

Stroitel'nye Materialy [Construction Materials]

ISSN 0585-430X (Print)

ISSN 2658-6991 (Online)

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ[®] № 10



НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ ИЗДАЕТСЯ С 1955 г. WWW.RIFSM.RU WWW.JOURNAL-CM.RU ОКТЯБРЬ 2023 г. (818)



**Надо уже сегодня делать то,
о чем другие будут думать завтра**

 **РЕКОН - СМК**
ГРУППА КОМПАНИЙ
ПРОЕКТ-ЗАВОД-СТРОЙКА-ПАТЕНТ

WWW.REKON-SMK.RU

 ЗАКРЫТОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
РЕКОН
ЧЕБОКСАРЫ

WWW.REKON-TECH.RU

ЖИЛОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО С ПЕРЕГОРОДКАМИ КНАУФ



Применение каркасных перегородок в жилых зданиях — это повышенная шумоизоляция, свобода планировки и высокое качество строительства современных объектов.

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

Адрес редакции: Россия, 127434, г. Москва,
Дмитровское ш., д. 9, стр. 3

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ®

№ 10

Основан в 1955 г.

(818) Октябрь 2023 г.

Тел.: (499) 390-87-17 mail@rifsm.ru; www.rifsm.ru; www.journal-cm.ru

Бетон и железобетон в промышленном и гражданском строительстве

С.Н. ЛЕОНОВИЧ, К.Б. СТРОКИН, В.В. МАЛЮК

Долговечность бетона в агрессивных средах класса XF4. Проектирование и прогнозирование 4

InterConPan-2023 в Новосибирске: интеграция научных исследований и технических инноваций

в индустриальное домостроение (Информация) 9

С.С. КАПРИЕЛОВ, А.В. ШЕЙНФЕЛЬД, С.И. ИВАНОВ

Опыт бетонирования массивной густоармированной конструкции с обеспечением термической трещиностойкости 15

В.В. МАЛЮК, В.Д. МАЛЮК, С.В. ВАВРЕНЮК, С.Н. ЛЕОНОВИЧ

Метод оценки долговечности бетона морских сооружений на этапе строительства 25

М.А. ГОНЧАРОВА, А.Г. ЗАЕВА, А.В. КОМАРИЧЕВ, П.В. МОНАСТЫРЕВ

Разработка составов композиционных материалов для эксплуатации в агрессивной среде 29

Гипсовые строительные материалы

XI Международная научно-практическая конференция «Повышение эффективности производства

и применения гипсовых материалов и изделий» состоялась в Карачаево-Черкесии (Информация) 36

А.Ф. ГОРДИНА, Г.И. ЯКОВЛЕВ, Г.Н. ПЕРВУШИН, А.Н. ГУМЕНЮК, В.М. УКРАИНЦЕВА, А.Ф. БУРЬЯНОВ

Неавтоклавный газобетон на основе сульфатсодержащего техногенного отхода 42

Н.И. КОЖУХОВА, Р.А. ГЛАЗКОВ, А.И. КОЛОМЫЦЕВА, И.С. НИКУЛИН, А.В. ЧЕРЕВАТОВА

Влияние цитрогипса на усадочные деформации в шлакощелочных вяжущих системах 47

М.С. ГАРКАВИ, А.В. АРТАМОНОВ, Е.В. КОЛОДЕЖНАЯ, С.А. ДЕРГУНОВ, С.В. СЕРИКОВ

Механохимический синтез композиционных ангидритовых вяжущих 52

Н.И. АЛФИМОВА, С.Ю. ПИРИЕВА

Изучение влияния рецептурно-технологических параметров на водопоглощение прессованных материалов из цитрогипса 58

Материалы и технологии

В.Н. ШАЛИМОВ, А.В. ЦЫБЕНКО, И.Н. ГОГЛЕВ, С.А. ЛОГИНОВА

Исследование химической стойкости ПВХ-мембран для гидроизоляции 63

Ассоциации производителей керамических стеновых материалов (АПКСМ) 15 лет (Информация) 70

А.В. ПЧЕЛЬНИКОВ, А.П. ПИЧУГИН

Обеспечение механической прочности защитных лакокрасочных покрытий стальных металлоконструкций 73

П.А. ФЕДОРОВ, Д.А. СЕНИЦИН, Г.Ю. ШАГИГАЛИН

Использование пыли-уноса из системы газоочистки вагранки минераловатного производства для бесклинкерного вяжущего 78

А.П. ПУСТОВГАР, А.Ю. АБРАМОВА, Н.П. АНДРЕЕВА

Исследование эффективности применения и долговечности золь-силикатных фасадных красок 85

И.В. СТЕПИНА, Ю.Г. ЖЕГЛОВА

Влияние температуры на степень модифицирования древесины кремнийорганическими соединениями 91

А.Р. ТУСНИН, Н.В. ЛИНЬКОВ, А.А. КЛЮКИН

Исследование несущей способности и деформативности соединений деревянных конструкций с применением композиционных материалов 99

Г.В. КУЗНЕЦОВА, Н.Н. МОРОЗОВА, Д.А. ИШМУХАМЕТОВ, А.Р. МУХАРЛЯМОВА

Схемы укладки силикатных изделий на вагонетку с учетом упаковки и энергоэффективность автоклавной тепловой обработки 109

И.О. РАЗОВ, В.Г. СОКОЛОВ, А.В. ДМИТРИЕВ, С.А. ЕРЕНЧИНОВ

Предложение по устройству перекрытия при возведении зданий с помощью аддитивных технологий 116

Результаты научных исследований

Т.В. ЧАЙКА, В.М. ГАВРИШ, Н.И. ЧЕРКАШИНА, Р.В. СИДЕЛЬНИКОВ, Д.С. РОМАНЮК

Модификация композиционных материалов высокодисперсными порошками WC и WO₃ 121

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
Editorial address: 9/3 Dmitrovskoye Highway,
127434, Moscow, Russian Federation

Monthly scientific-technical and industrial journal

STROITEL'NYE MATERIALY®

№ 10

Founded in 1955 (818) October 2023

Tel.: (499) 390-87-17 mail@rifsm.ru; www.rifsm.ru; www.journal-cm.ru

Concrete and reinforced concrete in industrial and civil engineering

S.N. LEONOVICH, K.B. STOKIN, V.V. MALYUK

Durability of Concrete in Aggressive Environments of XF4 Class. Design and Forecasting 4

InterConPan-2023 in Novosibirsk: Integration of Scientific Research and Technical Innovations into Industrial Housing Construction (Information) ... 9

S.S. KAPRIELOV, A.V. SHEYNFELD, S.I. IVANOV

The Experience of Concreting a Massive Dense-Reinforced Structure with the Provision of Thermal Crack Resistance 15

V.V. MALYUK, V.D. MALYUK, S.V. VAVRENYUK, S.V. LEONOVICH

Method for Assessing the Durability of Concrete of Offshore Structures at the Construction Stage 25

M.A. GONCHAROVA, A.G. ZAEVA, A.V. KOMARICHEV, P.V. MONASTYREV

Development of Compositions of Composite Materials for Operation Under the Influence of Aggressive Environments 29

Gypsum building materials

The XI International Scientific and Practical Conference "Increasing the Efficiency of Production and Use of Gypsum Materials and Products" was held in Karachay-Cherkessia (Information) 36

A.F. GORDINA, G.I. YAKOVLEV, G.N. PERVUSHIN, A.N. GUMENIUK, V.M. UKRAINTSEVA, A.F. BURIANOV

Non-Autoclaved Aerated Concrete Based on Sulfate-Containing Technogenic Waste 42

N.I. KOZHUKHOVA, R.A. GLAZKOV, A.I. KOLOMYTCEVA, I.S. NIKULIN, A.V. CHEREVATOVA

Effect of Citrogypsum on Shrinkage in Slag Cements 47

M.S. GARKAVI, A.V. ARTAMONOV, E.V. KOLODEZHNYAYA, S.A. DERGUNOV, S.V. SERIKOV

Mechanochemical Synthesis of Composite Anhydrite Binders 52

N.I. ALFIMOVA, S.Yu. PIRIEVA

Study of the Effect of Recipe and Technological Parameters for Water Absorption of Pressed Citrogypsum-Based Materials 58

Materials and technologies

V.N. SHALIMOV, A.V. CYBENKO, I.N. GOGLEV, S.A. LOGINOVA

Investigation of Chemical Resistance of PVC Membranes for Engineering Waterproofing 63

15 years of Association of Ceramic Wall Materials Manufacturers (ACWMM) (Information) 70

A.V. PHELNIKOV, A.P. PICHUGIN

Ensuring Mechanical Strength of Protective Paint Coatings of Steel Metal Structures 73

P.A. FEDOROV, D.A. SINITSIN, G.Yu. SHAGIGALIN

Use of Dust Entrainment from the Gas-Cleaning System of a Cladder of Mineral Wood Production for Clinker-Free Binder 78

A.P. PUSTOVGAR, A.Y. ABRAMOVA, N.P. ANDREEVA

Research of the Effectiveness and Durability of Sol-Silicate Facade Paints 85

I.V. STEPINA, Yu.G. ZHEGLOVA

Influence of Temperature on the Degree of Modification of Wood with Organosilicon Compounds 91

A.R. TUSNIN, N.V. LINKOV, A.A. KLYUKIN

Investigation of the Bearing Capacity and Deformability of Promising Joints of Wooden Structures Using Composite Materials 99

G.V. KUZNETSOVA, N.N. MOROZOVA, D.A. ISHMUHAMETOV, A.R. MUHARLJAMOVA

Laydown Diagrams of Silicate Products on the Trolley, Taking into Account the Packaging and Energy Efficiency of Autoclave Heat Treatment ... 109

I.O. RAZOV, V.G. SOKOLOV, A.V. DMITRIEV, S.A. ERENCHINOV

Proposal for the Installation of the Overlap During the Construction of Buildings Using Additive Technologies 116

Results of scientific research

T.V. CHAYKA, V.M. GAVRISH, N.I. CHERKASHINA, R.V. SIDELNIKOV, D.S. ROMANYUK

Modification of Composite Materials with Highly Dispersed WC and WO₃ Powders 121

The authors of published materials are responsible for the accuracy of the submitted information, the accuracy of the data from the cited literature and for using in articles data which are not open to the public. The Editorial Staff can publish the articles as a matter for discussion, not sharing the point of view of the author. Reprinting and reproduction of articles, promotional and illustrative materials are possible only with the written permission of the editor-in-chief. The Editorial Staff is not responsible for the content of advertisements and announcements.

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)

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)

СТРОКОВА В.В.,

д-р техн. наук, советник РААСН (Белгород)

ТРАВУШ В.И.,

д-р техн. наук, академик РААСН (Москва)

ФЕДОСОВ С.В.,

д-р техн. наук, профессор, академик РААСН (Москва)

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)

Editor-in-chief

YUMASHEVA E.,

engineer-chemist-technologist, Honorary Builder of Russia

Chairman of Editorial Board

RESIN V.,

Doctor of Science (Economy), Professor (Moscow)

ASKADSKIY A.,

Doctor of Science (Chemistry), Professor (Moscow)

AYZENSHTADT A.,

Doctor of Sciences (Chemistry), Professor (Arkhangelsk)

BURYANOV A.,

Doctor of Science (Engineering), Director of the Russian Association of gypsum (Moscow)

EROFEEV V.,

Doctor of Science (Engineering), Professor, Academician of RAACS (Saratov)

FEDOSOV S.,

Doctor of Science (Engineering), Professor, Academician of RAACS (Moscow)

FISHER H.-B.,

Doctor-Engineer (Germany, Weimar)

GORIN V.,

Candidate of Science (Engineering), President of the Union of Haydite and Haydite Concrete Producers (Samara)

KHOZIN V.,

Doctor of Science (Engineering), Professor (Kazan)

KOROLEV E.,

Doctor of Science (Engineering), Professor (St. Petersburg)

KOTLYAR V.,

Doctor of Science (Engineering), Professor (Rostov-on-Don)

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)

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)

STROKOVA V.

Doctor of Science (Engineering), Advisor of RAACS (Belgorod)

TRAVUSH V.,

Doctor of Science (Engineering), academician of RAACS (Moscow)

VERESHCHAGIN V.,

Doctor of Science (Engineering), Professor (Tomsk)

YAKOVLEV G.,

Doctor of Science (Engineering), Professor (Izhevsk)

С.Н. ЛЕОНОВИЧ¹, д-р техн. наук, иностранный академик РААСН (leonovichsn@tut.by);
К.Б. СТРОКИН², д-р экон. наук (strokin07@rambler.ru);
В.В. МАЛЮК^{2,3}, младший научный сотрудник, старший преподаватель (mvv.77@mail.ru)

¹ Белорусский национальный технический университет (220013, Республика Беларусь, г. Минск, пр-т Независимости, 65)

² Сахалинский государственный университет (693000, г. Южно-Сахалинск, Коммунистический пр-т, 33)

³ Филиал ФГБУ «ЦНИИП Минстроя России» ДальНИИС (690033, г. Владивосток, ул. Бородинская, 14)

Долговечность бетона в агрессивных средах класса XF4. Проектирование и прогнозирование

Рассмотрены проблемы, возникающие при назначении показателей долговечности бетона для агрессивных сред класса XF4 на этапе проектирования. На основании современных теоретических положений структурной теории цементных бетонов и опыта строительства морских сооружений показано, что реализация нормируемой морозостойкости на этапе строительства возможна при условии обеспечения критической зрелости структуры бетона к началу морозного воздействия. В процессе прогнозирования долговечности бетона целесообразно рассматривать коррозию бетона как двухстадийный процесс с периодами инициации и деградации. Рекомендуемые меры защиты бетона от морозной коррозии в агрессивной среде класса XF4 позволяют обеспечить срок службы бетонных конструкций 100 лет.

Ключевые слова: морские сооружения, морозостойкость бетона, коррозия бетона, прогнозирование долговечности, агрессивная среда XF4.

Для цитирования: Леонович С.Н., Строкин К.Б., Малюк В.В. Долговечность бетона в агрессивных средах класса XF4. Проектирование и прогнозирование // *Строительные материалы*. 2023. № 10. С. 4–8.

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-818-10-4-8>

S.N. LEONOVICH¹, Doctor of Sciences (Engineering), Foreign academician of the RAACS (leonovichsn@tut.by);

K.B. STROKIN², Doctor of Sciences (Economics) (strokin07@rambler.ru); V.V. MALYUK^{2,3}, Junior Researcher, Senior Lecturer (mvv.77@mail.ru)

¹ Belarusian National Technical University (65, Prospekt Nezavisimosti, Minsk, 220013, Belarus)

² Sakhalin State University (33, Kommunistichesky Avenue, Yuzhno-Sakhalinsk, 693000, Russian Federation)

³ Branch of FGBU "TSNIIP of Russian Ministry", DalNIIS (Ministry of Construction, Housing and Utilities of the Russian Federation Far-Eastern Research, Design and Technological Institute of Construction) (14, Borodinskaya Street, Vladivostok, 690033, Russian Federation)

Durability of Concrete in Aggressive Environments of XF4 Class. Design and Forecasting

The problems arising in the assignment of concrete durability indicators for aggressive media of class XF4 at the design stage are considered. Based on the modern theoretical provisions of the structural theory of cement concretes and the experience of the construction of offshore structures, it is shown that the implementation of the normalized frost resistance at the construction stage is possible provided that the critical maturity of the concrete structure is ensured by the beginning of frost exposure. In the process of predicting the durability of concrete, it is advisable to consider concrete corrosion as a two-stage process with periods of initiation and degradation. Recommended measures to protect concrete from frost corrosion in an aggressive environment of class XF4 allow to ensure the service life of concrete structures for 100 years.

Keywords: marine structures, concrete frost resistance, concrete corrosion, durability prediction, aggressive environment XF4.

For citation: Leonovich S.N., Strokin K.B., Malyuk V.V. Durability of concrete in aggressive environments of XF4 class. Design and forecasting. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2023. No. 10, pp. 4–8. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-818-10-4-8>

Продолжительность жизненного цикла бетонных конструкций в агрессивных условиях класса XF4, как правило, оценивается долговечностью на этапе эксплуатации. Однако качественные показатели для долговечности устанавливаются на этапе проектирования и формируются на этапе строительства. Долговечность как срок службы конструкции является показателем качества жизненного цикла (далее – ЖЦ). Поэтому важно установить критические показатели каждого этапа, которые в конечном итоге определяют показатель качества ЖЦ конструкции – долговечность.

Класс агрессивности среды XF4 характеризует условия эксплуатации, в которых бетон конструкций подвержен воздействию циклов замораживания и оттаивания в условиях сильного насыщения минерализованной водой. В этих условиях эксплуатируются в

основном конструкции морских портовых сооружений, конструкции зданий и сооружений, подверженные воздействию противогололедных материалов. Традиционно для проектирования долговечности бетонных конструкций применяется предписывающий подход [1]. Основой для этого является накопленный опыт эксплуатации существующих сооружений и большой объем экспериментальных исследований бетона в условиях, приближенных к реальным. Это явилось основой для разработки нормативных документов, которые предписывают алгоритм назначения требований к составу и свойствам бетона в зависимости от агрессивности среды эксплуатации конструкций, таких как СП 28.1330.2017 «Защита строительных конструкций от коррозии. Актуализированная редакция СНиП 2.03.11–85»; ГОСТ 31384–2017 «Защита бетонных и железобетон-

ных конструкций от коррозии»; СНиП 3.07.02–87 «Гидротехнические морские и речные транспортные сооружения»; Пособие к СНиП 3.07.02–87 «Правила производства и приемки работ на строительстве новых, реконструкции и расширении действующих гидротехнических морских и речных транспортных сооружений»; ВСН 150-93 «Указания по повышению морозостойкости бетона транспортных сооружений». Основная задача проектирования долговечности – обеспечить срок службы конструкций с помощью процедуры проектирования, а на этапе строительства реализовать проектные требования по защите бетона от коррозии при морозном воздействии.

На рис. 1 представлена блок-схема системного подхода к технологии получения долговечного бетона для агрессивных сред класса XF4. В этой системе выделены основные подсистемы, на выходе из которых должны быть получены показатели, определяющие долговечность бетона в конструкциях. Из представленной схемы видно, что качество ЖЦ закладывается на этапе проектной разработки. Как было отмечено, проектирование долговечности бетона для агрессивных сред класса XF4 основано на минимально необходимых требованиях к составу и свойствам бетона, позволяющих обеспечивать срок службы конструкций не менее 50 лет. Требования к составу и прочности бетона не зависят от климатического района строительства. Дифференцированный подход принят для марки по морозостойкости, которая должна назначаться на этапе проектирования в зависимости от климатического района строительства. Процесс подбора состава бетона по морозостойкости фактически является определенным этапом проектирования долговечности и представляет продолжительный, сложный и трудоемкий процесс, выполняемый специалистами-технологами высокого уровня,

поскольку до сих пор отсутствуют расчетные методы определения состава бетона для требуемой морозостойкости.

Предписывающий подход к проектированию долговечности бетонных конструкций для эксплуатации в агрессивных средах класса XF4 основан на том, что приемка конструкции должна выполняться по оценке соответствия показателям долговечности, т. е. по оценке морозостойкости бетона, полагая, что при обеспечении проектной морозостойкости бетона в конструкции срок ее службы будет составлять не менее 50 лет. Опыт строительства морских сооружений показывает, что на этапе проектирования важно установить реальные параметры морозного воздействия на бетон в конструкциях и механизм замораживания бетона в конструкции [2–5]. Исследование системы «материал – конструкция – среда» показывает, что в реальных условиях среда может принципиально изменять механизм замораживания и разрушения бетона [2, 6]. Возможность изменения влажностного состояния бетона в конструкции при длительном обледенении по причине термомассопереноса является принципиальным отличием от условий, в которых механизм замораживания обусловлен циклами замораживания и оттаивания. В зоне перемного уровня морских сооружений на Дальнем Востоке выделены два характерных участка конструкций, в которых принципиально отличаются механизмы замораживания бетона. На рис. 2 показаны условия эксплуатации бетона на этих участках.

Исходя из преобладающих факторов внешних воздействий наблюдаются следующие механизмы замораживания бетона P_F :

а) на участке прилива механизм замораживания P_{F1} определяют температура замораживания бетона в конструкции (t_F) и число циклов замораживания и оттаивания бетона (N_{FT}):



Рис. 1. Принципиальная схема этапов формирования показателей долговечности бетона для агрессивной среды класса XF4

Fig. 1. Schematic diagram of the stages of formation of concrete durability indicators for an aggressive environment of class XF4

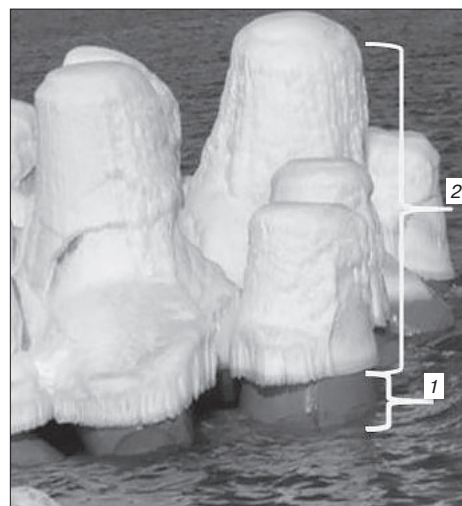


Рис. 2. Характерные условия эксплуатации бетона в конструкциях оградительных и причальных сооружений: 1 – участок прилива; 2 – участок всплеска волны

Fig. 2. Characteristic operating conditions for concrete in the structures of fencing and mooring structures: 1 – high tide area; 2 – wave burst section

$$P_{F1} = f(t_F, N_{FT}); \quad (1)$$

б) на участке всплеска волн механизм замораживания P_{F2} определяют температура замораживания бетона в конструкции (t_F) и продолжительность замораживания бетона (T_F):

$$P_{F2} = f(t_F, N_{FT}). \quad (2)$$

Анализ требований к показателям бетона для получения долговечных бетонов в агрессивных средах класса XF4 показывает, что в принципе они соответствуют требованиям, предъявляемым к бетону для обеспечения морозостойкости:

а) для обычного бетона:

$$F_2 = D_{БТ} = (В/Ц; Ц; T_{У.Т}); \quad (3)$$

б) для бетона с воздухововлекающими добавками:

$$F_2 = D_{БТ} = f(В/Ц; Ц; T_{У.Т}; V_{В.В}), \quad (4)$$

где F_2 – марка бетона по морозостойкости; $D_{БТ}$ – срок службы бетона; $В/Ц$ – водоцементное отношение; $Ц$ – содержание цемента; $V_{В.В}$ – воздуходо-держание; $T_{У.Т}$ – условия твердения.

