сырцової прочности силикатного кирпича // *Строительные материалы*. 2017. № 8. С. 19–22.
2. Володченко А.Н. Влияние глинистых минералов на свойства автоклавных силикатных материалов. *Инновации в науке: Сб. ст. по материалам XXI Междунар. науч.-практ. конф.* Новосибирск: СибАК, 2013.
3. Володченко А.Н. Использование нетрадиционного глинистого сырья для получения силикатных материалов по энергосберегающей технологии // *Успехи современного естествознания*. 2015. № 1 (ч. 4). С. 644–647.
4. Кузнецова Г.В., Гайнутдинова Г.Х. Влияние крупности песка на выбор вида известкового вяжущего // *Строительные материалы*. 2017. № 12. С. 33–37.
5. Хавкин Л.М. Технология силикатного кирпича. М.: Стройиздат. 1982. 384 с.
6. Боженов П.И. Технология автоклавных материалов. Л.: Стройиздат, 1978. 368 с.

**References**

1. Kuznetsova G.V., Babushkina D.A., Gaynutdinova G.Kh. A complex limesiliceous binder for improving raw strength of silicate brick. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2017. No. 8, pp. 19–22. (In Russian).
2. Volodchenko A.N. Influence of clay minerals on the properties of autoclaved silicate materials. *Innovations in science: a collection of articles based on the materials of the XXI International Scientific and Practical Conference*. Novosibirsk: SibAK, 2013. (In Russian).
3. Volodchenko A.N. The use of non-traditional clay raw materials for the production of silicate materials using energy-saving technology. *Uspekhi sovremennogo yestestvoznaniya*. 2015. No. 1 (part 4), pp. 644–647. (In Russian).
4. Kuznetsova G.V., Gaynutdinova G.Kh. Effect of sand fineness on selection of a lime binder type. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2017. No. 12, pp. 33–37. (In Russian).
5. Khavkin L.M. *Tekhnologiya silikatnogo kirpicha* [Silicate brick technology]. Moscow: Stroyizdat. 1982. 384 p.
6. Bozhenov P.I. *Tekhnologiya avtoklavnykh materialov* [Technology of autoclave materials]. Leningrad: Stroyizdat. 1978. 368 p.

## Требования к статьям, направляемым для публикации в журнал «Строительные материалы»<sup>®</sup>

**Уважаемые авторы!**

Приступая к оформлению статьи для журнала внимательно ознакомьтесь с правилами и рекомендациями, размещенными на сайте издательства. Как подготовить к публикации научно-техническую статью см. раздел <https://journal-cm.ru/index.php/ru/avtoram>

Статьи, направляемые для опубликования, должны оформляться в соответствии с техническими требованиями издания:

– текст статьи должен быть набран в редакторе Microsoft Word и сохранен в формате \*.doc или \*.rtf;

– графический материал (графики, схемы, чертежи, диаграммы, логотипы и т. п.) должен быть выполнен в графических редакторах: CorelDraw, Adobe Illustrator и сохранен в форматах \*.cdr, \*.ai, \*.eps соответственно. Сканирование графического материала и импорт его в перечисленные выше редакторы недопустимо;

– иллюстративный материал (фотографии, коллажи и т. п.) необходимо сохранять в формате \*.tif, \*.psd, \*.jpg (качество «8 – максимальное») или \*.eps с разрешением не менее 300 dpi, размером не менее 115 мм по ширине, цветовая модель CMYK или Grayscale.

Материал, передаваемый в редакцию в электронном виде, должен сопровождаться:

- рекомендательным письмом руководителя предприятия (института);
- лицензионным договором о передаче права на публикацию;
- распечаткой, лично подписанной ВСЕМИ авторами;
- рефератом объемом не менее 150 слов на русском и английском языках;
- подтверждением, что статья предназначена для публикации в журнале «Строительные материалы»<sup>®</sup>, ранее нигде не публиковалась и в настоящее время не передана в другие издания;
- сведениями об авторах с указанием полностью фамилии, имени, отчества, ученой степени, должности, контактных телефонов, почтового и электронного адресов (заполненная информационная карта).

**Особое внимание библиографическим спискам!****НЕ РЕКОМЕНДУЕТСЯ:**

1. Включать ссылки на федеральные законы, подзаконные акты, ГОСТы, СНиПы и др. нормативную литературу. Упоминание нормативных документов, на которые опирается автор в испытаниях, расчетах или аргументации, лучше делать непосредственно по тексту статьи.

2. Ссылаться на учебные и учебно-методические пособия; статьи в материалах конференций и сборниках трудов, которым не присвоен ISBN и которые не попадают в ведущие библиотеки страны и не индексируются в соответствующих базах.

3. Ссылаться на диссертации и авторефераты диссертаций.

4. Самоцитирование, т. е. ссылки только на собственные публикации автора. Такая практика не только нарушает этические нормы, но и приводит к снижению количественных публикационных показателей автора.

**ОБЯЗАТЕЛЬНО следует:**

1. Ссылаться на статьи, опубликованные за последние 2–5 лет в ведущих научно-технических и научных изданиях, на которые опирается автор в построении аргументации или постановке задачи исследования.

2. Ссылаться на монографии, опубликованные за последние 5 лет. Более давние источники также негативно влияют на показатели публикационной активности автора.

Несомненно, что возможны ссылки и на классические работы, однако не следует забывать, что наука всегда развивается поступательно вперед и незнание авторами последних достижений в области исследований может привести к дублированию результатов, ошибкам в постановке задачи исследования и интерпретации данных.

Аэропорт Пулково Санкт-Петербург

# RUCEM.RU

## КОНФЕРЕНЦИЯ

### МИНЕРАЛЬНЫЕ ВЯЖУЩИЕ В ТРАНСПОРТНОМ СТРОИТЕЛЬСТВЕ: АВТОДОРОГИ И АЭРОПОРТЫ

- цементобетоны аэродромных и дорожных покрытий
- методы укрепления грунтов для дорожного и аэродромного строительства
- виброукатываемый бетон
- холодный ресайклинг

25-26 августа 2022 года,  
С-Петербург

Организатор мероприятия ООО РУЦЕМ.РУ

[www.rucem.ru](http://www.rucem.ru)  
+7 (8453) 68 33 82

[info@rucem.ru](mailto:info@rucem.ru)  
+7 (927) 225-33-82

<https://cemconf.ru/44>



IV МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-  
ПРАКТИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

# «СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И СТРОИТЕЛЬСТВА ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ»

6-7  
ИЮЛЯ 2022

**КАЛИНИНГРАД**  
HOLIDAY INN  
KALININGRAD

Организатор конференции



INTERNATIONAL  
ASSOCIATION OF  
FOUNDATION  
CONTRACTORS

10 ЛЕТ 2022

МЕЖДУНАРОДНАЯ АССОЦИАЦИЯ  
ФУНДАМЕНТОСТРОИТЕЛЕЙ

Официальная поддержка



**РОСМОРПОРТ**

Генеральный спонсор конференции



**ZINKER**

Спонсоры конференции



СИНЕРГО



ТОРГОВЫЙ ДОМ  
**РЕКС**

Генеральные информационные партнеры

**ФУНДАМЕНТЫ**  
научно-практический журнал для проектировщиков и строителей

**Гидротехника**

**Дорожная  
Держава**



**ТЕХНОЛОГИИ БЕТОНОВ**



**НИЦ строительство**  
научно-исследовательский центр

[www.fc-union.com](http://www.fc-union.com),  
[info@fc-union.com](mailto:info@fc-union.com),  
+7 (495) 66-55-014,  
+7 925 57-57-810

12+