Проектирование долговечности бетона с учетом реальных условий эксплуатации бетона в конструкциях, т. е. с учетом механизма замораживания, вызывает необходимость учитывать фактор водосодержания бетонной смеси. Традиционные подходы к исследованию стойкости бетона от циклов замораживания-оттаивания (ЗО) не позволяют объективно оценить роль водосодержания бетонной смеси при механизме замораживания вида P_{F2} . Экспериментально установлено, что существует критический расход воды в бетоне, после которого происходит резкое снижение морозостойкости. По мнению исследователей, этот показатель является более важным для морозостойкости, чем $В/Ц$ отношение [6, 7]. Опыт строительства показывает, что одна из причин часто наблюдаемого преждевременного разрушения бетона в агрессивных средах класса XF4 связана с применением бетонных смесей с повышенным водосодержанием [8, 9]. Поэтому при проектировании долговечности бетона для конструкций, в которых преобладает механизм замораживания вида P_{F2} , в предписывающих ограничениях, представленных на схеме рис. 1, целесообразно дополнительно в бетонной смеси ограничивать расход воды критическим значением $В_{КР}$. В этом случае выражение (4) будет иметь следующий вид:

$$D_{БТ} = f(В/Ц; В_{КР}; T_{У.Т}; V_{В.В}). \quad (5)$$

Критическое значение расхода воды ($В_{КР}$) необходимо устанавливать с учетом условий твердения бетона ($T_{У.Т}$). Принимая во внимание минимальные требования к составу бетона по показателям $В/Ц$ отношения и расхода цемента, которые предписаны ГОСТ 31384–2017 «Защита бетонных и железобетонных конструкций от коррозии. Общие технические требования», для обеспечения долговечности бетона

в агрессивных условиях класса XF4 расход воды в бетонной смеси должен быть на уровне 155–175 л/м³. Однако необходимо иметь в виду, что это рекомендовано для бетона с воздухововлекающими добавками, которые позволяют при низких расходах цемента повысить подвижность бетонной смеси по ОК в пределах 6–10 см. Данную подвижность бетонной смеси можно рассматривать в качестве косвенного показателя для ограничения расхода воды.

Рассматривая формирование долговечности бетона как процесс (рис. 1), следует отметить, что наиболее проблемным остается вопрос оценки соответствия бетона в конструкции требованиям долговечности, т. е. требованиям морозостойкости. Эффективность работы всех показателей, определяющих долговечность (5), зависит от условий твердения ($T_{У.Т}$) бетона к началу морозного воздействия. Это обусловлено тем, что условия твердения ($T_{У.Т}$) определяют степень гидратации цементного камня, которая определяет наиболее важный показатель структуры пор с точки зрения морозостойкости – вид системы капиллярных пор.

Анализ факторов, влияющих на стойкость бетона в условиях морозного воздействия, показывает, что при всем их многообразии с практической точки зрения одним из главных критических показателей долговечности являются условия для образования дискретной структуры капиллярных пор. Этот фактор является определяющим независимо от механизма замораживания бетона. Период перехода системы капиллярных пор от сквозной к дискретной предложено оценивать показателем критической зрелости структуры бетона с точки зрения морозостойкости [2, 10]. Однако в условиях длительного обледенения конструкций, когда преобладает механизм замораживания вида P_{F2} , не менее важно ограничивать содержание воды в бетонной смеси. Традиционно принято считать, что суровость морозного воздействия в реальных условиях определяет количество циклов ЗО, поэтому долговечность бетонных конструкций пытаются связать с циклами ЗО. При стандартных испытаниях на морозостойкость рассматривается система «материал – среда», в которой среда имеет нормированные параметры. Это позволяет за счет варьирования показателей материала оценивать стойкость бетона различных составов при стандартных условиях испытания. В системе «материал – конструкция – среда», т. е. в реальных условиях, среда может **принципиально изменить механизмы замораживания и разрушения бетона** [7]. Возможность изменения влажностного состояния бетона в конструкции при длительном обледенении по причине термомассопереноса является принципиальным отличием механизма разрушения при замораживании вида P_{F2} . В этом случае необходимо повышать уровень критической зрелости структуры бетона для снижения объема свободной воды, способной к влагопереносу при температурном градиенте, или ограничивать содержание воды в бетонной смеси.

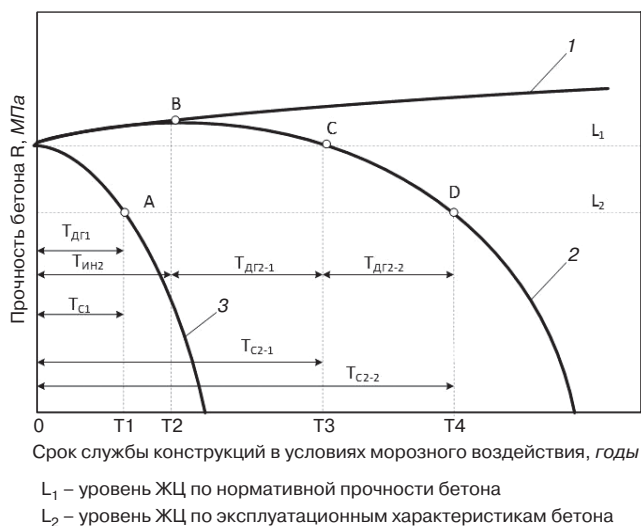


Рис. 3. Сценарии жизненного цикла бетона: 1 – наличие только периода инициации (ТИН); 2 – наличие периода инициации (ТИН) и деградации (ТДГ); 3 – наличие только периода деградации (ТДГ)

Fig. 3. Scenarios of the life cycle of concrete: 1 – the presence of only an initiation period (IIN); 2 – presence of initiation period (ТИН) and degradation period (ТДГ); 3 – presence of only a degradation period (ТДГ)

Опыт строительства морских портовых сооружений показывает, что для агрессивных сред класса XF4 можно получить долговечные бетоны, позволяющие обеспечить безремонтный срок службы конструкций не менее 100 лет [3, 11]. Для этого необходимо:

- к существующим ограничениям для проектирования долговечности бетона принять ограничение по максимальному содержанию воды в бетонной смеси;
- на этапе строительства в обязательном порядке делать оценку соответствия проектных требований по долговечности с использованием показателя, характеризующего структурную зрелость бетона к началу морозного воздействия.

В условиях морозного воздействия можно выделить характерные сценарии кинетики развития процессов в структуре бетона, которые характеризуют долговечность конструкций (рис. 3).

В концепции долговечности, предложенной автором [12], процесс морозной коррозии представлен как двухстадийный, в котором имеется стадия инициации (ТИН) и деградации (ТДГ). Несмотря на то что данная схема является лишь визуализацией периодов жизненного цикла бетона при эксплуатации конструкций, она позволяет определить направление для разработки модели прогноза долговечности. Обоснование продолжительности ЖЦ на этапе эксплуатации, который оценивается сроком службы конструкции, выполняется на этапе проектирования и может назначаться исходя из технических, финансовых, экологических и социальных условий.

Жизненный цикл (ЖЦ) бетона без ограничения срока эксплуатации визуально представлен в виде графика 1 на схеме рис. 3. В этом случае ЖЦ бетона не имеет ограничений, поскольку свойства бетона соответствуют условиям эксплуатации, т. е. бетон не имеет стадии деградации (ТДГ). Это является характеристикой долговечного бетона. В литературе есть

много высказываний об ограниченном сроке ЖЦ бетона в агрессивных средах класса XF4, т. е. ЖЦ бетона должен состоять из этапов ТИН+ТДГ, однако результаты проведенных исследования показывают, что это сценарий ЖЦ для недолговечного бетона. В реальных условиях кинетика прочности долговечного бетона должна иметь только возрастающий характер, т. е. не только сохранять прочностные показатели, но и увеличивать их [3]. Наличие у бетона в ЖЦ только стадии ТИН на протяжении 100 лет подтверждают результаты натурных исследований.

Выводы

Исследования морозостойкости бетона в реальных условиях эксплуатации и лабораторные испытания дают основания считать, что проблемы в разработке инженерных методов проектирования долговечности и ее прогнозировании при морозной коррозии бетона обусловлены отсутствием дифференциации двух периодов, принципиально разных по механизму разрушения: инициации (ТИН) и деградации (ТДГ). Предлагаемая методика, основанная на концепции двухстадийности коррозии бетона при морозном воздействии, позволяет дифференцированно оценивать каждый период в ЖЦ бетона. Назначение показателей долговечности с учетом реального механизма замораживания бетона на этапе проектирования и реализация их на этапе строительства к началу морозного воздействия позволяют в агрессивных условиях класса XF4 обеспечить безремонтный срок службы конструкций 100 лет.

Список литературы / References

1. Степанова В.Ф., Фаликман В.Р. Современные проблемы обеспечения долговечности железобетонных конструкций. *Бетон и железобетон – взгляд в будущее: Научные труды III Всероссийской (II Международной) конференции по бетону и железобетону: В 7 т.* М.: Изд-во НИУ МГСУ, 2014. Т. 3. С. 430–444.
1. Stepanova V.F., Falikman V.R. Advanced topics in assurance of reinforced concrete structural durability. *Concrete and reinforced concrete – a look into the future: Scientific papers of the III All-Russian (II International) Conference on Concrete and Reinforced Concrete in 7 vols.* Moscow, 2014. Vol. 3, pp. 430–444. (In Russian).
2. Malyuk V.V., Malyuk V.D. Freezing mechanisms of the concrete in an area of variable water level of port facilities. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science.* 2022. Vol. 988. Chapter 4. 052020. DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/1755-1315/988/5/052020>
3. Малюк В.В., Малюк В.Д., Леонович С.Н. Анализ результатов обследования железобетонных конструкций портовых сооружений (о. Сахалин, 1927–2018 гг.) // *Бетон и железобетон.* 2022. № 1 (609). С. 3–9. DOI: <https://doi.org/10.31659/0005-9889-2022-609-1-3-9>

3. Malyuk V.V., Malyuk V.D., Leonovich S.N. Analysis of the results of the survey of reinforced concrete structures of port facilities (Sakhalin Island 1927–2018). *Beton i zhelezobeton*. 2022. No. 1 (609), pp. 3–9. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0005-9889-2022-609-1-3-9>
4. Malyuk V.V., Malyuk V.D., Lobodyuk A.V. Operating conditions and damage to the concrete of port facilities on the southern coast of Sakhalin. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2022. Chapter 4. 052035. DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/1755-1315/988/5/052035>
5. Malyuk V.V. Climatic conditions and experience of operation of port facilities on Sakhalin Island. *Civil Engineering Research Journal*. 2020. Vol. 10. Iss. 5. 555797. DOI: <http://dx.doi.org/10.19080/CERJ.2020.10.555797>
6. Чернышов Е.М. Морозная деструкция бетонов. Ч. 1. Механизм, критериальные условия управления // *Строительные материалы*. 2017. № 9. С. 40–46.
6. Chernyshov E.M. Frost destruction of concretes. Part 1. Mechanism, criterial conditions of control. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2017. No. 9, pp. 40–46. (In Russian).
7. Шестоперов С.В. Долговечность бетона транспортных сооружений. М.: Транспорт, 1966. 500 с.
7. Shestoperov S.V. Dolgovechnost' betona transportnykh sooruzheniy. [Durability of concrete for transport structures]. Moscow: Transport. 1966. 500 p.
8. Malyuk V.V. Degradation and sudden failure of concrete structures of marine hydraulic structures in severe hydrometeorological conditions. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018. Vol. 463. Iss. 2. 022071. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/463/2/022071>
9. Ваврениук С.В., Ефименко Ю.В., Ваврениук В.Г., Фарафонов А.Э. Результаты исследования причин разрушения бетонного покрытия морского пирса на побережье Японского моря // *Строительные материалы*. 2019. № 11. С. 37–41. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-776-11-37-41>
9. Vavreniuk S.V., Efimenko Yu.V., Vavreniuk V.G., Farafonov A.E. Results of the study of the causes of destruction of concrete pavement of a sea pier on the coast of the Sea of Japan. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2019. No. 11, pp. 37–41. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-776-11-37-41>
10. Малюк В.В. Прогнозирование долговечности конструкций морских гидротехнических сооружений из бетона по опыту строительства и эксплуатации в суровых климатических условиях. *Проблемы и перспективы развития строительства, теплогазоснабжения и энергообеспечения: Материалы VIII Национальной конференции с международным участием*. Саратов, 2018. С. 223–231.
10. Malyuk V.V. Forecasting the durability of structures of marine hydraulic structures made of concrete based on the experience of construction and operation in harsh climatic conditions. *Problems and prospects of development of construction, heat and gas supply and energy supply: Materials of the VIII National Conference with international participation*. Saratov. 2018, pp. 223–231. (In Russian).
11. Малюк В.В., Малюк В.Д., Леонович С.Н. Совершенствование методов проектирования и технологии бетонных работ (на примере о. Сахалин) // *Бетон и железобетон*. 2022. № 2 (610). С. 30–34. DOI: <https://doi.org/10.31659/0005-9889-2022-610-2-30-34>
11. Malyuk V.V., Malyuk V.D., Leonovich S.N. Improvement of design methods and technology of concrete works (on the example of Sakhalin island). *Beton i zhelezobeton*. 2022. No. 2 (610), pp. 30–34. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0005-9889-2022-610-2-30-34>
12. Малюк В.В. Концепция долговечности бетона для прогноза срока службы конструкций в условиях морозного воздействия // *Вестник инженерной школы ДВФУ*. 2020. № 4 (45). С. 105–115. DOI: <http://dx.doi.org/10.24866/2227-6858/2020-4-11>
12. Malyuk V.V. Concrete durability concept for predicting the service life of structures under frost conditions influences. *Vestnik of the FEFU Engineering School*. 2020. No. 4 (45), pp. 105–115. (In Russian). DOI: <http://dx.doi.org/10.24866/2227-6858/2020-4-11>

**Как живет и трудится редакция издательства «Стройматериалы»,
как делаются наши журналы,
что нового и интересного в отрасли — расскажем и покажем!**

Объединение профессионалов гарантирует успех!

Оставайтесь с нами!

Присоединяйтесь к нашему Телеграм-каналу:

https://t.me/journal_cm



InterConPan-2023 в Новосибирске: интеграция научных исследований и технических инноваций в индустриальное домостроение

InterConPan-2023 in Novosibirsk: Integration of Scientific Research and Technical Innovations into Industrial Housing Construction

Более 150 специалистов строительно-инвестиционных компаний, домостроительных предприятий и проектных организаций, представители машиностроительных и инженеринговых компаний, поставщики программного обеспечения, ученые вузов и научно-исследовательских институтов из 30 регионов Российской Федерации и Республики Беларусь приняли участие в XIII Международной научно-практической конференции «InterConPan-2023: инновации для индустриального домостроения», которая прошла в Новосибирске. Организаторы мероприятия – АО «ЦНИИЭП жилища» (Москва) и объединенная редакция журналов «Строительные материалы»® и «Жилищное строительство» (Москва) при поддержке Комитета Торгово-промышленной палаты РФ по предпринимательству в сфере строительства и Новосибирского архитектурно-строительного университета НГАСУ (СибСТРИН). Генеральным спонсором мероприятия выступила компания РЕКОН-СМК (Республика Чувашия). Постоянный партнер конференции – ООО «Петро Билдинг Системс» (Санкт-Петербург). Партнерами стали ООО «ШНЕЛЛ РУС» (Москва), Центр машиностроения и металлообработки РОДЕН (Новосибирск), ООО «Карачинский источник» (Новосибирск).

More than 150 specialists from construction and investment companies, house-building enterprises and design organizations, representatives of mechanical engineering and engineering companies, software suppliers, scientists from universities and research institutes from 30 regions of the Russian Federation and the Republic of Belarus took part in the XIII International Scientific and Practical Conference «InterConPan-2023: innovations for industrial housing construction», which took place in May 2023 in Novosibirsk. The organizers of the event are JSC «TsNIIEP Dwellings» (Moscow) and the joint editorial staff of the magazines «Building Materials»® and «Housing Construction» (Moscow) with the support of the Committee of the Chamber of Commerce and Industry of the Russian Federation on Entrepreneurship in the Construction Sphere and the Novosibirsk University of Architecture and Civil Engineering NGASU (Sibstrin). The general sponsor of the event was the RECON-SMK company (Republic of Chuvashia). The regular partner of the conference is Petro Building Systems LLC (St. Petersburg). The partners were SCHNELL RUS LLC (Moscow), RODEN Center for Mechanical Engineering and Metalworking (Novosibirsk), Karachinsky Istochnik LLC (Novosibirsk).

Обеспечение индустриального и модульного железобетонного строительства современной законодательной и нормативно-технической базой, которая будет способствовать массовому применению индустриальных технологий, является одной из важнейших задач.

Участники конференции обсудили ключевые вопросы отрасли: развитие отечественных технологий для индустриального строительства, их своевременное и эффективное применение; особенности внедрения цифровых технологий в проектирование, производство и строительство; современное типовое проектирование жилья и объектов социальной инфраструктуры; нормативно-технические документы в области индустриального домостроения и использования модульных зданий и сооружений, а также вопросы упрощения нормативного правового регулирования строительства зданий с применением модульных технологий.

Известны преимущества индустриального домостроения – снижение затрат и сроков возведения домов, повышение качества и темпов строительства, прозрачность всех процессов и достигаемых результатов. Задачу строительства 120 млн м² жилья к 2030 г. можно решить только при масштабном индустриальном и модульном домостроении с использованием префабтехнологий.





Об обеспечении индустриального и модульного строительства современной законодательной и нормативно-технической базой, о возможности строительства заводов по производству модулей, которых в России очень мало, о возможности финансирования строительства заводов, производящих модульные конструкции по всей территории России, исходя из планов регионов по строительству жилья говорили участники конференции. С докладом выступил **А.В. Копытин**, директор Федерального центра нормирования и стандартизации Минстроя России. Ректор Новосибирского архитектурно-строительного университета **Ю.Л. Сколубович** обратил внимание на вопросы подготовки специалистов для строительства. Доклады, посвященные эффективности применения нанодобавок для повышения качества и эксплуатационной надежности зданий, представили д-р техн. наук, проф. **А.П. Пичугин** и д-р техн. наук, проф. **В.Ф. Хританков** (Новосибирский государственный аграрный университет). О повышении прочностных характеристик цементных конгломератов добавками направленного действия рассказала д-р техн. наук, проф. НГАСУ **Л.В. Ильина**.



Индустриальное домостроение в настоящее время переживает новый этап совершенствования: необходимо не только не снижать темпы производства и строительства, но и наращивать их. Для этого необходимо наличие комплекса типовых решений и проектов как для строительства в обычных условиях, так и в чрезвычайных ситуациях; обеспечение заводов индустриального железобетонного строительства современным отечественным оборудованием. С докладами о комплексном предоставлении услуг выступили представители проектных, инжиниринговых и машиностроительных компаний.





Участники InterConPan-2023 в рамках первой выездной сессии посетили ООО «Завод «Первомайский», где установлено современное оборудование ГК «Рекон-СМК» (Чебоксары). Важной характеристикой универсальных стандов ГК «Рекон-СМК» является максимально возможное использование имеющихся производственных мощностей за счет быстрой переналадки под требования рынка, что способствует повышению производительности труда и снижению себестоимости ж/б изделий. После переналадки на том же оборудовании можно выпускать дорожные предварительно напряженные пазогребневые плиты, сваи, плиты наружных и внутренних стен, практически всю номенклатуру железобетонных изделий.

Центр машиностроения и металлообработки «Роден» – машиностроительное предприятие, выпускающее оборудование для комплексного оснащения арматурных цехов заводов ЖБИ и КПД. Одной из ключевых особенностей выпускаемого оборудования является высокий уровень автоматизации и производительности, сопоставимый с ведущими мировыми производителями.

Предприятие оснащено парком современного оборудования с числовым программным управлением для металлообработки, что позволяет максимально локализовать производственные процессы предприятия и обеспечить высокий уровень качества изделий. Собственное конструкторское бюро эффективно решает задачи по разработке и оперативному внедрению передовых технических решений в выпускаемую продукцию.

Застройка ЖК «Весенний» началась в 2005 г. В 2008 г. был сдан первый жилой дом. В 2018 г. построена школа на 1250 учащихся. В 2020 г. открылся второй корпус детского сада. Район отражает тенденции в индустриальном домостроении за прошедшие пятнадцать лет.





Вторая выездная сессия на уникальное производство компании «Брусника. Сибкадемстрой», которое является одним из примеров современной организации строительства. Технология предполагает возведение строительного городка закрытого типа, благодаря которому пыльные и шумные процессы локализованы внутри помещений. Предприятие, производящее индустриальные железобетонные домокомплекты, оснащено оборудованием российских производителей, например кассеты компании ООО «Петро Билдинг Системс» (Санкт-Петербург). Все здания и сооружения временные и будут использоваться только на период строительства. После окончания строительства жилого района мобильный строительный городок будет разобран и перевезен на другую площадку.

Здание цеха имеет закрытый цикл водоотведения. На стоках установлены фильтры с повторной рециркуляцией и системой многоступенчатой очистки воды. Работу производства

обеспечивает собственная газовая котельная. На территории строительного городка установлены солнечные батареи, которые компенсируют 60–70% потребляемой электроэнергии. Известно, что цех в Новосибирске – пилотный проект. После отработки технология будет масштабирована на города присутствия «Брусники». Следующей точкой второй выездной сессии стал район «Пшеница», застраиваемый компанией «Брусника». В основу проекта заложено три принципа. Первый – разнообразие и плотность; создание среды, где человек в шаговой доступности мог бы получить любой сервис. Второй принцип – сохранение истории места, уважение к идеям первых архитекторов ВАСХНИЛ и локальной идентичности. Третий принцип – связанность. Район постепенно станет единым целым за счет организации плотной сети вело- и пешеходных маршрутов, формирования разнородных общественных пространств.





ООО ЗКПД «Арматон» – цель третьей выездной сессии InterConPan-2023. Это завод, имеющий современное технологическое оснащение. На заводе изготавливается инновационная для Сибирского региона продукция с высоким уровнем качества. Максимальная производственная мощность 300 тыс. м² готового жилья в год. Общая площадь – 12 га. Персонал завода – 300 человек. Запуск ЗКПД «Арматон», входящий в ГК «Первый строительный фонд», состоялся в 2017 г. Тогда собственники выбрали европейское оборудование зарубежных компаний, представители которых, по известным субъективным причинам, не смогли приехать на конференцию. Завод может выпускать продукцию для строительства порядка 300 тыс. м² жилья в год, как высотного в 14–15 этажей, так и индивидуального малоэтажного. Продукция завода – стеновые панели трехслойные и однослойные, пустотные плиты перекрытия, широкий спектр ЖБИ разных форм и размеров.

Возможность посетить легендарный Академгородок под Новосибирском – главный наукоград страны – для многих участников конференции InterConPan-2023 уникальна. Знаменательно, что посещение Академгородка совпало с днем его рождения: 18 мая 1957 г. Совмин СССР постановил организовать в Новосибирске Сибирское отделение АН СССР для усиления научных исследований в области физико-технических, естественных и экономических наук и быстрого развития производительных сил Сибири и Дальнего Востока. Коллеги посетили Дом ученых в Точке кипения, на 13-м этаже Академпарка, представляющего собой две башни, расположенные по разным сторонам ул. Николаева и соединенные между собой переходом-галереей. Оттуда Академгородок виден с как на ладони. Мы прогулялись по первым лесным улицам, увидели скромные домики академиков, которые по тем временам казались почти дворцами.





Основные проблемы современного индустриального железобетонного строительства – обеспечение производства импортозамещающим оборудованием, запасными частями и программным обеспечением. Известно, что введенные санкции стали стимулом для российского машиностроительного бизнеса, а также для компаний, занимающихся разработкой и технической поддержкой программных продуктов автоматизированных систем. Совершенствование наукоемких технологий, интеграция в сфере научных исследований и технических разработок – вот основные задачи, которые стоят

перед участниками конференции InterConPan. В 2023 г. эти проблемы прозвучали во многих выступлениях. В научно-технических журналах «Строительные материалы» и «Жилищное строительство» публикуются материалы и статьи ведущих специалистов, обладающих инновационными научными, инженеринговыми, проектными компетенциями для системного решения проблем с минимизацией экономических и технических рисков. Профессиональное сообщество, сформировавшееся за годы проведения конференции, принимает вызовы времени!



***Объединение профессионалов гарантирует успех!
Оставайтесь с нами! Ждем встречи в 2024 году!***

УДК 691.328

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-818-10-15-24>

С.С. КАПРИЕЛОВ, д-р техн. наук, академик РААСН (kapriellov@mail.ru),
А.В. ШЕЙНФЕЛЬД, д-р техн. наук, советник РААСН, С.И. ИВАНОВ, канд. техн. наук

Научно-исследовательский проектно-конструкторский институт бетона и железобетона им. А.А. Гвоздева
АО «Научно-исследовательский центр «Строительство» (109428, г. Москва, ул. 2-я Институтская, 6, корп. 5)

Опыт бетонирования массивной густоармированной конструкции с обеспечением термической трещиностойкости

Представлены основные принципы технологии производства бетонных работ в зимний период при возведении массивной густоармированной конструкции распределительной балки-плиты. Реализация технологии обеспечила проектные характеристики бетона и термическую трещиностойкость конструкции. Объем конструкции – 730 м³, проектный класс бетона – В50, расход арматуры – 741 кг/м³. Особенности технологии являлись: применение модифицированной малоцементной самоуплотняющейся бетонной смеси с низким экзотермическим потенциалом (расход цемента не более 350 кг/м³) и пониженной температурой (5–15°C); обеспечение беспрепятственного теплообмена конструкции с окружающей средой в период интенсивного тепловыделения бетона до достижения максимального значения температуры в средней зоне конструкции; регулирование скорости охлаждения конструкции после достижения максимальной температуры в средней зоне конструкции с помощью выдерживания в шатрах и использования теплоизоляционных материалов. Учитывая специфику конструкции балки-плиты, задаваемые по аналогии с массивными фундаментами, температурно-временные параметры технологии оптимизировали на основании результатов расчета термонапряженного состояния данной конструкции с помощью ПО «Atena». Фактические значения прочности бетона и температурных параметров выдерживания распределительной балки-плиты полностью соответствовали расчетным и регламентированным требованиям: фактическая средняя прочность бетона при сжатии составила 61,3 МПа, соответствовала фактическому классу В_ф57 и превышала требования проекта (В50); максимальная температура бетона в ядре конструкции не превышала 61°C; разность температуры между смежными высотными уровнями, а также между поверхностью конструкции и окружающей средой не превышала 20°C; средняя скорость остывания конструкции не превышала 3°C/сут. В результате обследования и дефектоскопии конструкции трещин термического происхождения не выявлено. Сходимость расчетных и фактических значений основных температурных характеристик распределительной балки-плиты показывает необходимость обоснования технологических параметров бетонирования сложных массивных конструкций расчетно-эмпирическим путем с учетом особенностей конструкции, условий производства работ, составов и свойств бетонных смесей, кинетики гидратации цемента и тепловыделения бетона, а также теплопроводности бетона на начальном этапе твердения при расчете ее термонапряженного состояния.

Ключевые слова: густоармированные конструкции, массивные конструкции, тепловыделение бетона, термическая трещиностойкость, выдерживание бетона, скорость охлаждения, самоуплотняющийся бетон, малоцементный бетон, термонапряженное состояние.

Для цитирования: Каприелов С.С., Шейнфельд А.В., Иванов С.И. Опыт бетонирования массивной густоармированной конструкции с обеспечением термической трещиностойкости // *Строительные материалы*. 2023. № 10. С. 15–24.

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-818-10-15-24>

S.S. KAPRIELOV, Doctor of Sciences (Engineering), Academician of the RAACS (kapriellov@mail.ru),

A.V. SHEYNFELD, Doctor of Sciences (Engineering), RAASN Advisor (sheynfeld@masterbeton-mb.ru), S.I. IVANOV, Candidate of Sciences (Engineering)

Scientific Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete named after A.A. Gvozdev JSC "Research Center of Construction"
(6, bldg. 5, 2nd Institutskaya Street, Moscow 109428, Russian Federation)

The Experience of Concreting a Massive Dense-Reinforced Structure with the Provision of Thermal Crack Resistance

The basic principles of the technology for the production of concrete work in the winter during the construction of a massive densely reinforced structure of a distribution beam-slab are presented. The implementation of the technology provided the design characteristics of concrete and thermal crack resistance of the structure. The volume of the structure is 730 m³, the design class of concrete is B50, the reinforcement consumption is 741 kg/m³. The features of the technology were: the use of a modified low-cement self-compacting concrete mixture with low exothermic potential (cement consumption not more than 350 kg/m³) and low temperature (+5–15°C); ensuring unimpeded heat exchange of the structure with the environment during the period of intense heat release of concrete until the maximum temperature in the middle zone of the structure is reached; regulation of the rate of cooling of the structure after reaching the maximum temperature in the middle zone of the structure by holding in tents and using thermal insulation materials. Taking into account the specifics of the design of the beam-slab, set by analogy with massive foundations, the temperature-time parameters of the technology were optimized based on the results of calculating the thermal stress state of this structure using the «Atena» program. The actual values of the concrete strength and the temperature parameters of keeping the distribution beam-slab fully complied with the calculated and regulated requirements: the actual average compressive strength of concrete was 61.3 MPa, corresponded to the actual class B_f57 and exceeded the requirements of the project (B50); the maximum temperature of concrete in the core of the structure did not exceed 61°C; the temperature difference between adjacent height levels, as well as between the surface of the structure and the environment, did not exceed 20°C; the average cooling rate of the structure did not exceed 3°C/day. As a result of inspection and flaw detection of the structure, thermal cracks were not revealed. The convergence of the calculated and actual values of the main temperature characteristics of the distribution beam-slab shows the need to substantiate the technological parameters of concreting complex massive structures by the calculated-empirical way taking into account: the design features, working conditions, compositions and properties of concrete mixtures, the kinetics of cement hydration and heat release of concrete, as well as thermal conductivity of concrete at the initial stage of hardening, when calculating its thermally stressed state.

Keywords: heavily reinforced structures, massive structures, heat release of concrete, thermal crack resistance, curing of concrete, cooling rate, self-compacting concrete, low-cement concrete, thermal strain state.

For citation: Kapriellov S.S., Sheynfeld A.V., Ivanov S.I. The experience of concreting a massive dense-reinforced structure with the provision of thermal crack resistance. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2023. No. 10, pp. 15–24. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-818-10-15-24>

Технология возведения массивных конструкций должна обеспечивать наряду с проектными параметрами и их термическую трещиностойкость в начальный период после бетонирования с учетом разных факторов, среди которых характер армирования, объем непрерывной укладки бетонной смеси, температурно-временные параметры производства работ и др. [1–10]. Обоснованные расчетно-эмпирическим путем температурно-временные и рецептурные параметры технологии бетонирования фундаментных плит, при которых обеспечивается термическая трещиностойкость массивных конструкций, на примере опыта возведения фундаментных плит высотных комплексов на ММДЦ «Москва-Сити» из бетона классов В40–В60, объемом 4,4–14,2 тыс. м³ и с удельным расходом арматуры 128–336 кг/м³ приведены в публикации [11].

Задача значительно усложняется, если массивная конструкция представляет собой балку и является элементом пространственной статически неопределимой системы, имеет густое армирование, препятствующее виброуплотнению смеси, и высокий проектный класс бетона. В этом случае при бетонировании необходимо использование самоуплотняющихся бетонных смесей с высоким расходом вяжущего [12], что, в свою очередь, может привести к повышенному тепловыделению при твердении бетона и при неуправляемом охлаждении конструкции к термическим растягивающим напряжениям и образованию трещин.

Решение этой задачи было осуществлено специалистами НИИЖБ им. А.А. Гвоздева при возведении массивной густоармированной распределительной балки-плиты при строительстве жилого комплекса «Сидней Сити» в г. Москве.

Целью выполненной работы являлись разработка технологии бетонирования массивной густоармированной конструкции и оценка сходимости расчетных и фактических температурно-временных параметров, влияющих на термическую трещиностойкость конструкции.

Особенности конструкции

Монолитная железобетонная распределительная балка-плита предназначена для перераспределения нагрузки на вертикальные конструкции, расположенные несоосно на соседних этажах высотного здания. Распределительная балка-плита представляет в плане полый овал размерами 29,1×37,7 м, шириной около 3,5 м и толщиной 2,2 и 2,5 м, расположена в осях 1.2-11.2/А.2-К.2 на 12 вертикальных пилонах. Распределительная балка-плита, согласно проекту, имеет деформационные и рабочие швы бетонирования в местах соединения с горизонтальными конструкциями перекрытий. Общий объем бетона в конструкции 730 м³. Проектные характеристики бетона: класс по прочности при сжатии В50, марка по морозостойкости F₁150 и марка по водонепроницаемости W8.

План и сечения распределительной балки-плиты приведены на рис. 1.

Основное горизонтальное армирование распределительной балки-плиты состоит по краям конструкции из 14 рядов, а в центре из 8 рядов (4 – в нижней зоне и 4 – в верхней зоне) спаренной арматуры класса А500С диаметром 40 мм, которая устанавливается на поперечные сварные каркасы, выполненные из арматуры класса А500С диаметром от 20 до 36 мм. Соединение арматуры диаметром 40 мм осуществляется с помощью позиционных муфт «Акстэм». Удельный расход арматуры в конструкции составляет 741 кг/м³. Защитный слой бетона для нижнего и верхнего рядов горизонтальной арматуры составляет 80 и 90 мм соответственно. Армирование конструкции распределительной балки-плиты представлено на рис. 2.

Особенности технологии

Технология бетонирования массивной густоармированной конструкции распределительной балки-плиты должна решать две взаимосвязанные задачи:

- обеспечить высокую скорость укладки бетонной смеси в густоармированную конструкцию и проектные характеристики бетона в возрасте 56 сут;
- обеспечить термическую трещиностойкость массивной конструкции при перепадах и градиентах температуры, вызванных экзотермией бетона.

При разработке технологии бетонных работ, согласно [11], были определены основные исходные условия и ограничения:

- среднесуточная температура окружающей среды, при которой предполагалось вести работы, находится в диапазоне от 0 до -15°C;
- объем бетона класса В50 в конструкции составляет 730 м³;
- расход арматуры в конструкции составляет 741 кг/м³;
- модуль поверхности составляет 1,48 м⁻¹, что, согласно СП 63.13330.2018, относит ее к категории массивных конструкций;
- максимальная температура бетона в забетонированной конструкции не должна превышать +70°C;
- скорость остывания конструкции в процессе выдерживания не должна превышать 3°C/сут;
- разность температуры бетона в разных зонах массива конструкции, так же как между поверхностной зоной и окружающей средой, не должна превышать 20°C.

Обеспечение проектных требований к бетону и термической трещиностойкости конструкции распределительной балки-плиты осуществлялось за счет:

- применения самоуплотняющейся бетонной смеси на основе органоминерального модификатора марки МБ 2-50С [5, 7, 11, 12];
- снижения энергетического (температурного) потенциала бетона в целях уменьшения его экзотермии и усадки за счет использования бетонной смеси с минимизированным для проектного класса бетона В50 расходом цемента (не более 350 кг/м³) и температурой (5–15°C) [11, 12];

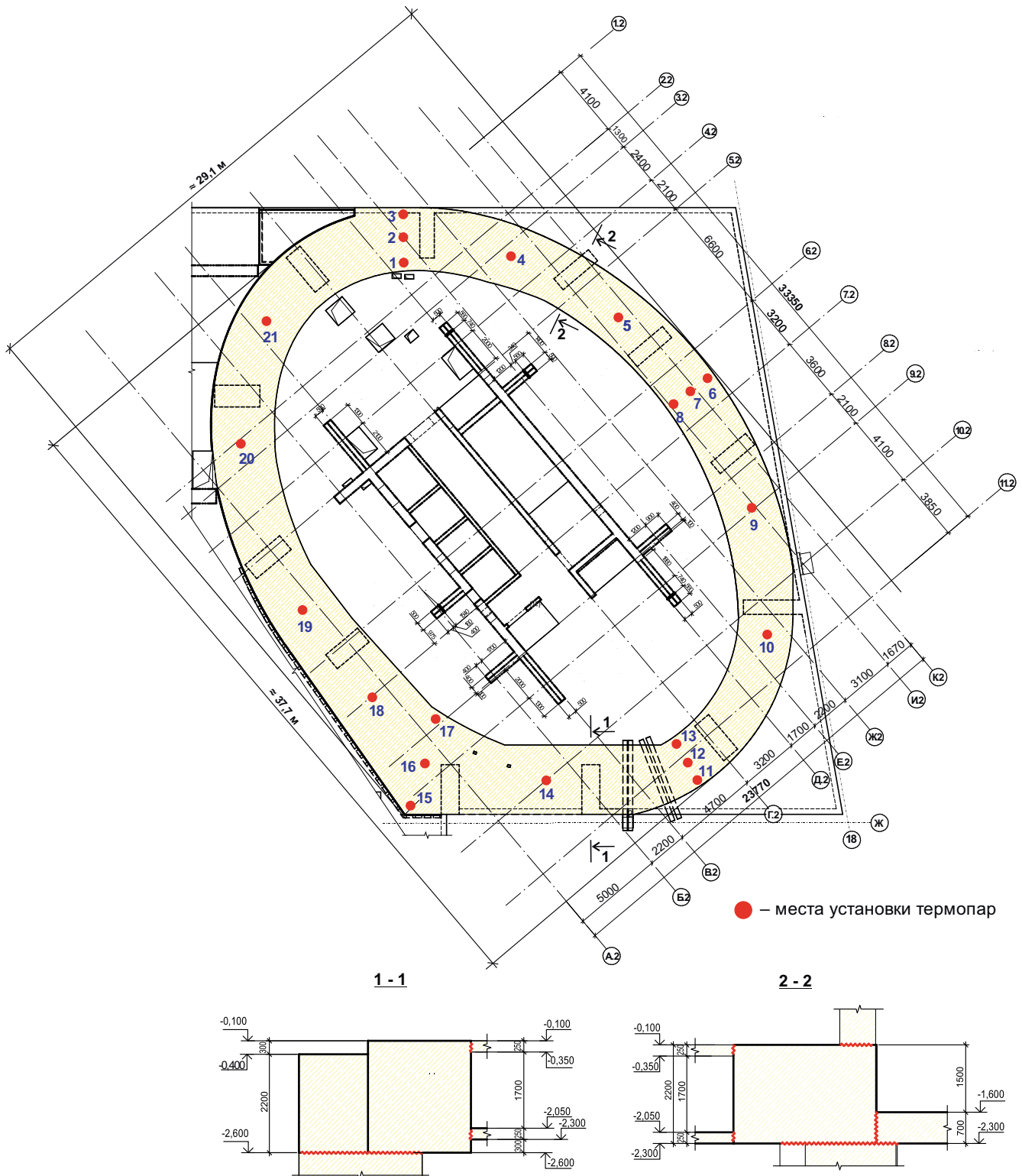


Рис. 1. План и сечения распределительной балки-плиты
 Fig. 1. Plan and section of the distribution beam-slab

— обеспечения заданного температурно-влажностного режима выдерживания бетона в конструкции, принятого с учетом опытных эмпирических данных [11, 13, 14], уточненных расчетом ее термонапряженного состояния.

Особенности расчета

Задачей расчета термонапряженного состояния являлось выявление зон конструкции, в которых при соблюдении заданных рецептурных и температурно-временных факторов могли возникнуть запредель-

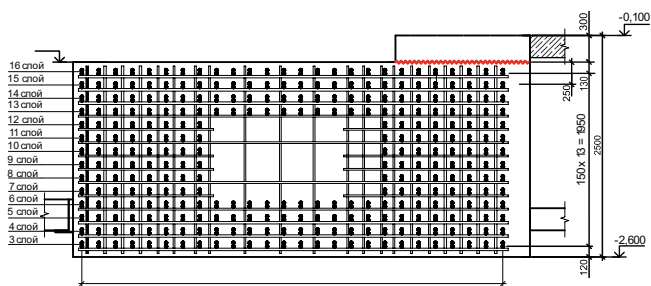


Рис. 2. Армирование распределительной балки-плиты
Fig. 2. Reinforcement of distribution beam-slab

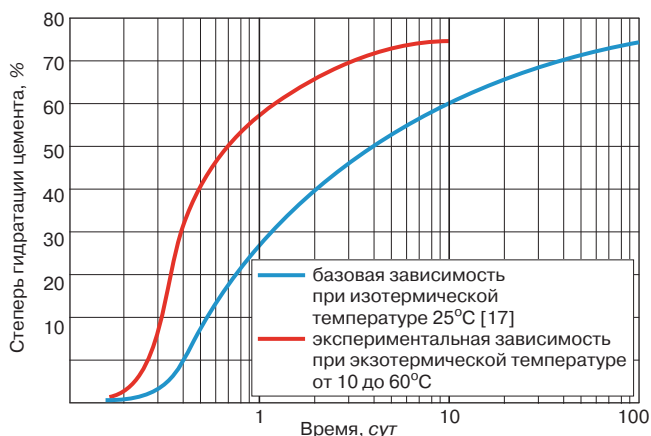


Рис. 3. Кинетика степени гидратации цемента при различных режимах твердения
Fig. 3. Kinetics of the degree of cement hydration under different hardening modes

ные для бетона напряжения, приводящие к образованию трещин. Расчет термонапряженного состояния распределительной балки-плиты выполнялся по применяемой в НИИЖБ им. А.А. Гвоздева методике [15] с учетом положений рекомендаций [16] и возможностей современных программных комплексов, реализующих метод конечных элементов. Расчет выполнялся с помощью ПО «Атена» [17] в два этапа: сначала определялась кинетика изменения температуры конструкции вследствие экзотермии бетона, а затем на основании полученных данных выполнялся расчет напряжений в бетоне на ранних стадиях твердения.

На первом этапе решалась нестационарная задача теплопроводности, в результате которой определялась кинетика изменения температуры по сечению и объему конструкции. При этом с учетом особенностей состава и характеристик бетонной смеси, а также насыщенности конструкции арматурой теплоемкость, теплопроводность и объемная масса бетона принимались постоянными для всех временных интервалов.

По результатам опубликованных исследований [4, 18, 19] установлено, что использование усредненных справочных данных по тепловыделению приводит к отличию фактического распределения температуры от рассчитанного до 10%, а использование фактических данных по тепловыделению позволяет снизить отличие фактического распределения температуры от рассчитанного до 3%. Поэтому для повышения точности расчетов термонапряженного состояния конструкции использовались следующие ключевые положения:

- фактическое тепловыделение бетонной смеси с учетом модифицирующих и пластифицирующих добавок принималось по результатам ранее проведенных исследований [4], в которых кинетика и интенсивность тепловыделения определялись по образцам, моделирующим растворную часть бетонной смеси, с применением дифференциального колориметра;
- применение органоминеральных модификаторов типа МБ изменяет кинетику тепловыделения бетона и сдвигает временной интервал достижения максимума температуры бетона в конструкции до 40 ч после бетонирования [13], что позволяет существенно сгладить пиковую температурную нагрузку, растянув ее во времени;
- при экзотермическом процессе твердения в соответствии с рекомендациями [16] и с учетом результатов исследований [20] учитывалось повышение интенсивности степени гидратации цемента (рис. 3) и соответственно тепловыделения бетона средствами программы «Атена»;
- при определении теплоемкости и теплопроводности бетона учитывалось фактическое армирование конструкции.

По результатам расчета на первом этапе определялась кинетика изменения температуры по сечению и длине балки-плиты, а также разность температуры между ядром и поверхностью конструкции в зависимости от граничных условий, времени твердения бетона и различных вариантов ухода за бетоном. На основании полученных расчетных данных выбирался наиболее оптимальный режим выдерживания бетона распределительной балки-плиты, позволяющий достигать минимальных значений и скорости изменения температуры в ядре конструкции, основные положения которого заключались в следующем: выдерживание конструкции в возрасте до 14 сут осуществляется в шатре с температурой воздуха 10–15°C, после снятия которого конструкция укрывается рулонным теплоизоляционным материалом «Этафом»

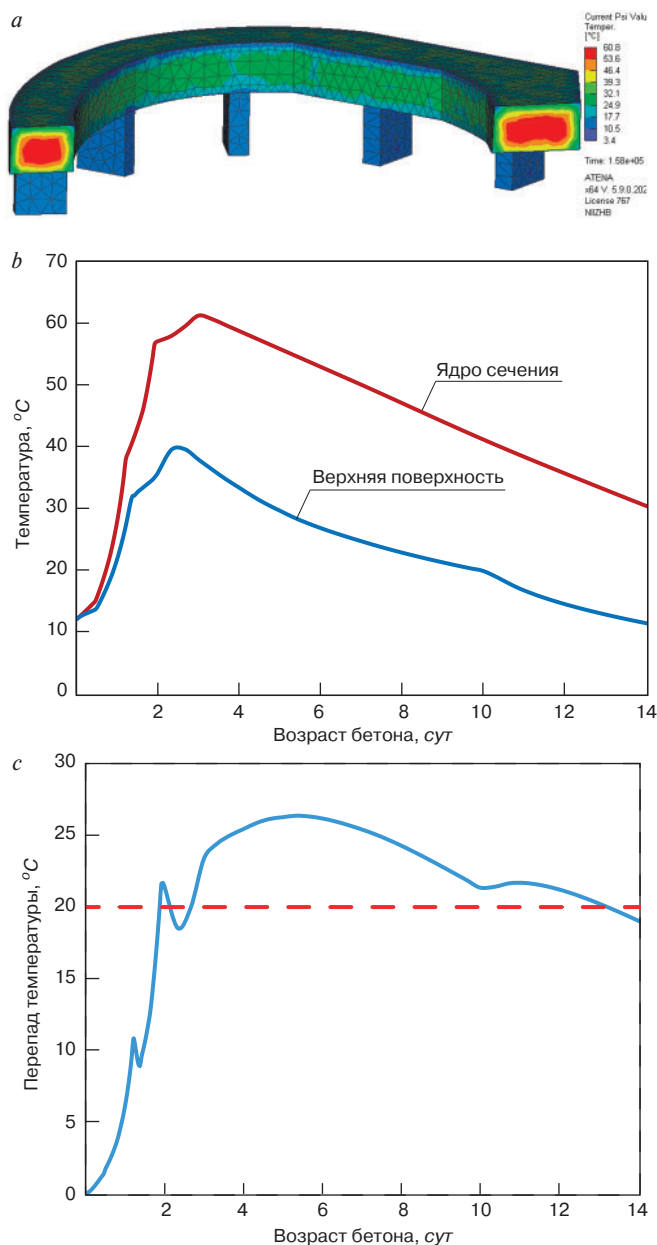


Рис. 4. Расчетное распределение температуры в период наибольшего разогрева модели (а), кинетика изменения температуры в ядре и на верхней поверхности (б) и разница температуры между ядром и поверхностью (с) в наиболее характерном поперечном сечении

Fig. 4. Estimated temperature distribution during the period of maximum heating of the model (a), kinetics of temperature change in the core and on the upper surface (b) and temperature difference between the core and the surface (c) in the most typical cross section

толщиной 10 мм с термическим сопротивлением $0,2-0,25 \text{ м}^2\text{°C/Вт}$ для обеспечения охлаждения массива конструкции со скоростью не выше 3°C/сут .

На рис. 4 представлены расчетные температурные параметры твердения бетона распределительной балки-плиты для наиболее оптимального режима ухода за конструкцией в возрасте до 14 сут после бетонирования.

Из данных, представленных на рис. 4, следует, что полученные расчетные температурные параметры твердения бетона в распределительной балке-плите для наиболее оптимального режима ухода за кон-

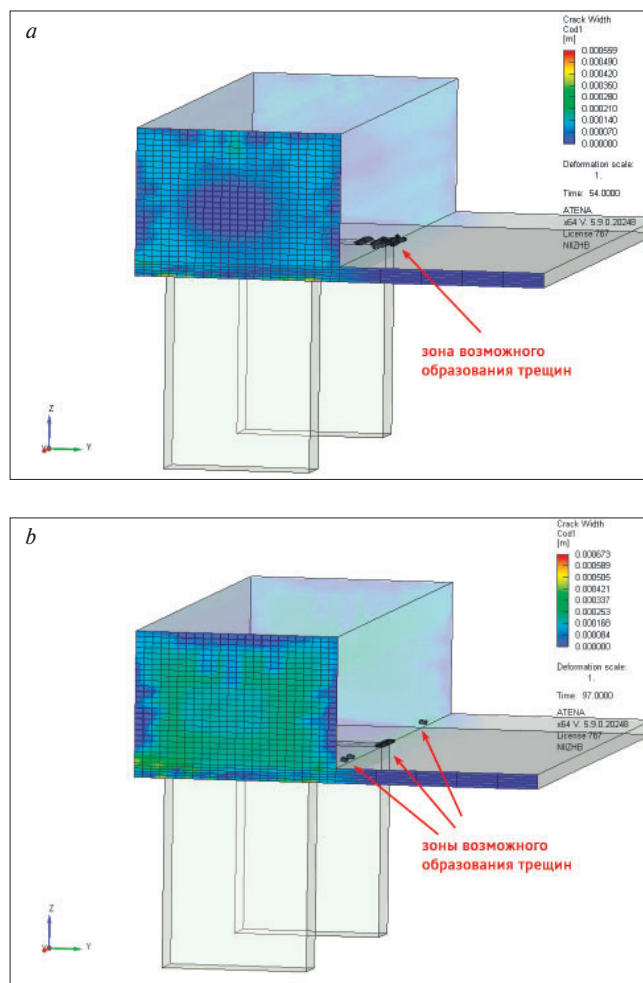


Рис. 5. Изополя участков потенциального образования трещин и ширины их раскрытия в возрасте 3 (а) и 14 (б) сут после бетонирования

Fig. 5. Isofields of areas of potential formation of cracks and the width of their opening at the age of 3 (a) and 14 (b) days after concreting

струкцией в целом соответствуют принятым исходным ограничениям и составляют:

- максимальная температура в ядре конструкции (на третьи сутки) 60°C ;
- максимальная температура на поверхности конструкции (на третьи сутки) 40°C ;
- скорость остывания конструкции в процессе выдерживания $2,7^\circ\text{C/сут}$;
- разность температуры бетона в разных зонах массива конструкции не превышает 26°C .

На втором этапе решалась статическая задача, в результате которой определялось распределение напряжений, вызванных температурной нагрузкой и граничными условиями закрепления конструкции [21]. При расчете учитывалось изменение прочности и модуля упругости бетона в зависимости от времени и температуры, а также реологические свойства (ползучесть) бетона. По результатам расчета определялась ширина раскрытия и глубина распространения температурных трещин для различных режимов ухода за бетоном конструкции.

Для анализа трещиностойкости при различных условиях ухода за бетоном конструкции был использован расчет ширины раскрытия и глубины проникнове-



Рис. 6. Бетонирование распределительной балки-плиты
Fig. 6. Distribution beam-slab concreting

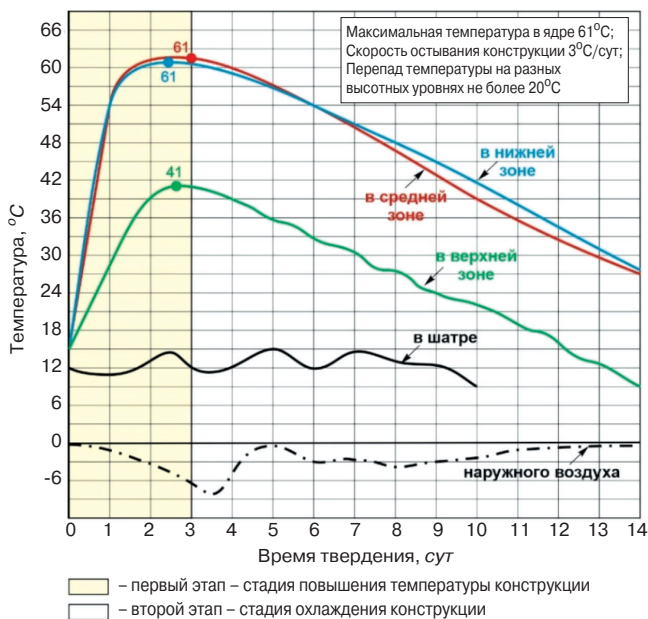


Рис. 7. Кинетика изменения температуры бетона на разных высотных уровнях распределительной балки-плиты (точка 4, рис. 1)
Fig. 7. Kinetics of concrete temperature change at different height levels of the distribution beam-slab (point 4, fig. 1)

ния трещин по алгоритмам (закон сцепления арматуры с бетоном, соотношения между напряжениями и шириной раскрытия трещин), заложенным в ПО «Atena» [17]. Такой подход имеет погрешности, связанные с тем, что эмпирические зависимости, заложенные в теорию расчета трещиностойкости, получены на зрелых бетонах в возрасте 28 сут и более. На ранних сроках твердения бетона соотношение между прочностью на сжатие и прочностью на растяжение, а также закон сцепления бетона с арматурой – отличаются от зависимостей и соотношений в возрасте 28 сут. Поэтому такой анализ дает скорее качественные, а не количественные результаты, пригодные для подтверждения выбора варианта ухода за бетоном конструкции.

На основании полученных расчетных данных оценивался, выбранный на первом этапе, наиболее оптимальный режим выдерживания бетона распределительной балки-плиты, по количеству участков потенциального образования и параметрам трещин.

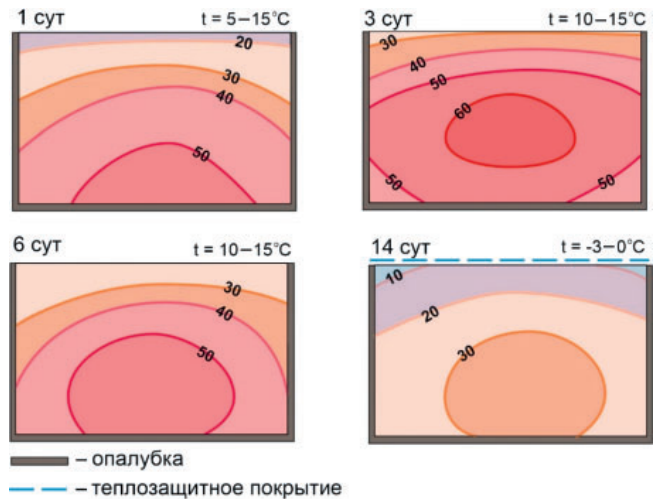


Рис. 8. Изменения температурных полей по сечению распределительной балки-плиты в возрасте 1, 3, 6 и 14 сут после бетонирования (точки 1, 2 и 3, рис. 1)
Fig. 8. Changes in temperature fields over the section of the distribution beam-slab at the age of 1, 3, 6 and 14 days after concreting (points 1, 2 and 3, fig. 1)



Рис. 9. Готовая конструкция распределительной балки-плиты
Fig. 9. Ready-made construction of the distribution beam-slab

На рис. 5 представлены схемы расположения, ширина раскрытия и глубина проникновения температурных трещин для наиболее оптимального режима ухода за конструкцией в возрасте 3 и 14 сут после бетонирования.

По данным, представленным на рис. 5, следует, что в распределительной балке-плите в возрасте 3 сут (при максимальной температуре в ядре 60°C и поверхности 40°C) возможно образование температурных трещин с шириной раскрытия до 0,4 мм и глубиной проникновения до 80 мм в зоне сопряжения нижней поверхности конструкции с ранее забетонированными пилонами (при скорости остывания 2,7°C/сут). Несмотря на то что трещины к возрасту 14 сут закрываются и, согласно СП 63.13330.2018, не приводят к снижению несущей способности конструкции, это обстоятельство явилось основанием для принятия дополнительных мер локального утепления опорных зон балки-плиты.

Состав и характеристики смеси

Самоуплотняющаяся бетонная смесь марки БСТ В50 ($R_T \geq 64$ МПа) РК1 ($R_K = 65 \pm 5$ см) F₁150 W8 ГОСТ Р 59714 поставлялась с трех бетономесительных узлов АО «Партнер» (Москва) и в зависимости от качества материалов, используемых на каждом БСУ, содержала компоненты в следующих соотношениях:

- портландцемент ЦЕМ I 42,5 Н ЖИ по ГОСТ Р 55224 – 350 кг/м³;
- органоминеральный модификатор МБ 2-50С А-II-4 по ГОСТ Р 56178 – 60 кг/м³;
- порошок минеральный МП-1 по ГОСТ Р 52129 – 130–140 кг/м³;
- песок с $M_k = 2,2–2,3$ по ГОСТ 8736 – 820–840 кг/м³;
- щебень гранитный фракции 5–10 мм по ГОСТ 8267 – 840–860 кг/м³;
- суперпластификатор «Sika ViscoCrete 5-600SP» по ГОСТ 24211 – 2,4–2,6 кг/м³;
- вода по ГОСТ 23732 – 160–170 л/м³.

Состав бетонной смеси дан в расчете на сухие заполнители (относительная влажность 0%).

Контроль качества поступающей на строительную площадку самоуплотняющейся бетонной смеси выполнялся по ГОСТ Р 59715 из каждого автобетоносмесителя на двух постах. Входной контроль показал, что характеристики самоуплотняющейся бетонной смеси в целом соответствовали требованиям технологического регламента (расплав нормального конуса 63–72 см; средняя плотность 2400–2440 кг/м³; температура 10–15°C, расслоение – визуальное отсутствие). Прочность бетона при сжатии в партиях бетонных смесей в возрасте 56 сут находится в диапазоне от 82 до 84,3 МПа (среднее значение составляет 82,8 МПа) и превышает требуемую прочность по технологическому регламенту ($R_T = 64$ МПа). Это свидетельствует о том, что бетонные смеси, доставленные на строительную площадку и уложенные в конструкцию распределительной балки-плиты по критерию «прочность при сжатии», соответствовали марке БСТ В50 РК1 ($R_K = 65 \pm 5$ см) F₁150 W8 ГОСТ Р 59714.

Контроль за процессами и качеством бетона в конструкции

Бетонирование распределительной балки плиты выполнялось АО «МСУ-1». Перед укладкой бетонной смеси арматурный каркас, опалубка, а также примыкающие поверхности ранее забетонированных конструкций были прогреты до положительной температуры. Прогрев осуществлялся в теплозащитных шатрах (рис. 6), устроенных над и под конструкцией, с помощью теплогенераторов (калориферов), обеспечивших температуру воздуха к моменту подачи бетонной смеси в верхней части 5–10°C и в нижней части (под опалубкой) 15°C.

Для обеспечения равномерной нагрузки на опалубку бетонирование распределительной балки-плиты осуществлялось самоуплотняющейся бетонной смесью с помощью трех автобетононасосов (максимально возможное количество, которое мож-

но разместить на строительной площадке) одновременно, непрерывно и равномерно (слоями) по всей площади методом «снизу вверх» на всю высоту конструкции. Процесс бетонирования распределительной балки-плиты представлен на рис. 6. Скорость укладки бетонной смеси составляла не менее 90 м³/ч. Время бетонирования конструкции – 8 ч.

Специалистами НИИЖБ им. А.А. Гвоздева совместно с АО «МСУ-1» и техническим заказчиком АО «Аркадостройсервис» на строительной площадке создана система контроля бетонных работ и бетона, которая позволила обеспечить высокое качество конструкции. Фактическая средняя прочность бетона при сжатии распределительной балки-плиты в проектном возрасте, определенная комплексом неразрушающих методов по ГОСТ 17624; ГОСТ 22690 и ГОСТ 18105, составляет 61,3 МПа; при фактическом коэффициенте вариации прочности бетона в конструкции $V_m = 6,4\%$, соответствует фактическому классу по прочности при сжатии В_ф57 и превышает требования проекта (В50).

Выдерживание и уход за бетоном конструкции

Выдерживание бетона и уход за конструкцией осуществлялись на основании результатов контроля температуры бетона в разных зонах распределительной балки-плиты. Температура бетона в конструкции определялась в 21 точке, расположенной равномерно по длине (в отдельных случаях и по ширине) распределительной балки-плиты на трех высотных уровнях – в основании, середине и верхней части – с помощью хромель-копелевых термопар и прибора «Терем». Расположение точек контроля температуры бетона в конструкции представлено на рис. 1.

Схема ухода за бетоном и выдерживания распределительной балки-плиты после бетонирования, принятая на основании расчета термонапряженного состояния конструкции, включала в себя два этапа и состояла в следующем.

На первом этапе – на стадии повышения температуры – в течение не более 5 ч после окончания бетонирования открытая поверхность конструкции увлажнялась и покрывалась полиэтиленовой пленкой для предотвращения усадки от обезвоживания. Это обеспечивало естественный теплообмен конструкции с окружающей средой и тем самым снижало максимальную температуру в ядре конструкции. Продолжительность первого этапа составила около 3 сут.

На втором этапе – на стадии охлаждения – температура регулировалась с учетом обеспечения охлаждения массива конструкции со скоростью не выше 3°C/сут. Это осуществлялось в течение 7 сут за счет поддержания температуры в шатрах от 10 до 15°C, а после снятия верхнего шатра – с помощью рулонного теплоизоляционного материала «Этафом» толщиной 10 мм с термическим сопротивлением 0,2–0,25 м²°C/Вт, который укладывался на горизонтальную поверхность послойно в зависимости от температуры окружающей среды таким образом, чтобы предельная разность тем-

пературы между разными зонами конструкции не превышала 20°C. Уход за бетоном на втором этапе осуществлялся до момента, когда температура на поверхности конструкции не превышала температуру окружающей среды более чем на 20°C.

Выбранная оптимальная схема выдерживания конструкции позволила обеспечить допустимые незначительные изменения температуры бетона по длине распределительной балки-плиты (около 95 м) в каждый момент измерений: перепад температуры по длине конструкции на всех высотных уровнях не превышал 10°C.

Кинетика изменения температуры на разных высотных уровнях в зоне с максимальным значением температуры (61°C) в ядре конструкции (точка 4, рис. 1), а также распределение температурных полей по сечению балки-плиты (точки 1, 2 и 3, рис. 1) в возрасте 1, 3, 6 и 14 сут представлены на рис. 7 и 8. Из приведенных данных видно, что фактические значения температурных параметров выдерживания бетона распределительной балки-плиты полностью соответствуют регламентированным требованиям, заданным эмпирическим ограничениям и расчетным значениям, определенным расчетом термонапряженного состояния конструкции (рис. 4 и 7), в том числе:

- максимальная температура бетона в ядре конструкции не превышала 61°C;
- разность температуры между смежными высотными уровнями (нижним, средним и верхним) не превышала 20°C;
- средняя скорость остывания конструкции не превышала 3°C/сут;
- разность температуры между поверхностной зоной конструкции и окружающей средой не превышала 20°C.

Это обстоятельство показывает правильность выбора основных положений расчета термонапряженного состояния распределительной балки-плиты с учетом фактических изменений скорости гидратации и тепловыделения при экзотермическом процессе разогрева бетона по сечению конструкции и обоснованность использования его результатов при назначении параметров ухода за массивной густоармированной конструкцией.

Следует отметить, что дальнейшее увеличение точности расчетов распределения температуры по сечению конструкций может быть достигнуто за счет учета влияния влажности на теплоемкость и теплопроводность бетона на начальном этапе его твердения.

Выполненная после распалубливания инструментальная дефектоскопия распределительной балки-плиты с использованием ультразвуковой диагностики и мерных инструментов не выявила в конструкции сквозных трещин термического происхождения (рис. 9). Обнаружены отдельные трещины усадочного характера шириной раскрытия менее 0,2 мм, распространяющиеся на глубину не более толщины защитного слоя бетона, что соответствует данным расчета

термонапряженного состояния, допускается основным действующим нормативом СП 63.13330.2018 и не влияет на эксплуатационную надежность, работоспособность и долговечность конструкции.

Выводы

1. Разработана и реализована на практике технология непрерывного бетонирования массивной густоармированной распределительной балки-плиты высотного здания объемом 730 м³ и расходом арматуры 741 кг/м³ с проектным классом бетона В50, которая обеспечила проектные характеристики бетона и термическую трещиностойкость конструкции в ранние сроки после бетонирования. Бетонирование конструкции производилось в зимний период при среднесуточной температуре окружающей среды от 0 до -8°C.

2. Особенности технологии возведения массивной густоармированной конструкции распределительной балки-плиты в зимний период являлись:

- использование малоцементных самоуплотняющихся бетонных смесей с низким экзотермическим потенциалом (расходом цемента 350 кг/м³) и температурой (от 5 до 15°C), с добавками органоминерального модификатора марки МБ 2-50С, молотого известняка (минерального порошка МП-1) и суперпластификатора;

– обеспечение беспрепятственного теплообмена с окружающей средой в период интенсивного тепловыделения бетона до достижения максимального значения температуры в средней зоне конструкции;

- регулирование скорости охлаждения после достижения максимальной температуры в средней зоне конструкции с помощью выдерживания в шатрах и использования теплоизоляционных материалов.

3. Фактические значения температурных параметров выдерживания распределительной балки-плиты и прочности бетона полностью соответствуют регламентированным требованиям, заданным эмпирическим ограничениям и расчетным значениям, определенным расчетом термонапряженного состояния конструкции, в том числе:

- фактическая средняя прочность бетона при сжатии составляет 61,3 МПа, соответствует фактическому классу В_ф57 и превышает требования проекта (В50);
- максимальная температура бетона в ядре конструкции не превышала 61°C;

– разность температуры между смежными высотными уровнями (нижним, средним и верхним) не превышала 20°C;

- средняя скорость остывания конструкции не превышала 3°C/сут;

– разность температуры между поверхностной зоной конструкции и окружающей средой не превышала 20°C.

4. Бетонирование массивной густоармированной балки-плиты, представляющей элемент пространственной статически неопределимой системы, показало, что соблюдение температурно-временных и рецептурных параметров технологии, принятых при

возведении фундаментных плит, должно быть уточнено расчетом термонапряженного состояния, который учитывает специфику конструкций.

5. Расчет термонапряженного состояния по программе «Atena» с учетом в качестве исходных данных заданных технологических и температурно-временных параметров позволил выявить зоны конструкции с избыточными напряжениями термического характера, приводящие к образованию трещин, что явилось основанием для принятия дополнительных технологических мер локального утепления опорных зон балки-плиты.

6. Соответствие расчетных и фактических значений основных температурных характеристик распределительной балки-плиты и отсутствие трещин термического характера показывают, что использованная методика расчета по программе «Atena» может быть использована для оптимизации температурно-временных параметров технологии бетонирования массивных конструкций с учетом их конструктивных особенностей, условий производства работ, составов и свойств бетонных смесей, кинетики гидратации цемента и тепловыделения бетона, а также теплопроводности бетона на начальном этапе твердения.

Список литературы

1. ACI 207.1R-05. Guide to Mass Concrete. Report of ACI Committee 207.
2. Hirozo Mihashi, Joao Paulo de B. Leite. State-of-the-Art Report on Controlling of Cracking in Early Age Concrete // *Journal of Advanced Concrete Technology*. 2004. June. Vol. 2. No. 2, pp. 141–154.
3. Каприелов С.С., Травуш В.И., Шейнфельд А.В., Карпенко Н.И., Кардумян Г.С., Киселева Ю.А., Пригоженко О.В. Модифицированные бетоны нового поколения в сооружениях ММДЦ «Москва-Сити» // *Строительные материалы*. 2006. № 10. С. 8–12.
4. Шифрин С.А., Кардумян Г.С. Использование органо-минеральных модификаторов серии МБ для снижения температурных напряжений в бетонированных массивных конструкциях // *Строительные материалы*. 2007. № 9. С. 9–11.
5. Каприелов С.С., Шейнфельд А.В., Кардумян Г.С., Киселева Ю.А., Пригоженко О.В. Новые бетоны и технологии в конструкциях высотных зданий // *Высотные здания*. 2007. № 5. С. 94–101.
6. Каприелов С.С., Шейнфельд А.В., Кардумян Г.С., Киселева Ю.А., Пригоженко О.В. Обеспечение термической трещиностойкости массивных фундаментных плит из модифицированных бетонов нового поколения. *Проблемы долговечности зданий и сооружений в современном строительстве: матер. Междунар. конф.* СПб., 2007. С. 240–245.
7. Каприелов С.С., Шейнфельд А.В., Кардумян Г.С. Новые модифицированные бетоны. Москва: ООО «Типография «Парадиз», 2010. 258 с.
8. Nannan Shi, Jianshu Ouyang, Runxiao Zhang, Dahai Huang, “Experimental study on early-age crack of mass concrete under the controlled temperature history”. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2014. Article ID 671795. 10 p. doi.org/10.1155/2014/671795
9. Bisch Philippe. Behavior and assessment of massive structures: cracking and shrinkage. *Crack Width Calculation Methods for Large Concrete Structures*. Nordic Miniseminar. Oslo, Norway. 29–30 august 2017. Workshop Proceedings. No. 12, pp. 11–15.

References

1. ACI 207.1R-05. Guide to Mass Concrete. Report of ACI Committee 207.
2. Hirozo Mihashi, Joao Paulo de B. Leite. State-of-the-art report on controlling of cracking in early age concrete. *Journal of Advanced Concrete Technology*. 2004. June. Vol. 2. No. 2, pp. 141–154.
3. Kapriyelov S.S., Travush V.I., Sheinfeld A.V., Karpenko N.I., Kardumyan G.S., Kiselyova Yu.A., Prigozhenko O.V. Modified concretes of a new generation in buildings of «Moscow city». *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2006. No. 10, pp. 8–12. (In Russian).
4. Shifrin S.A., Kardumian G.S. The use of organic-mineral modifiers of mb series for reducing the thermal stresses in massive concrete structures. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2007. No. 9, pp. 9–11. (In Russian).
5. Kapriyelov S.S., Sheinfeld A.V., Kardumyan G.S., Kiselyova Yu.A., Prigozhenko O.V. New concretes and technologies in structures of tall buildings. *Vysotnye zdaniya*. 2007. No. 5, pp. 94–101. (In Russian).
6. Kapriyelov S.S., Sheinfeld A.V., Kardumyan G.S., Kiselyova Yu.A., Prigozhenko O.V. Providing thermal crack resistance of massive foundation slabs. *Problems of Durability of Buildings and Structures in Contemporary Construction. Int. Conf.* Saint-Petersburg, 2007, pp. 240–245. (In Russian).
7. Kapriyelov S.S., Sheinfeld A.V., Kardumyan G.S. Novye modifitsirovannyye tehnologii [A new modified concretes]. Moscow: Master Concrete Enterprise, Paradise. 2010. 258 p.
8. Nannan Shi, Jianshu Ouyang, Runxiao Zhang, Dahai Huang, “Experimental study on early-age crack of mass concrete under the controlled temperature history”. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2014. Article ID 671795. 10 p. doi.org/10.1155/2014/671795
9. Bisch Philippe. Behavior and assessment of massive structures: cracking and shrinkage. *Crack Width Calculation Methods for Large Concrete Structures*. Nordic Miniseminar. Oslo, Norway. 29–30 August 2017. No. 12, pp. 11–15.

10. Каприелов С.С., Шейнфельд А.В., Аль-Омаис Д., Зайцев А.С. Высокопрочные бетоны в конструкции фундаментов высотного комплекса «ОКО» в ММДЦ «Москва-Сити» // *Промышленное и гражданское строительство*. 2017. № 3. С. 53–57.
11. Каприелов С.С., Шейнфельд А.В., Чилин И.А. Оптимизация параметров технологии бетона для обеспечения термической трещиностойкости массивных фундаментов // *Строительные материалы*. 2022. № 10. С. 41–51. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-403X-2022-807-10-41-51>
12. Каприелов С.С., Шейнфельд А.В., Кардумян Г.С., Чилин И.А. О подборе составов высококачественных бетонов с органоминеральными модификаторами // *Строительные материалы*. 2017. № 12. С. 58–63.
13. Каприелов С.С., Шейнфельд А.В. Некоторые особенности механизма действия органоминеральных модификаторов на цементные системы // *Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений*. 2017. № 1. С. 40–47.
14. Каприелов С.С., Шейнфельд А.В., Аль-Омаис Д., Зайцев А.С., Амиров Р.А. Технология возведения конструкций каркасов высотных зданий из высокопрочных бетонов классов В60–В100 // *Вестник НИЦ «Строительство»*. 2022; 33(2):106-121. DOI: [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-2\(33\)-106-121](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-2(33)-106-121)
15. Болгов А.Н., Невский А.В., Иванов С.И., Сокуров А.З. Численное моделирование температурных напряжений в бетоне массивных конструкций в период твердения // *Промышленное и гражданское строительство*. 2022. № 4. С. 6–13. DOI: [10.33622/0869-7019.2022.04.06-13](https://doi.org/10.33622/0869-7019.2022.04.06-13)
16. Руководство по прогреву бетона в монолитных конструкциях. М.: РААСН; НИИЖБ. 2005.
17. Červenka V., Jendele L., Červenka J. ATENA Program Documentation. Part 1. Theory. Part 3–2 Example Manual. Prague, 2021.
18. Eduardo M.R. Fairbairn, Miguel Azenha. Thermal cracking of massive concrete structures. State of the art report of the RILEM technical committee 254-CMS // *RILEM State Art Reports*. Vol. 27. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-76617-1>
19. Sargam Y., Faytarounia M., Riding K. et. al. Predicting thermal performance of a mass concrete foundation – a field monitoring case study. *Case Studies in Construction Materials*. 2019. Vol. 11. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2019.e00289>
20. Ущеров-Маршак А.В. Термокинетический фактор в твердении цемента // *Калориметрия цемента и бетона*. 2002. С. 57–58.
21. Кардумян Г.С., Иванов С.И. Система защиты железобетонных конструкций от подземных вод «Белая ванна» // *Строительные материалы*. 2018. № 11. С. 21–26.
10. Kaprielov S.S., Sheinfeld A.V., Al-Omais D., Zaitsev A.S. High-Strength concretes in foundation of tall buildings complex “ÓKO” in “Moscow City” business center. *Promyshlennoye i Grazhdanskoye Stroitelstvo*. 2017. No. 3, pp. 53–57. (In Russian).
11. Kaprielov S.S., Sheinfeld A.V., Chilin I.A. Optimization of technology parameters to ensure thermal crack resistance of massive foundations. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2022. No. 10, pp. 41–51. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-403X-2022-807-10-41-51>
12. Kaprielov S.S., Sheinfeld A.V., Kardumyan G.S., Chilin I.A. On the selection of compositions of high-quality concretes with organo-mineral modifiers. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2017. No. 12, pp. 58–63. (In Russian).
13. Kaprielov S.S., Sheinfeld A.V. Some features of organic-mineral modifiers action on cement systems. *Seismostoykoye Stroitelstvo. Bezopasnost sooruzheniy*. 2017. No. 1, pp. 40–47. (In Russian).
14. Kaprielov S.S., Sheinfeld A.V., Al-Omais D., Zaitsev A.S., Amirov R.A. A technology of erecting high-rise building frame structures using B60–B100 classes high-strength concretes. *Bulletin of science and research center of construction*. 2022; 33(2):106-121. (In Russian). DOI: [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-2\(33\)-106-121](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-2(33)-106-121)
15. Bolgov A.N., Nevsky A.V., Ivanov S.I., Sokurov A.Z. Numerical modeling of temperature stresses in concrete of massive structures during hardening. *Promyshlennoye i Grazhdanskoye Stroitelstvo*. 2022. No. 4, pp. 6–13. (In Russian). DOI: [10.33622/0869-7019.2022.04.06-13](https://doi.org/10.33622/0869-7019.2022.04.06-13)
16. Guidelines for the heating of concrete in monolithic structures. Moscow: RAASN; NIIZhB. 2005. (In Russian).
17. Červenka V., Jendele L., Červenka J. ATENA Program Documentation. Part 1. Theory. Part 3–2 Example Manual. Prague, 2021.
18. Eduardo M.R. Fairbairn, Miguel Azenha. Thermal cracking of massive concrete structures. State of the art report of the RILEM technical committee 254-CMS. *RILEM State Art Reports*. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-76617-1>
19. Sargam Y., Faytarounia M., Riding K. et. al. Predicting thermal performance of a mass concrete foundation – a field monitoring case study. *Case Studies in Construction Materials*. 2019. Vol. 11. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2019.e00289>
20. Usharov-Marshak A.V. Thermokinetic factor in cement hardening. *Calorimetry of cement and concrete*. 2002, pp. 57–58. (In Russian).
21. Kardumyan G.S., Ivanov S.I. The system of protection of reinforced concrete structures from groundwater “White bath”. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2018. No. 11, pp. 21–26. (In Russian).

В.В. МАЛЮК^{1,2}, младший научный сотрудник, старший преподаватель (mvv.77@mail.ru),
В.Д. МАЛЮК^{1,2,4}, канд. техн. наук (mvd46@bk.ru);
С.В. ВАВРЕНЮК¹, д-р техн. наук (svvn59@mail.ru);
С.Н. ЛЕОНОВИЧ³, д-р техн. наук, иностранный академик РААСН (snleonovich@yandex.ru)

¹ Филиал ФГБУ «ЦНИИП Минстроя России» ДальНИИС (690033, г. Владивосток, ул. Бородинская, 14)

² Сахалинский государственный университет (693000, г. Южно-Сахалинск, Коммунистический пр., 33)

³ Белорусский национальный технический университет (220013, Республика Беларусь, г. Минск, пр-т Независимости, 65)

⁴ ООО «Трансстрой-Тест» (694020, Сахалинская обл., г. Корсаков, ул. Вокзальная, 19Г)

Метод оценки долговечности бетона морских сооружений на этапе строительства

Рассмотрены проблемы, возникающие при реализации проектных показателей по долговечности бетона на этапе строительства морских сооружений в условиях морозного воздействия. Показано, что нормируемый показатель долговечности – морозостойкость, в силу отсутствия оперативных методов определения, на этапе изготовления конструкций не контролируется, что влечет за собой получение как «вечных» бетонов, срок службы которых составляет 100 лет, так и бетонов с непродолжительным сроком службы. На основании современных теоретических положений структурной теории цементных бетонов и опыта строительства морских сооружений предложен метод обеспечения нормируемой морозостойкости на этапе строительства при условии обеспечения критической зрелости структуры бетона к началу морозного воздействия. Приведена методологическая основа определения критической зрелости структуры бетона.

Ключевые слова: морские сооружения, морозостойкость бетона, долговечность, агрессивная среда.

Для цитирования: Малюк В.В., Малюк В.Д., Вавренюк С.В., Леонович С.Н. Метод оценки долговечности бетона морских сооружений на этапе строительства // *Строительные материалы*. 2023. № 10. С. 25–28. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-818-10-25-28>

V.V. MALYUK^{1,2}, Junior Researcher, Senior Lecturer (mvv.77@mail.ru);

V.D. MALYUK^{1,2,4}, Candidate of Sciences (Engineering) (mvd46@bk.ru);

S.V. VAVRENYUK¹, Doctor of Sciences (Engineering) (svvn59@mail.ru);

S.N. LEONOVICH³, Doctor of Sciences (Engineering), Foreign academician of the RAACS (snleonovich@yandex.ru)

¹ Branch of FGBU "TSNIIP of Russian Ministry", DalNIIS (Ministry of Construction, Housing and Utilities of the Russian Federation Far-Eastern Research, Design and Technological Institute of Construction) (14, Borodinskaya Street, Vladivostok, 690033, Russian Federation)

² Sakhalin State University (33 Kommunistichesky Prospect, Yuzhno-Sakhalinsk, 693000, Russian Federation)

³ Belarusian National Technical University (65 Nezavisimosti Prospect, Minsk, 220013, Republic of Belarus)

⁴ LLC "Transstroy-Test" (19r Vokzalnaya Street, Korsakov, 694020, Sakhalin Region, Russian Federation)

Method for Assessing the Durability of Concrete of Offshore Structures at the Construction Stage

The problems that arise when implementing design indicators for the durability of concrete at the stage of construction of offshore structures under frost conditions are considered. It is shown that the standardized indicator of durability – frost resistance, due to the lack of operational methods of determination, is not controlled at the stage of manufacturing structures, which entails the production of both "eternal" concrete, the service life of which is 100 years, and concrete with a short service life. On the basis of modern theoretical principles of the structural theory of cement concrete and experience in the construction of offshore structures, a method for ensuring standardized frost resistance at the construction stage is proposed, provided that the critical maturity of the concrete structure is ensured by the beginning of frost exposure. A methodological basis for determining the critical maturity of concrete structure is given.

Keywords: offshore structures, frost resistance of concrete, durability, aggressive environment.

For citation: Malyuk V.V., Malyuk V.D., Vavrenyuk S.V., Leonovich S.N. Method for assessing the durability of concrete of offshore structures at the construction stage. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2023. No. 10, pp. 25–28. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-818-10-25-28>

Многочисленные случаи разрушения бетонных конструкций морских сооружений после первого зимнего сезона свидетельствуют о недостатках существующих методов проектирования долговечности и технологических мер по обеспечению стойкости бетона в условиях морозного воздействия. В связи с этим, необходимы новые методы оценки долговечности конструкций [1, 2] с обоснованными техническими показателями, имеющими возможность оперативного контроля.

Обеспечение стойкости бетона морских портовых и транспортных сооружений в агрессивной сре-

де при морозном воздействии является одним из наиболее сложных вопросов строительного материаловедения [3–5]. При этом общепринято выделять характерные периоды, в которые формируется качество бетона: проектирование, строительство и эксплуатация.

Основная задача этапа проектирования долговечности – обеспечить срок службы конструкций с помощью процедуры проектирования, этапа строительства – реализовать проектные требования по долговечности в условиях строительной площадки.

В настоящее время среда эксплуатации, в которой коррозия бетона происходит от воздействия попеременного замораживания и оттаивания при сильном насыщении минерализованной водой, относится к агрессивной и классифицируется по степени суровости как класс XF4. При этом нормируемым показателем долговечности бетона принимается марка по морозостойкости, которая согласно многолетним исследованиям для бетонов, эксплуатирующихся в условиях дальневосточных морей, значительно завышена [6].

Исходя из современных теоретических положений цементных бетонов и гипотез о механизмах разрушения бетона при морозном воздействии долговечность (D_{BT}) и морозостойкость (F) бетона зависят от водоцементного отношения (V/C), содержания цемента (C) и степени гидратации цемента (α):

$$D_{BT} = F = f(V/C, C, \alpha). \quad (1)$$

Современные принципы проектирования морозостойких бетонов предусматривают обязательное применение воздухововлекающих добавок, поэтому долговечность (D_{BT}) и морозостойкость (F) бетона определяются следующей зависимостью:

$$D_{BT} = F = f(V/C, C, \alpha, V_{B.V}). \quad (2)$$

За счет искусственного воздухововлечения ($V_{B.V}$) морозостойкость бетона может повышаться в несколько раз [7, 8]. Это дает основание полагать, что будет обеспечен значительный запас стойкости к морозным воздействиям в реальных условиях эксплуатации. Однако случаи деградации бетона в ранние сроки эксплуатации свидетельствуют, что в условиях строительной площадки эти резервы должным образом не реализуются [9, 10].

Качество бетонных конструкций на этапе их возведения определяется возможностью оценки соответствия показателя морозостойкости проектному. Поэтому важно не только назначить требования по показателю, но и установить методы определения и прогноза долговечности в условиях стройплощадки.

На этапе проектирования устанавливаются требования к морозостойкости бетона (F) исходя из природно-климатических условий района строительства и класса агрессивности среды, что является основой при подборе составов бетона по показателям, определяющим морозостойкость: водоцементное отношение, осадка конуса, воздуходержание. Исследования показывают, что обеспечить стабильность показателей по удобоукладываемости и воздуходержанию в условиях стройплощадки весьма затруднительно [11], а показатели V/C и C проконтролировать невозможно вообще по причине отсутствия прямых методов испытаний.

Существующие гостовские процедуры оценки морозостойкости надежны, однако оперативность контроля очень низка из-за продолжительности испытаний 2–3 месяца после изготовления конструкции. В связи с этим, на этапе приемки конструкции в

эксплуатацию прогнозировать ее морозостойкость невозможно, что требует совершенствования методов оценки долговечности бетона.

Требования к показателям долговечности на этапе проектирования назначаются исходя из того, что к началу морозного воздействия в конструкциях будут обеспечены нормальные условия твердения бетона. Поэтому на этапе подбора состава бетона показатели долговечности V/C , C назначаются при стандартных (нормальных) условиях твердения бетона, в то время как на строительной площадке процесс твердения бетона практически остается без контроля.

В настоящее время для обеспечения долговечности бетонных и железобетонных конструкций морских гидротехнических сооружений рекомендованы сроки выдерживания конструкций для зоны переменного уровня при положительной температуре до их замораживания с учетом технологии бетона, гидрометеорологических условий эксплуатации сооружения, вида конструкций. Например, для конструкций из обычного бетона срок выдерживания при положительной температуре должен быть в пределах 45–60 сут. В любом случае при правильном проектном составе бетона, даже при статистической неоднородности критических показателей долговечности V/C , C , $V_{B.V}$, которая наблюдается в условиях строительной площадки, определяющим показателем долговечности является степень гидратации цементного камня (a), от которой зависит структура капиллярных пор к началу морозного воздействия и объем воды, способной к миграции и льдообразованию.

Результаты лабораторных и натурных исследований дают основание считать, что на долговечность бетона в агрессивных средах класса XF4 большое влияние оказывает уровень зрелости структуры к началу морозного воздействия [8, 9]. Есть основания считать, что существует уровень критической зрелости структуры бетона, который позволяет определить требования к «критическому возрасту» при условиях твердения, отличных от нормальных. Поэтому предложено качество бетона к началу морозного воздействия оценивать показателями критической (S_α) и фактической (S_f) зрелости структуры [8], характеризующими условия для формирования оптимальной системы капиллярных пор.

В таблице представлены параметры для формирования критической зрелости бетона S_α при твердении в нормальных условиях: температура среды 18°C (t_{18}); влажность среды не менее 95% (P_{95}). Для этих условий твердения значение показателя критической зрелости S_α определяется из выражения:

$$S_\alpha = (T_{CR} \cdot t_{18}) \cdot n_p, \quad (3)$$

где T_{CR} – время твердения для формирования дискретной системы капиллярных пор, сут; t_{18} – температура твердения при нормальных условиях (принимается равной 18°C); n_p – коэффициент значимости

**Параметры критической зрелости структуры бетона (S_α), по данным [12],
и коэффициент зрелости структуры бетона в возрасте 28 сут в нормальных условиях твердения (N_{28})
Parameters of the critical maturity of the concrete structure (S_α) according to the data
and the coefficient of maturity of the concrete structure at 28 days under normal hardening conditions (N_{28})**

В/Ц	Время твердения T_{CR} для формирования дискретной системы пор, сут [12]	Критическая зрелость структуры S_α , °C·сут	Коэффициент зрелости структуры бетона $N_{28}=S_{28}/S_\alpha$
0,4	3	54	9,3
0,45	7	126	4
0,5	14	252	2
0,6	180	3240	0,2
0,7	360	6480	0,08

Примечание. S_{28} – зрелость структуры бетона в возрасте 28 сут в нормальных условиях твердения $(18 \cdot 28)=504^\circ\text{C} \cdot \text{сут}$.

влажности при нормальных условиях. При $P_f \geq 95\%$ принимается равным единице.

Зрелость структуры бетона (S_f) характеризуется реальными условиями твердения:

$$S_f = (T_f \cdot t_f) \cdot n_p, \quad (4)$$

где T_f – период твердения бетона до морозного воздействия, сут; t_f – среднее значение температуры твердения за период T_f , °C; n_p – коэффициент, характеризующий значимость влажности для формирования структуры пор.

Зрелость структуры (S_f) фактически является интегральной характеристикой условий твердения бетона. Исходя из этого структуру системы капиллярных пор к началу морозного воздействия на бетон в реальных условиях можно оценить коэффициентом зрелости структуры (N_F):

$$N_F = S_f / S_\alpha. \quad (5)$$

Критическая зрелость бетона – это одно из необходимых условий для долговечности конструкций в эксплуатационный период, поэтому уровень фактической зрелости (S_f) к началу морозного воздействия должен быть не меньше критической зрелости структуры (S_α). Параметр критической зрелости структуры позволяет определить требования к критическому возрасту при условиях твердения, отличных от нормальных.

Предложенная концепция позволяет определять требуемый период влажностного ухода (T_{TP}). Применить на практике предложенную концепцию

прогноза долговечности бетона по зрелости структуры можно при условии неукоснительного выполнения влажностного ухода до достижения критической зрелости структуры (S_α).

Отсутствие влажных условий выдерживания бетона в критический возраст следует считать условием несоответствия бетона проектным требованиям по долговечности. Зная требуемый критический уровень зрелости для принятого состава бетона (S_α), можно определить требуемый срок твердения (T_{TP}) бетона, необходимый к началу морозного воздействия, с учетом температурных условий строительной площадки.

По результатам проведенных исследований установлено, что бетоны с В/Ц отношением на уровне 0,5 могут обеспечить «вечный» срок службы конструкциям морских сооружений. Поэтому исходя из данных таблицы критическая зрелость структуры бетона с $S_\alpha=252^\circ\text{C} \cdot \text{сут}$ при нормальных условиях твердения будет обеспечена в течение 14 сут.

Результаты натурных и экспериментальных исследований показывают, что предложенная методика в наибольшей степени применима для оценки долговечного бетона, подвергающегося периодическому морозному воздействию при максимальном насыщении минерализованной водой, т. е. на участке прилива в зоне переменного уровня воды. Данный метод позволяет разрабатывать виды и продолжительность ухода за бетоном с учетом состава бетонной смеси, технологии бетонирования, вида конструкции и погодных условий.

Список литературы

1. Степанова В.Ф., Фаликман В.Р. Современные проблемы обеспечения долговечности железобетонных конструкций // *БСТ: Бюллетень строительной техники*. 2015. № 2 (966). С. 55–61.
2. Performance-based specifications and control of concrete durability: state-of-the-art. *Report RILEM TC 230-PSC* (RILEM State-of-the-Art Reports (18), Springer; 1st ed. 2016 edition (October 3, 2015), 391 p.

References

1. Stepanova V.F., Falikman V.R. Modern problems of ensuring durability of reinforced concrete structures. *BST: Bjulleten' stroitel'noj tehniki*. 2015. No. 2 (966), pp. 55–61. (In Russian).
2. Performance-based specifications and control of concrete durability: state-of-the-art. *Report RILEM TC 230-PSC* (RILEM State-of-the-Art Reports (18), Springer; 1st ed. 2016 edition (October 3, 2015), 391 p.

3. Карпенко Н.И., Ярмаковский В.Н., Карпенко С.Н., Кадиев Д.З. О диаграммном методе определения параметрических точек процесса микротрещинообразования в бетонных элементах при осевом сжатии в условиях действия низкой отрицательной температуры // *Жилищное строительство*. 2019. № 6. С. 3–9. DOI: <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2019-6-3-9>
4. Шалый Е.Е., Леонович С.Н., Ким Л.В. Дegradaция железобетонных конструкций морских сооружений от совместного воздействия карбонизации и хлоридной агрессии // *Строительные материалы*. 2019. № 5. С. 67–72. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-770-5-67-72>
5. Степанова В.Ф., Фаликман В.Р., Королева Е.Н. Мониторинг и анализ нормативных документов в области проектирования железобетонных конструкций по их жизненному циклу // *Строительные материалы*. 2018. № 7. С. 14–19. DOI: [10.31659/0585-430X-2018-761-7-14-19](https://doi.org/10.31659/0585-430X-2018-761-7-14-19)
6. Мalyuk В.В., Мalyuk В.Д., Леонович С.Н. Анализ результатов обследования железобетонных конструкций портовых сооружений (о. Сахалин, 1927–2018 г.) // *Бетон и железобетон*. 2022. № 1 (609). С. 3–9. DOI: <https://doi.org/10.31659/0005-9889-2022-609-1-3-9>
7. Мalyuk В.В. Морозостойкость бетона при различных методах испытаний. *Проблемы современного строительства: материалы Международной научно-технической конференции*. Минск. 28 мая 2019 г. С. 246–256.
8. Мalyuk В.В., Мalyuk В.Д., Леонович С.Н. Совершенствование методов проектирования и технологии бетонных работ (на примере о. Сахалин) // *Бетон и железобетон*. 2022. № 2 (610). С. 30–34. DOI: <https://doi.org/10.31659/0005-9889-2022-610-2-30-34>
9. Malyuk V., Degradation and sudden failure of concrete structures of marine hydraulic structures in severe hydrometeorological conditions. Far East Con-2018. *International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern technologies IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2018. Vol. 463. 022071. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/463/2/022071>
10. Вавренюк С.В., Ефименко Ю.В., Вавренюк В.Г., Фарафонов А.Э. Результаты исследования причин разрушения бетонного покрытия морского пирса на побережье Японского моря // *Строительные материалы*. 2019. № 11. С. 37–41. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-776-11-37-41>
11. Мalyuk В.В., Митина В.И. Стабильность технологических показателей бетонной смеси с воздухововлекающими добавками при длительной транспортировке. *Сборник трудов V Международной научно-практической конференции, посвященной 90-летию ФГБОУ ВО «СибАДИ»*. Омск, 2020.
3. Karpenko N.I., Yarmakovsky V.N., Karpenko S.N., Kadiev D.Z. About the diagram method of determination of parametric points of microcracking formation process in concrete elements under axial compression in conditions of low negative temperatures action. *Zhilishchnoe Stroitel'stvo* [Housing Construction]. 2019. No. 6, pp. 3–9. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2019-6-3-9>
4. Shalyi E.E., Leonovich S.N., Kim L.V. Degradation of reinforced concrete structures of marine works from the combined impact of carbonation and chloride aggression. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2019. No. 5, pp. 67–72. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-770-5-67-72>
5. Stepanova V.F., Falikman V.R., Koroleva E.N. Monitoring and analysis of normative documents in the field of structural concrete design according to life cycle. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2018. No. 7, pp. 14–19. (In Russian). DOI: [10.31659/0585-430X-2018-761-7-14-19](https://doi.org/10.31659/0585-430X-2018-761-7-14-19)
6. Malyuk V.V., Malyuk V.D., Leonovich S.N. Analysis of the results of the survey of reinforced concrete structures of port facilities (Sakhalin Island 1927–2018). *Beton i Zhelezobeton* [Concrete and Reinforced Concrete]. 2022. No. 1 (609), pp. 3–9. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0005-9889-2022-609-1-3-9>
7. Malyuk V.V. Frost resistance of concrete under various test methods. *Problems of Modern Construction: Proceedings of the International Scientific and Technical Conference*. Minsk. May 28. 2019, pp. 246–256. (In Russian).
8. Malyuk V.V., Malyuk V.D., Leonovich S.N. Improvement of design methods and technology of concrete works (on the example of Sakhalin Island). *Beton i Zhelezobeton* [Concrete and Reinforced Concrete]. 2022. No. 2 (610), pp. 30–34. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0005-9889-2022-610-2-30-34>
9. Malyuk V., Degradation and sudden failure of concrete structures of marine hydraulic structures in severe hydrometeorological conditions. Far East Con-2018. *International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern technologies IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2018. Vol. 463. 022071. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/463/2/022071>
10. Vavrenyuk S.V., Efimenko Yu.V., Vavrenyuk V.G., Farafonov A.E. Results of the study of the causes of destruction of concrete pavement of a sea pier on the coast of the Sea of Japan. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2019. No. 11, pp. 37–41. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-776-11-37-41>
11. Malyuk V.V., Mitina V.I. Stability of technological parameters of concrete mixture with air-entraining additives during long-term transportation. *Proceedings of the V International scientific and practical conference dedicated to the 90th anniversary of FGBOU VO «SibADI»*. Omsk. 2020.

УДК666.972.55

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-818-10-29-34>

М.А. ГОНЧАРОВА¹, д-р техн. наук (magoncharova777@yandex.ru),
А.Г. ЗАЕВА¹, инженер (nastenkast08@mail.ru),
А.В. КОМАРИЧЕВ¹, канд. техн. наук (smidt48@mail.ru);
П.В. МОНАСТЫРЕВ², д-р техн. наук (monastyrev68@mail.ru)

¹ Липецкий государственный технический университет (398055, г. Липецк, ул. Московская, 30)

² Тамбовский государственный технический университет (392000, г. Тамбов, ул. Советская, 106/5)

Разработка составов композиционных материалов для эксплуатации в агрессивной среде

Исследование направлено на оптимизацию составов порошково-активированных бетонов, разработанных на основе обобщений теоретических и экспериментальных представлений о зависимости эксплуатационных характеристик композиционных материалов от их состава и структуры. На первом этапе планирования спроектирован состав матрицы – водно-дисперсной реологической системы твердения (СТ). Показана эффективность введения пластификаторов по двухстадийной методике: сначала сухие компоненты смешивались с 2/3 жидкой фазы, а на второй стадии – с оставшимся количеством. В результате испытаний бетонных образцов после двух месяцев твердения выбран рациональный состав, подходящий для дальнейших исследований в агрессивной среде. Исследования позволили получить композиционный материал, обладающий рядом свойств, необходимых для эксплуатации в агрессивных средах: высокой прочностью при сжатии 115 МПа, прочностью при изгибе 7,62 МПа и водопоглощением 2% по объему. Предложены дальнейшие действия по исследованию разработанного мелкозернистого бетона в условиях воздействия агрессивных сред.

Ключевые слова: композиционные материалы, порошково-активированный бетон, агрессивная среда, химическая стойкость, оптимизация состава.

Для цитирования: Гончарова М.А., Заева А.Г., Комаричев А.В., Монастырев П.В. Разработка составов композиционных материалов для эксплуатации в агрессивной среде // *Строительные материалы*. 2023. № 10. С. 29–34.

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-818-10-29-34>

M.A. GONCHAROVA¹, Doctor of Sciences (Engineering) (magoncharova777@yandex.ru), A.G. ZAEVA¹, Engineer (nastenkast08@mail.ru), A.V. KOMARICHEV¹, Candidate of Sciences (Engineering) (smidt48@mail.ru); P.V. MONASTYREV², Doctor of Sciences (Engineering) (monastyrev68@mail.ru)

¹ Lipetsk State Technical University (30, Moskovskaya Street, Lipetsk, 398055, Russian Federation)

² Tambov State Technical University (106/5, Sovetskaya Street, Tambov, 392000, Russian Federation)

Development of Compositions of Composite Materials for Operation Under the Influence of Aggressive Environments

The study is aimed at optimizing the compositions of powder-activated concrete developed on the basis of generalizations of theoretical and experimental ideas about the dependence of performance characteristics of composite materials on their composition and structure. At the first stage of planning the composition of the matrix – water-dispersed rheological curing system (CT) was designed. The efficiency of plasticizers introduction by two-stage methodology was shown – first dry components were mixed with 2/3 of liquid phase, and at the second stage with the remaining amount of water. As a result of tests of concrete specimens after 2 months of curing, a rational composition suitable for further studies in an aggressive environment was selected. The research made it possible to obtain a composite material possessing a number of properties necessary for operation in aggressive environments: high compressive strength of 115 MPa, flexural strength of 7.62 MPa and water absorption of 2.0% by volume. Further actions on research of the developed fine-grained concrete in conditions of influence of aggressive environments are offered.

Keywords: composite materials, powder-activated concrete, aggressive environment, chemical resistance, composition optimization.

For citation: Goncharova M.A., Zaeva A.G., Komarichev A.V., Monastyrev P.V. Development of compositions of composite materials for operation under the influence of aggressive environments. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2023. No. 10, pp. 29–34. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-818-10-29-34>

Долговечность строительных материалов и изделий является значимой характеристикой, определяющей эффективность развития стройиндустрии на современном этапе. Повышение долговечности и работоспособности конструкций происходит за счет совершенствования методов и способов защиты от коррозии бетонов и в связи с появлением новых научных концепций в области строительного материаловедения, увеличивающих прочность и стойкость цементных композитов при эксплуатации их в различных условиях [1–3].

Бетоны, стойкие к агрессивным средам, востребованы в различных промышленных отраслях.

Особую потребность данного рода бетонов испытывает автомобильная промышленность, химическая промышленность, а также медицинские учреждения различного назначения. Такого рода объекты эксплуатируются в агрессивной среде, подвергаясь воздействиям не только влаги, температуры, но и химических. Кроме того, само назначение промышленных объектов при постоянном использовании человеком требует от них высокой эксплуатационной стойкости и минимальных затрат на поддержание в работоспособном состоянии [3, 4].

Высокие эксплуатационные качества промышленных и гражданских объектов могут быть обеспе-

чены применением высокотехнологичных композиционных материалов, объединяющих в себе свойства полимерных материалов и составов на минеральной основе, отличающихся высокой прочностью и трещиностойкостью, стойкостью к агрессивным воздействиям и, как следствие, значительной долговечностью [5–7].

Такая материаловедческая задача может быть решена за счет использования в рецептурах цементных композитов эффективных модифицирующих добавок функционального назначения. При этом повысить стойкость в органических средах можно за счет введения в состав бетонов компонентов с частицами различных масштабных уровней и пластификаторов с максимальной функциональной эффективностью. В качестве бетонов, стойких в агрессивных средах промышленных производств, предложено рассматривать порошково-активированные бетоны, не содержащие крупных заполнителей. Для повышения физико-механических свойств решено использовать микрофибру [8].

Одна из самых важных характеристик бетонов, на которую стоит обращать внимание, – характеристика по типу смеси [9–11]. Характеристики бетонов по типу смеси приводятся в нормативных документах и используются для маркировки смеси и для обозначения некоторых ее особенностей (табл. 1).

В основу данной классификации легла средняя плотность бетонных смесей. Ниже представлена характеристика для каждого типа.

БСМ – бетонные смеси мелкозернистого бетона, изготавливаются без крупного заполнителя, благодаря чему и было получено название – пескобетон [2, 5]. К таким материалам относятся композиты, полученные на основе рационального управления структурой на микро-, мезо- и макроуровнях, состоящие из разнородных исходных компонентов, работающих совместно с синергетическим эффектом и формирующих комплекс новых свойств конечного объекта [12–14]. Установлено, что в сложных эксплуатационных условиях должны применяться изделия и конструкции на основе бетонов нового поколения – высокопрочных бетонов, известных как порошково-активированные бетоны (RPC – Reactive Powder Concrete). Одним из основных преимуществ этого класса бетона является то, что он может проявлять значительную прочность при разрыве и ударную вязкость. Такое улучшение свойств во многом достигается за счет добавления микроволокон во время перемешивания смеси. Оптимизация реотехнологических матриц RPC позволяет говорить о революционном отличии таких бетонов от традиционно применяемых.

Можно отметить следующие причины проявления улучшенных характеристик RPC- бетонов:

- повышение однородности за счет использования микроразмерной матрицы (исключение из смеси крупных заполнителей);
- использование пуццоланических эффектов при введении в смесь тонкодисперсного микрокремнезема;

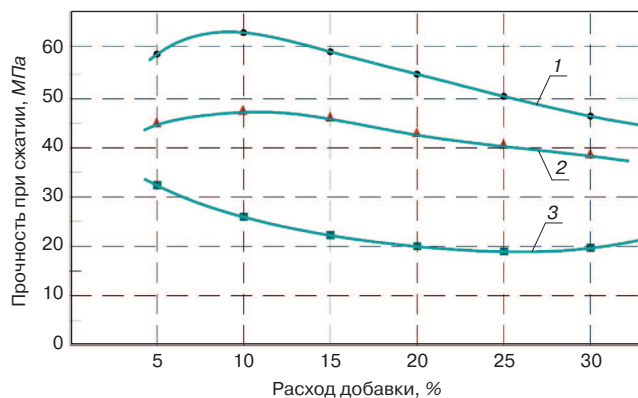


Рис. 1. Зависимость прочностной активности СТ от количества добавки: 1 – доменный гранулированный шлак (производитель – ПАО «НЛМК»); 2 – цементная пыль АО «Липецкцемент»; 3 – сталеплавильный шлак (производитель – ПАО «НЛМК»)

Fig. 1. Dependence of the strength activity of ST on the amount of additive: 1 – granulated blast furnace slag (manufacturer: NLМК PJSC); 2 – cement dust of Lipetsk cement JSC; 3 – steelmaking slag (manufacturer – PJSC NLМК)

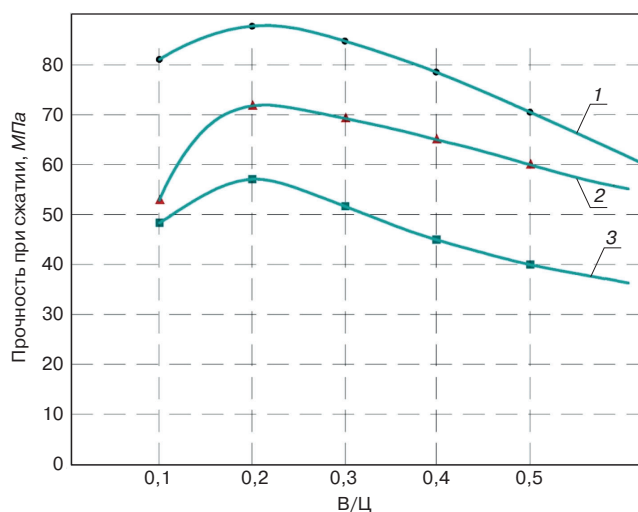


Рис. 2. Прочность при сжатии СТ с применением поликарбоксилатных пластификаторов: 1 – CemPlast (двухстадийное введение); 2 – CemPlast (одностадийное введение); 3 – PC-200 (одностадийное введение)

Fig. 2. Compressive strength of ST with the use of polycarboxylate plasticizers: 1 – CemPlast (two-stage introduction); 2 – CemPlast (single-stage introduction); 3 – PC-200 (single-stage introduction)

Таблица 1
Table 1

Типы бетонных смесей
Types of concrete mixtures

Типы смесей		
БСТ – бетонные смеси тяжелого бетона	БСМ – бетонные смеси мелкозернистого (песчаного) бетона	БСЛ – бетонные смеси легкого бетона

- значительное увеличение плотности бетона за счет оптимизации granulometрии смеси;
- улучшение технологических свойств (до и во время схватывания бетонной матрицы) с целью повышения плотности;
- уменьшения водоцементного отношения за счет оптимальной дозировки суперпластификаторов;
- повышение прочности при изгибе и растяжении и трещиностойкости за счет дисперсного армирования [15, 16].



Рис. 3. Испытание образцов-балочек на изгиб
Fig. 3. Bending test of beam samples



Рис. 4. Подготовленные образцы-кубы для испытания на сжатие
Fig. 4. Prepared samples-cubes for compression testing



Рис. 5. Испытание бетонных образцов на сжатие
Fig. 5. Compression testing of concrete samples

В данной работе применен порошково-активированный бетон, стойкий к агрессивным средам. Под агрессивной средой понимаются атмосферные осадки, вода, ультрафиолетовые лучи, химические реагенты и механическая нагрузка. Первые два фактора особенно разрушительны, если в составе содержатся сульфатные соединения.

Стойкость и долговечность строительных конструкций, эксплуатирующихся при воздействии специфических условий — коррозионно-опасных для данного объекта, определяются агрессивностью среды. Поэтому уточним термины, использующиеся в настоящем исследовании: под агрессивной средой (с характерным составом и физико-химическими свойствами) следует понимать вещества или смесь

Таблица 2
Table 2

Разновидности агрессивных сред
Types of aggressive environments

По физическому состоянию	По интенсивности воздействия	По виду воздействия
Газообразные	Неагрессивные	Химические
Жидкостные	Слабоагрессивные	Биологические
Твердые	Среднеагрессивные	Механические
	Сильноагрессивные	

Таблица 3
Table 3

Компоненты бетонной смеси
Components of the concrete mix

№ состава	Расход компонентов, %					
	СТ	Песок	Микрокремнезем	Фибра	В/Ц	CemPlast
1	29	49	6	1	0,4	3
2	29	46	9	1	0,4	3
3	43	35	6	1	0,3	3
4	36	42	6	1	0,3	3
5	36	39	9	1	0,3	3

веществ, обладающие коррозионной активностью, в результате воздействия на композит разрушающие строительные конструкции.

Коррозионная активность, или степень агрессивности среды, — это показатель, который может быть оценен как неагрессивная, слабоагрессивная, среднеагрессивная и сильноагрессивная среда. На практике степень агрессивности определяется как максимальное понижение механических и эксплуатационных характеристик. При этом коррозионная активность напрямую зависит от свойств строительных материалов. При конструировании особо плотных непроницаемых структур коррозионная активность снизится соответственно изменению структурных свойств.

Отсюда следует невозможность оценки коррозионной активности только методом наблюдения или экспертной оценки (визуально). Необходимо экспериментально определить свойства композита, максимально приближенные к условиям эксплуатации, но при этом максимально агрессивные по отношению к бетонам.

Под жестким режимом коррозии понимаем комплекс теоретических и экспериментальных методов и параметров, при котором проявляется максимальная коррозионная активность среды.

Классификация внешних воздействий и агрессивных сред подробнее рассмотрена в табл. 2.

В свою очередь, когда на конструкцию одновременно воздействует несколько агрессивных сред, то степень воздействия определяют по самой агрессивной из них. Более подробно агрессивные среды классифицируются в ГОСТ 31384—2017. Для устойчивости к агрессивным средам необходим достаточно

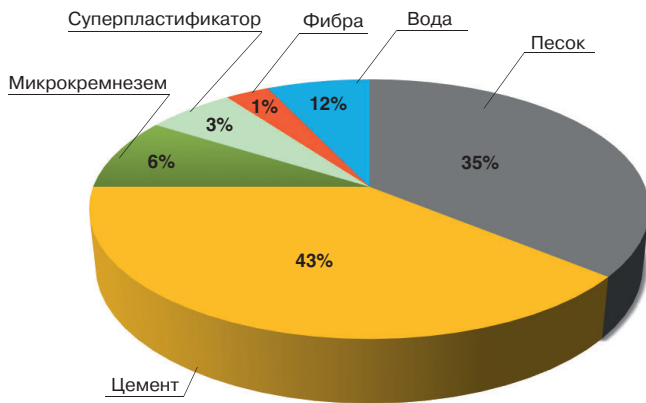


Рис. 6. Соотношение компонентов рационального состава порошково-активированного бетона

Fig. 6. The ratio of components of the rational composition of powder-activated concrete

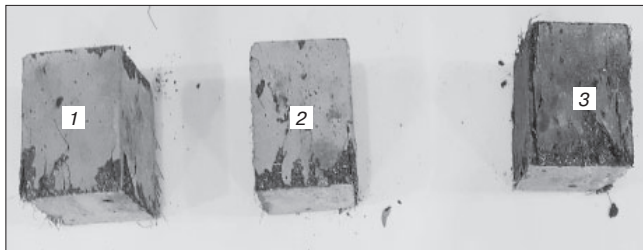


Рис. 7. Характер разрушения бетонов в агрессивных средах: 1 – без воздействия агрессивной среды; 2 – после воздействия керосина; 3 – после воздействия отработанного масла

Fig. 7. The nature of destruction of concrete in aggressive environments: 1 – without exposure to an aggressive environment; 2 – after exposure to kerosene; 3 – after exposure to used oil

прочный бетон, который может выдержать большие нагрузки, как постоянные так и переменные.

Поэтому первоначальные этапы исследования были направлены на определение основных принципов управления структурой композита на разных уровнях.

Известно, что строительно-технические свойства композитов функционального назначения, к которым относятся и коррозионно-стойкие, формируются в первую очередь при синтезе систем твердения под воздействием нескольких факторов, таких как: расход компонентов системы, тонкость помола дисперсных составляющих, технологические переделы (уплотнение и формование), условия набора прочности – длительность твердения, активации синтеза новообразований и др. [8].

На первом этапе планирования спроектирован состав матрицы первого рода в реакционно-порошковых бетонах, который представляет собой водно-дисперсную реологическую систему твердения (СТ). В большинстве случаев матрицы первого рода состоят из цементного вяжущего вещества, высокодисперсного порошка из горных пород или минералов, наноразмерной реакционно-активной добавки (чаще всего микрокремнезема) и жидкой фазы [1, 8, 16].

Сначала рассмотрели систему «тонкодисперсный минеральный компонент – цемент – вода». В качестве основного компонента было решено использовать активные доменные шлаки производства

**Таблица 4
Table 4**

**Матрица планирования и результаты исследований
Planning matrix and research results**

№ п/п	Строительно-технические свойства			
	Прочность при изгибе, МПа	Прочность при сжатии, МПа	Плотность, кг/м ³	Водопоглощение по объему, %
1	5,6	104,4	2215,4	2,6
	5,4	102,8	2215,4	2,6
2	4,75	106,5	2436,1	2,9
	4,8	106,4	2436,1	2,9
3	7,57	115	2458,5	2,1
	7,62	114,4	2458,5	2
4	6,92	109,4	2375,9	2,6
	6,9	110	2375,9	2,6
5	6,72	108,6	2222,1	2,8
	6,85	107,8	2222,1	2,8

ПАО «НЛМК». Результаты испытаний прочности и плотности СТ приведены на рис. 1 и 2.

При оптимизации систем твердения применяли пластификаторы PC-200 и CemPlast на основе поликарбоксилатов (в количестве 0,3–0,8% от массы цемента). Так как тонкодисперсные частицы шлаков обладают большой водопотребностью, то введение пластификаторов производилось по известной двухстадийной методике: сначала сухие компоненты смешивались с 2/3 жидкой фазы, а на второй стадии – с оставшимся количеством воды затворения.

Рационализация составов композитов была направлена на улучшение свойств базового состава: портландцемент ЦЕМ I 52,5Н, песок стандартный полифракционный, микрокремнезем МК-85, полипропиленовая щелочестойкая фибра, суперпластификатор CemPlast. Изготовление образцов для стандартных лабораторных испытаний осуществлялось согласно требованиям ГОСТ 10180–2012, ГОСТ 13087–2018, ГОСТ 18105–2018. Были проведены комплексные испытания образцов, изготовленных в лаборатории кафедры строительного материаловедения и дорожных технологий ЛГТУ, при температуре воздуха 20–22°C и относительной влажности 60–65%.

Общие сведения о расходе компонентов порошково-активированного бетона представлены в табл. 3.

Изготовленные таким образом лабораторные образцы-балочки направлялись для определения прочности при изгибе (рис. 3).

Следующим этапом было испытание образцов на сжатие. Из образцов-полубалочек были вырезаны образцы, соответствующие параметрам прессы (рис. 4, 5).

Результаты стандартных испытаний образцов порошково-активированного бетона представлены в сводной табл. 4.

В результате испытаний бетонных образцов после 2 мес твердения был выбран рациональный состав, подходящий для дальнейших исследований в агрессивной среде.

Процентное соотношение компонентов данного образца представлено на рис. 6.

Вывод

Таким образом, проведенные исследования позволили получить композиционный материал, обладающий рядом свойств, необходимых для эксплуатации в агрессивных средах: высокой прочностью при сжатии 115 МПа, прочностью при изгибе 7,62 МПа и водопоглощением 2% по объему.

Дальнейшие исследования были направлены на испытание полученных составов в различных органических агрессивных средах до и после воздействия отходов автодорожной отрасли (рис. 7).

Список литературы

1. Ерофеев В.Т., Максимова И.Н., Тараканов О.В., Санягина Я.А., Ерофеева И.В., Суздальцев О.В. Декоративно-отделочные порошково-активированные бетоны с зернистой фактурой поверхности // *Строительные материалы*. 2022. № 10. С. 25–40. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-807-10-25-40>
2. Суровцов М.М., Хамидулина Д.Д., Некрасова С.А., Морева Ю.А. Использование молотого доменного гранулированного шлака в цементном вяжущем // *Строительные материалы*. 2023. № 7. С. 43–48. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-815-7-43-48>
3. Иноземцев А.С., Королев Е.В. Сравнительный анализ влияния наномодифицирования и микродисперсного армирования на процесс и параметры разрушения высокопрочных легких бетонов // *Строительные материалы*. 2017. № 7. С. 11–15. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2017-750-7-11-15>
4. Филатов Е.Ф. Экспресс-методы прогнозирования активности цемента в заводской лаборатории // *Строительные материалы*. 2017. № 3. С. 46–48. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2017-746-3-46-48>
5. Грызлов В.С., Завьялова Д.В. Отсев дробления шлакового щебня как эффективный компонент бетона // *Строительные материалы*. 2018. № 5. С. 40–43. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2018-759-5-40-43>
6. Травуш В.И., Карпенко Н.И., Ерофеев В.Т., Ерофеева И.В., Максимова И.Н., Кондращенко В.И., Кесарийский А.Г. Исследование порошково-активированных бетонов методами лазерной интерферометрии // *Строительные материалы*. 2020. № 4–5. С. 18–28. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-780-4-5-18-28>

Таким образом, исследование строительно-технических свойств порошково-активированных композитов с использованием местного природного и техногенного сырья и изменение их структуры при эксплуатации в агрессивных средах позволило дополнить существующие методы повышения долговечности строительных конструкций.

В дальнейших исследованиях RPC, подверженных воздействию агрессивной среды, должны быть разработаны следующие направления:

- изучение влияния продолжительности воздействия агрессивных сред более шести месяцев;
- исследование изменений строительно-технологических свойств бетонов RPC, содержащих другие волокна, такие как базальтовое или углеродное волокно;
- изучение проницаемости и пористости реактивного порошкового бетона, подверженного воздействию агрессивной среды.

References

1. Erofeev V.T., Maksimova I.N., Tarakanov O.V., Sanyagina Ya.A., Erofeeva I.V., Suzdaltsev O.V. Decorative and finishing powder-activated concretes with a granular surface texture. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2022. No. 10, pp. 25–40. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-807-10-25-40>
2. Surovtsov M.M., Khamidulina D.D., Nekrasova S.A., Moreva Y.A. Use of ground granulated blast furnace slag in cement binder. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2023. No. 7, pp. 43–48. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-815-7-43-48>
3. Inozemtsev A.S., Korolev E.V. Comparative analysis of influence of nanomodification and micro-dispersed reinforcement on the process and parameters of destruction of high-strength lightweight concrete. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2017. No. 7, pp. 11–15. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2017-750-7-11-15>
4. Filatov E.F. Express-methods for forecasting cement activity in the plant laboratory. *Stroitel'nye Materialy* [Construction materials]. 2017. No. 3, pp. 46–48. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2017-746-3-46-48>
5. Gryzlov V.S., Zavalova D.V. Screenings of crushing of broken slag as an efficient component of concrete. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2018. No. 5, pp. 40–43. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2018-759-5-40-43>
6. Travush V.I., Karpenko N.I., Erofeev V.T., Erofeeva I.V., Maksimova I.N., Kondrashchenko V.I., Kesariyskiy A.G. Investigation of powder-activated concretes by laser interferometry methods. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2020. No. 4–5, pp. 18–28. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-780-4-5-18-28>

7. Агамов Р.Э., Гончарова М.А., Пачин А.Р. Высокопрочные фибробетоны в конструкциях общестроительного и специального назначения // *Строительные материалы*. 2023. № 1–2. С. 39–43. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-810-1-2-39-43>
8. Аль-Суррайви Х.Г.Х., Гончарова М.А., Заева А.Г. Синтез композитов на основе местного сырья при воздействии агрессивной среды // *Строительные материалы*. 2021. № 5. С. 69–74. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-791-5-69-74>
9. Гончарова М.А., Комаричев А.В., Карасева О.В. Композиционные инъекционные материалы с двухстадийной магнитной обработкой систем твердения // *Строительство и реконструкция*. 2017. № 6 (74). С. 114–120.
10. Синицин Д.А., Салов А.С., Терехов И.Г., Тимофеев А.А. Высокоэффективные бетоны нового поколения при строительстве зданий повышенной этажности в Республике Башкортостан // *Строительные материалы*. 2020. № 6. С. 8–12. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-781-6-8-12>
11. Балыков А.С., Низина Т.А., Макарова Л.В. Критерии эффективности цементных бетонов и их применение для анализа составов высокопрочных композитов // *Строительные материалы*. 2017. № 6. С. 69–75. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2017-749-6-69-75>
12. Goncharova M.A., Krokhotin V.V., Ivashkin A.N. The influence of fiber reinforcement on the properties of the selfcompacting concrete mix and concrete // *Solid State Phenomena*. 2020. Vol. 299, pp. 112–117. DOI: [10.4028/www.scientific.net/SSP.299.112](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.299.112)
13. Смирнов В.А., Королев Е.В. Иерархическое моделирование строительных материалов как дисперсных систем: специализированная программная реализация // *Строительные материалы*. 2019. № 1–2. С. 43–53. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-767-1-2-43-53>
14. Строкова В.В., Нецвет Д.Д., Нелюбова В.В., Серенков И.В. Свойства композиционного вяжущего на основе наноструктурированной суспензии // *Строительные материалы*. 2017. № 1–2. С. 50–54. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2017-745-1-2-50-54>
15. Травуш В.И., Карпенко Н.И., Ерофеев В.Т., Ерофеева И.В., Тараканов О.В., Кондращенко В.И., Кесарийский А.Г. Исследование трещиностойкости бетонов нового поколения // *Строительные материалы*. 2019. № 10. С. 3–11. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-775-10-3-11>
16. Агамов Р.Э., Гончарова М.А., Мраев А.В. Сталеплавильные шлаки как эффективное сырье в дорожном строительстве // *Строительные материалы*. 2023. № 1–2. С. 56–60. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-810-1-2-56-60>
7. Agamov R.E., Goncharova M.A., Pachin A.R. High-strength fiber-reinforced concrete in structures for general construction and special purposes. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2023. No. 1–2, pp. 39–43. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-810-1-2-39-43>
8. Al-Surrayvi H.G.H., Goncharova M.A., Zaeva A.G. Synthesis of composites on the basis of local raw materials under the influence of aggressive environment. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2021. No. 5, pp. 69–74. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-791-5-69-74>
9. Goncharova M.A., Komarichev A.V., Karaseva O.V. Composite injection materials with two-stage magnetic treatment of systems hardening. *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya*. 2017. No. 6 (74), pp. 114–120. (In Russian).
10. Sinitsin D.A., Salov A.S., Terekhov I.G., Timofeev A.A. Highly efficient new generation concretes in the construction of high-rise buildings in the Republic of Bashkortostan. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2020. No. 6, pp. 8–12. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-781-6-8-12>
11. Balykov A.S., Nizina T.A., Makarova L.V. Criteria of efficiency of cement concretes and their use for analyzing compositions of high-strength composites. *Stroitel'nye Materialy* [Construction materials]. 2017. No. 6, pp. 69–75. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2017-749-6-69-75>
12. Goncharova M.A., Krokhotin V.V., Ivashkin A.N. The influence of fiber reinforcement on the properties of the selfcompacting concrete mix and concrete. *Solid State Phenomena*. 2020. Vol. 299, pp. 112–117. DOI: [10.4028/www.scientific.net/SSP.299.112](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.299.112)
13. Smirnov V.A., Korolev E.V. Building materials as disperse systems: multiscale modeling with dedicated software. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2019. No. 1–2, pp. 43–53. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-767-1-2-43-53>
14. Strokova V.V., Netsvet D.D., Nelubova V.V., Serenkov I.V. Properties of composite binder based on nanostructured suspension. *Stroitel'nye Materialy* [Construction materials]. 2017. No. 1–2, pp. 50–54. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2017-745-1-2-50-54>
15. Travush V.I., Karpenko N.I., Erofeev V.T., Erofeeva I.V., Tarakanov O.V., Kondrashchenko V.I., Kesariyskiy A.G. The study of crack resistance of concretes of a new generation. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2019. No. 10, pp. 3–11. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-775-10-3-11>
16. Agamov R.E., Goncharova M.A., Mraev A.V. Steelmaking slags as an effective raw material in road construction. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2023. No. 1–2, pp. 56–60. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-810-1-2-56-60>

BETON В Москве состоялась XII Международная научно-практическая конференция по технологиям бетонов **BetONconf-2023**

6 октября в Москве в «Цифровом деловом пространстве» состоялось одно из ключевых мероприятий строительной отрасли – XII Международная научно-практическая конференция по технологиям бетонов *BetONconf-2023*. Организатором конференции традиционно выступила компания «Полипласт Новомосковск» – один из крупнейших производителей промышленной и строительной химии России.

В 2023 г. конференция объединила более четырехсот экспертов в области бетоноведения из разных городов и стран. В конференции приняли участие руководители и специалисты компаний – производителей товарного бетона, железобетонных изделий и конструкций, строительных растворов, а также представители смежных отраслей – производители цемента, оборудования и материалов. Также в мероприятии участвовали представители научного сообщества – профессора и преподаватели научно-исследовательских институтов, члены общественных организаций строительного комплекса, средства массовой информации.

Программа конференции состояла из трех сессий, которые включали в себя не только выступления спикеров, но и интерактивное общение, вопросы слушателей и обсуждение наиболее важных проблем отрасли. Так, заместитель генерального директора по науке НИИ СМиТ А.И. Вовк рассказал о новинках и тенденциях рынка добавок для бетона; технический директор «Полипласт Новомосковск» И.В. Вовк представила дорожную карту по замене сульфатостойкого цемента; заместитель начальника подотдела анализа нормативной документации ФГБУ «Росдортехнология» Т.Г. Кузьменко сделала доклад о состоянии нормативной базы по мостостроению; член экспертного совета Национальной ассоциации «Союз производителей бетона» А.Ю. Миронова предложила алгоритм действий при использовании заполнителей с низкими эксплуатационными характеристиками.

В выставочной зоне были представлены стенды официальных партнеров – компаний «Элкон», «Термоджет», «Тензотехсервис», НИИ СМиТ, а также информационные партнеры – профильные строительные СМИ.



наука и технологии

ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ

ПРЕДПРИЯТИЕ МАСТЕР БЕТОН

Основано в 1995 г.

ПРЕДСТАВЛЯЕТ применяемые в промышленном, гражданском, транспортном и других видах строительства, включая системы питьевого водоснабжения:

ОРГАНОМИНЕРАЛЬНЫЕ МОДИФИКАТОРЫ БЕТОНА МБ-01, МБ-С и ЭМБЭЛИТ, соответствующие ГОСТ Р 56178–2014, для получения малоцементных, высокопрочных, непроницаемых, коррозионно-стойких, напрягающих, расширяющихся, с частично компенсированной усадкой бетонов и растворов из высокоподвижных и самоуплотняющихся, обладающих высокой степенью сохраняемости и сегрегационной устойчивости бетонных смесей.

СУХИЕ СМЕСИ МОДИФИЦИРОВАННЫЕ МАСТЕРБЕТОН строительные, ремонтные поверхностные и инъекционные, торкретные, с металлической и полимерной фиброй, соответствующие ТУ 5745-001-43238963–2015, для бетонирования и ремонта конструкций строящихся и эксплуатируемых зданий и сооружений.

ОСУЩЕСТВЛЯЕТ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ СОПРОВОЖДЕНИЕ БЕТОННЫХ РАБОТ, включая консультации при проектировании, разработку технологии возведения, обследование и контроль качества железобетонных конструкций.



109518, г. Москва, Саратовская ул., д. 31
Тел./факс: +7 (499) 796-16-32
www.masterbeton-mb.ru
Email: info@masterbeton-mb.ru

Реклама

XI Международная научно-практическая конференция «Повышение эффективности производства и применения гипсовых материалов и изделий» состоялась в Карачаево-Черкесии



The XI International Scientific and Practical Conference "Increasing the Efficiency of Production and Use of Gypsum Materials and Products" was held in Karachay-Cherkessia

20–21 сентября в п. Архыз состоялась XI Международная научно-практическая конференция «Повышение эффективности производства и применения гипсовых материалов и изделий». Организаторами конференции выступили Российская гипсовая ассоциация, Российская академия архитектуры и строительных наук, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Научно-исследовательский институт строительной физики. Поддержку и помощь в организации и проведении мероприятия оказало Правительство Карачаево-Черкесской Республики.

Генеральным спонсором конференции традиционно является ООО «КНАУФ ГИПС». Компания КНАУФ отмечает в 2023 г. 30-летие своего пребывания в России и с первой конференции оказывает помощь в ее организации и проведении.

Официальными спонсорами стали производитель химических добавок «Полипласт» и машиностроительная компания PARGET MAKINA при поддержке компаний ВОЛМА, SAINT-GOBAIN, ALPHA PLATRE, ADDITIV PLUS. Производственным партнером в этом году стал Хабезский гипсовый завод.

Генеральным информационным партнером конференции выступил журнал «Строительные материалы»®.

On September 20–21, the XI International Scientific and Practical Conference "Increasing the efficiency of production and use of gypsum materials and products" was held in Arkhyz. The conference was organized by the Russian Gypsum Association, the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, the National Research Moscow State University of Civil Engineering, Research Institute of Building Physics. The Government of the Karachay-Cherkess Republic provided support and assistance in organizing and holding the event.

The general sponsor of the conference is traditionally KNAUF GIPS LLC. The KNAUF company celebrates the 30th anniversary of its presence in Russia in 2023 and, since the first conference, has been providing assistance in its organization and conduct.

The official sponsors were the manufacturer of chemical additives «Poliplast» and the engineering company PARGET MAKINA; with the support of VOLMA Company, SAINT-GOBAIN, ALPHA PLATRE, ADDITIV PLUS. The production partner this year was the Khabez Gypsum Plant.

The general information partner of the conference was the magazine "Construction Materials"®.

В конференции приняли участие 220 ученых и специалистов из шести стран. Было заслушано 26 докладов и сообщений на различные темы, связанные с техническими достижениями в области производства и применения гипсовых материалов и изделий; привлекательностью и механизмами инноваций в гипсовой отрасли; менеджментом качества, экологическим менеджментом и их ролью в обеспечении долговечности гипсовых материалов; обучением и переподготовкой специалистов в области производства и применения гипсовых материалов и изделий.

С приветственным словом к организаторам и участникам конференции обратился министр промышленности, энергетики и транспорта Карачаево-Черкесской Республики **М.Р. Гапов**. Он отметил, что отрасль промышленности строительных материалов в масштабах республики приобретает все большее значение, так как является одним из основных источников налоговых платежей в бюджет и обеспечивает занятость более 16% трудоспособного населения. Карачаево-Черкесия занимает лидирующие позиции в стране по производству строитель-



С приветственным словом выступили председатель **Ю.А. Гончаров** и исполнительный директор Российской гипсовой ассоциации **А.Ф. Бурьянов**





Руководитель службы корпоративных коммуникаций КНАУФ Л.М. Лось отметил, что благодаря значительным инвестициям за последние три десятилетия гипсовая отрасль России вышла на мировой уровень технологий и качества.

Е.Н. Ботка (ген. директор ООО «Строительная информация», Санкт-Петербург) представил обзорный доклад по рынку гипсовых строительных материалов



Министр промышленности, энергетики и транспорта Карачаево-Черкесской Республики М.Р. Гапов



С докладом, в котором проводится детальный разбор применения строительных систем с листовыми материалами на основе гипса в жилом строительстве, выступил руководитель продукт-менеджмента российского КНАУФ **Д.А. Цюрупа**. В частности, он рассказал о применении каркасно-обшивных конструкций в жилом многоэтажном строительстве; объяснил, почему их применение может ускорить ввод новостроек в эксплуатацию и как с помощью таких конструкций снижается нагрузка на фундамент и перекрытия здания.



Вручение памятного знака Российской гипсовой ассоциации спонсору конференции команде «Полипласт Новомосковск». Слева направо: **Ю.А. Гончаров** (председатель РГА), **В.А. Борисов** (руководитель технической службы), **Е.К. Бахтина** (технический менеджер), **Д.Ю. Фирсаев** (коммерческий директор РПП и ПК)

ных материалов, в частности гипса и цемента. Основными предприятиями, которые с успехом производят высококачественную продукцию, обеспечивают рабочие места и вносят значимый вклад в развитие региона, являясь крупнейшим производителем цемента на Северном Кавказе – АО «Кавказцемент» и ОАО «Хабезский гипсовый завод» – уверенный лидер на рынке гипсовых строительных материалов, производственную площадку которого участники посетили во второй день конференции.

От лица организаторов выступил исполнительный директор Российской гипсовой ассоциации **А.Ф. Бурьянов**. Он подчеркнул, что современную строительную индустрию невозможно представить без гипсового направления, которое в нашей стране динамично развивается общими усилиями государства и бизнеса. Основные цели проведения конференции остаются неизменными: установление новых и укрепление состоявшихся контактов участников мероприятия, обсуждение инновационных решений и технологических приемов, привлечение



А.О. Адамцевич (директор НИИ СМиТ НИУ МГСУ, Москва) в своем выступлении осветил перспективу развития технологичной строительной 3D-печати с применением материалов для аддитивного строительного производства на основе гипса. Отмечен потенциал более чем трехкратного роста объемов мирового рынка строительной 3D-печати в перспективе ближайших десяти лет и рассмотрены наиболее перспективные области применения гипсовых материалов в аддитивном строительном производстве. В том числе: использование гипса при производстве материалов для аддитивного строительного производства на комплексных вяжущих (ГЦПВ), печать внутренних перегородок и декоративных элементов зданий и сооружений, печать малых архитектурных форм.

внимания к проблемам отрасли, формирование научных коллективов для эффективного ведения инновационных проектов, обеспечение возможности обновления научных кадров за счет активного привлечения молодых ученых, аспирантов, магистрантов и студентов.

О тенденциях и перспективах развития материалов на гипсовой основе рассказал в своем докладе научный руководитель НИИ СМиТ НИУ МГСУ **А.П. Пустовгар**. Несмотря на ежегодный рост строительной отрасли и широкое использование материалов на основе гипса в строительстве, таких как гипсовые плиты, сухие строительные смеси на основе гипсовых вяжущих, гипсокартонные листы и т. д., отмечается отсутствие роста потребления рассматриваемых материалов. Прогнозы показывают, что спрос на гипсовые материалы в настоящее время стабилизировался и для его увеличения необходим поиск новых областей



Отрадно, что, несмотря на санкции, конференция сохранила статус международной. Глава представительства в РФ французской машиностроительной компании Alpha Platre **Марианна Дгебуадзе** осветила в своем докладе принцип работы промышленного теплового насоса, в котором энергия восстанавливается за счет феномена компрессии/разрежения.

Интерес вызвал доклад **Э.В. Полуиева** (рук. проекта ООО «Скайград Инновации», г. Королев) о комплексной переработке фосфогипса, который является многотоннажным отходом производства минеральных удобрений. На отдельных предприятиях количество получаемого фосфогипса в год достигает миллионов тонн. Поэтому перспективной является разработка комплексной безотходной технологии переработки как отвального, так и текущего фосфогипса и организация промышленного производства искусственного гипсового камня после выделения из него группового редкоземельного концентрата (ГРЗК).



Представители «гипсовой» науки доктора технических наук **И.В. Недосеко** (Уфа), **В.Б. Петропавловская** (Тверь), **В.Г. Хозин** (Казань), **С.В. Самченко** (Москва) и молодые специалисты канд. техн. наук **К.С. Петропавловский** и аспирант **В.А. Данякин**

применения. В мировой практике все больше людей ориентируется на использование материалов, которые имеют низкий углеродный след и помогают сократить негативное воздействие на окружающую среду. Гипсовые материалы считаются экологически чистыми, так как они являются негорючими и не выделяют вредных веществ при производстве. Рост интереса к экологической устойчивости может стать одним из драйверов увеличения спроса.

С докладом на тему «Гипсовые композиты для улучшения среды обитания человека» выступил заслуженный деятель науки РФ, член-корреспондент РААСН, д-р техн. наук **В.С. Лесовик**. Он подчеркнул, что использование гипсовых вяжущих позволяет не только улучшить экологию, но и оптимизировать систему «человек–материал–среда обитания», исследование которой возможно за счет науки геоники (геомиметики).

Набирающим популярность трендом в 2023 г. стало обсуждение на научных конференциях темы технологии аддитивного строительного производства (3D-печати). Целый ряд докладов по этому направлению был представлен вниманию участников.

Наиболее применяемым в строительстве вяжущим является цемент, однако производство этого материала связано со значительным объемом выбросов CO₂. В условиях роста численности мирового населения этот факт приводит ко все большему усилению негативного влияния строительной отрасли на экологию. Особенно это актуально для быстроразвивающихся стран, где реализуются масштабные программы инфраструктурного раз-

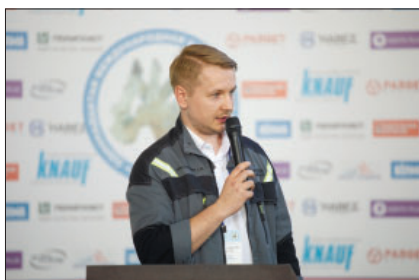
вития. Другая не менее значимая проблема современной строительной отрасли – низкая производительность труда из-за высокой доли производственных процессов, выполняемых вручную, что в условиях увеличения объемов строительства приводит к все большему дефициту кадров. Развитие технологий строительной 3D-печати может стать путем решения обозначенных проблем.

Доклад на тему «Оценка долговечности композиций на гипсовой основе для строительной 3D-печати» представил д-р техн. наук, профессор **И.В. Недосеко** (Уфа). Было отмечено, что немаловажной проблемой в настоящее время остается отсутствие апробированных инженерных методик по оценке несущей способности напечатанных стен, тем более с различной конфигурацией и внутренним заполнением.

По-прежнему конференция является местом притяжения научного сообщества. В этом году доклады представили ученые Московского государственного строительного университета, Уфимского государственного нефтяного технического университета, Владимирского государственного университета им. А.Г. и Н.Г. Столетовых, технических университетов Твери, Ижевска, Нижнего Новгорода, а также ученые, работающие в промышленных корпорациях.

В докладе д-ра техн. наук **В.Б. Петропавловской** (Тверь) отмечено, что композиционные гипсовые смеси в настоящее время вызывают повышенный интерес по причине больших возможностей в области их модификации и обеспечения требуемых





С.В. Арасланкин (ген. директор ООО «Эксплонтента», Рузаевка, Республика Мордовия) представил доклад о механизме деструкции и окисления крахмала для производства гипсокартонных листов



Л.В. Закревская, заведующая кафедрой «Архитектура» Института Архитектуры, Строительства и Энергетики (Владимир), со студенткой **Е.А. Репиной**



Никакие современные средства коммуникации не могут заменить живого общения. На гипсовой конференции встреча с нашими давними друзьями и авторами – **С.В. Фёдоровым** (Санкт-Петербург) и **В.П. Сучковым** (Нижний Новгород). Они презентовали книгу «Фосфогипс и фосфополугидрат»

эксплуатационных свойств. В этой связи целесообразно рассматривать способы получения эффективных гипсовых композиций через сочетание различных подходов к их проектированию, в том числе через исследование гранулометрических составов с использованием возможностей моделирования.

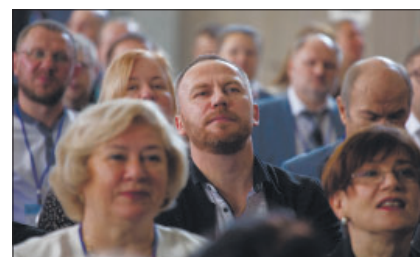
Интересная тема самоармирования гипсового камня с возможностью получения новых видов высокопрочных конструкционных и отделочных материалов, таких как 3D-панели, перемычки, плиты и блоки, а также архитектурно-декоративных элементов по упрощенным технологиям, представлена в докладе канд. техн. наук **К.С. Петропавловского**. Такой способ самоармирования предполагает дополнительное упрочнение гипсового материала, осуществляемое в процессе его структурообразования.

Развитие строительных технологий сопряжено с поиском и разработкой качественно новых материалов на основе гипсовых вяжущих с применением композиций с современными органоминеральными модификаторами. Изучению данного вопроса и разработке таких модификаторов с применением активированных отходов топливной промышленности (высококальцевой золы) посвящено исследование **П.А. Каляскина**.

В рамках проведения конференции состоялась церемония принятия новых членов Российской гипсовой ассоциации. Ими стали ООО «Гипсолит» (Кабардино-Балкарская Респ., г.п. Тырныауз); ООО «Кемпартнерс» (Москва); ООО «Аддитив плюс» (г. Подольск, Московская обл.); ООО «Сен-Гобен Строительная Продукция Рус» (Москва).



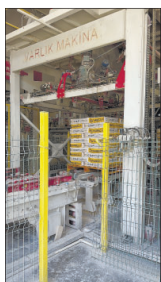
Вручение свидетельства о членстве в РГА ООО «Гипсолит» (генеральный директор **А.А. Акберов** и технический директор **Х.М. Тохаев**) и ООО «Кемпартнерс» (менеджер по продажам **Ю.В. Денисов**)





В рамках проведения конференции были подведены итоги конкурса научно-практических статей «Технологическая безопасность гипсовой отрасли: результаты научных исследований, развитие технологии и оборудования, применение гипсовых материалов в строительстве», проведенного журналом «Строительные материалы», компанией КНАУФ и Российской гипсовой ассоциацией. Конкурсные статьи были опубликованы в период с августа 2022 г. по август 2023 г. Победителями стали коллективы из Ижевска, Твери и Белгорода: 1-е место присуждено коллективу авторов – А.Ф. Гординой, И.С. Полянских, Н.С. Жуковой, Г.И. Яковлеву за статью «Исследование влияния пуццоланового компонента на структуру и состав модифицированных сульфатных матриц» (Строительные материалы. 2022. № 8. С. 51–58); 2-е место – В.Б. Петропавловской, М.Ю. Завадько, Т.Б. Новиченковой, К.С. Петропавловскому, А.Ф. Бурьянову, статья «Перспективы применения переработанных топливных золошлаковых отходов гидроудаления в сухих строительных смесях. Часть 1» (Строительные материалы. 2023. № 4. С. 73–79); 3-е место – С.А. Отман Азми, Н.В. Чернышевой, М.Ю. Дребезговой, Е.В. Коваленко, С.В. Масалитиной, «Состав и свойства композиционного гипсового вяжущего повышенной водостойкости» (Строительные материалы. 2023. № 5. С. 81–88). Победителям вручены ценные подарки от компании КНАУФ и годовая подписка на журнал «Строительные материалы».





Выездная сессия конференции состоялась на ОАО «Хабезский гипсовый завод», который по праву считается одним из лучших в России. Участников приветствовал генеральный директор **А.Ю. Китов** и технический персонал предприятия.

Компания «Хабез Гипс» успешно работает на рынке сухих смесей с 1991 г. Высокотехнологичное российское и импортное оборудование завода позволяет ежемесячно производить до 25 тыс. т строительного гипса, качественного гипсового вяжущего на основе природного гипса, сухих штукатурных смесей, финишной шпаклевки, самовыравнивающихся наливных полов, плиточного клея, пазогребневых плит и др. Всего завод выпускает более 40 видов продукции. Весь ассортимент соответствует самым высоким требованиям, что подтверждается соответствующими сертификатами и декларациями. В начале 2023 г. на базе предприятия была открыт новый цех по производству гипсокартонных листов мощностью 15 млн м²/г.



Наличие собственной сырьевой базы – карьера с залежами гипсового камня и известнякового карьера – дает возможность удерживать цены продукции на конкурентном уровне и полностью контролировать все этапы, от добычи сырья до производства продукции. Камень дробится на выработке и доставляется на завод автотранспортом.

Специалисты и инженеры предприятия постоянно внедряют новые технологии и методы в процесс производства гипса, а непрерывность контроля в испытательной лаборатории за качеством каждой партии продукции позволяет гарантировать потребителям соответствие заявленным качественным характеристикам. Строительные материалы торговой марки «HabezGips» активно конкурируют с лучшими российскими и зарубежными производителями.

С 2005 г. ООО «Хабезский гипсовый завод» является членом Российской гипсовой ассоциации.



Владелец Хабезского гипсового завода **О.А. Аргунов** с главным редактором журнала «Строительные материалы» **Е.И. Юмашевой**



Фото Г. Приходько



Фото Г. Приходько

Т.А. Абакумова
Фото автора,
организаторов

А.Ф. ГОРДИНА¹, канд. техн. наук, доцент (gism56@mail.ru),
Г.И. ЯКОВЛЕВ¹, д-р техн. наук, профессор (gyakov@istu.ru), Г.Н. ПЕРВУШИН¹, д-р техн. наук (isf@istu.ru),
А.Н. ГУМЕНЮК¹, канд. техн. наук (gumeniuk.an@gmail.com), В.М. УКРАИНЦЕВА¹, аспирант (venemara@mail.ru);
А.Ф. БУРЬЯНОВ², д-р техн. наук, профессор (rga-service@mail.ru)

¹ Ижевский государственный технический университет им. М.Т. Калашникова (426069, г. Ижевск, ул. Студенческая, 7)

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

Неавтоклавный газобетон на основе сульфатсодержащего техногенного отхода

Представлены результаты исследования влияния комплексной модификации на структуру и свойства неавтоклавного газобетона, полученного на основе отхода производства плавиковой кислоты – фторангидрита. Доказана эффективность использования водных суспензий хризотилых и базальтовых волокон в диапазоне от 0,1 до 0,5% от массы вяжущего, обеспечивающих прирост прочностных характеристик до 30% по сравнению с контрольным составом. Отмечено изменение характера морфологии в контактной зоне на границе волокно–продукты гидратации, обеспечивающее положительные изменения физико-механических характеристик модифицированных составов.

Ключевые слова: неавтоклавный газобетон, техногенное вяжущее, фторангидрит, комплексная модификация, хризотилые волокна, базальтовые волокна.

Работа выполнена при поддержке Гранта Президента РФ (Грант МК-3391.2022.4).

Для цитирования: Гордина А.Ф., Яковлев Г.И., Первушин Г.Н., Гуменюк А.Н., Украинцева В.М., Бурьянов А.Ф. Неавтоклавный газобетон на основе сульфатсодержащего техногенного отхода // *Строительные материалы*. 2023. № 10. С. 42–46.

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-818-10-42-46>

A.F. GORDINA¹, Candidate of Sciences (Engineering), Docent (gism56@mail.ru), G.I. YAKOVLEV¹, Doctor of Sciences (Engineering), Professor (gyakov@istu.ru), G.N. PERVUSHIN¹, Doctor of Sciences (Engineering) (isf@istu.ru), A.N. GUMENIUK¹, Candidate of Sciences (Engineering) (gumeniuk.an@gmail.com), V.M. UKRAINTSEVA¹, Postgraduate (venemara@mail.ru); A.F. BURIANOV², Doctor of Sciences (Engineering), Professor (rga-service@mail.ru)

¹ Izhevsk State Technical University named after M.T. Kalashnikov (7, Studencheskaya Street, Izhevsk, 426069, Russian Federation)

² National Research Moscow State University of Civil Engineering (26, Yaroslavskoye Shosse, Moscow, 129337, Russian Federation)

Non-Autoclaved Aerated Concrete Based on Sulfate-Containing Technogenic Waste

The results of a study of the influence of complex modification on the structure and properties of non-autoclaved aerated concrete obtained from waste from the production of hydrofluoric acid – fluoroanhydrite – are presented. The effectiveness of using aqueous suspensions of chrysotile and basalt fibers in the range from 0.1 to 0.5% by weight of the binder, providing an increase in strength characteristics of up to 30% compared to the control composition, has been proven. A change in the nature of the morphology in the contact zone at the fiber-hydration products boundary, providing positive changes in the physical and mechanical characteristics of the modified compositions, was noted.

Keywords: non-autoclaved aerated concrete, technogenic binder, fluorohydrite, complex modification, chrysotile fibers, basalt fibers.

The work was executed with the support of a Grant from the President of the Russian Federation (Grant МК-3391.2022.4).

For citation: Gordina A.F., Yakovlev G.I., Pervushin G.N., Gumeniuk A.N., Ukraintseva V.M., Burianov A.F. Non-autoclaved aerated concrete based on sulfate-containing technogenic waste. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2023. No. 10, pp. 42–46. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-818-10-42-46>

Основная тенденция строительного производства направлена на повышение энергоэффективности строительных объектов за счет оптимизации инженерных систем и рационализации ограждающих конструкций. Повышение энергоэффективности конструкций возможно за счет использования теплоизоляционного материала с требуемыми теплотехническими характеристиками. В условиях действия санкций актуальным становится поиск альтернативных составов для производства материалов, включая полное или неполное замещение части вяжущего на порошкообразные отходы производства.

Также эффективным можно считать производство, исключающее высокие энергозатраты на обжиг, автоклавирование изделий. Такие параметры возможно сочетать при производстве неавтоклавного газобетона с оптимизированными посредством модификации свойствами. Производство строительных матери-

алов на основе отходов промышленности позволяет решить целый ряд задач, таких как снижение затрат и соответственно выпуск конкурентоспособной продукции, решения по утилизации.

Для снижения экологической нагрузки в местах складирования отходов промышленности предлагается производство неавтоклавного газобетона, плотность которого обеспечена на уровне 600 кг/м³ за счет применения: 25–30% золы-уноса; 20–30% цемента; 15–20% негашеной извести; 4% гипса и 15–20% остатков пиролиза бурового шлама, образующегося при добыче нефти. Данный отход производства имеет достаточную пуццолановую активность для обеспечения требуемых физико-технических характеристик [1].

Существует значительное количество работ, посвященных расширению сырьевой базы при изготовлении неавтоклавных ячеистых бетонов, при этом повышение их эффективности возможно за счет

применения модифицирующих дисперсных отходов, таких как зола-уноса, геополимеры, фосфогипс, пылевидные отходы, гранитная пыль, позволяющих регулировать плотность, водопоглощение, прочность, теплопроводность [2].

Для оптимизации структуры и свойств изделий на основе неавтоклавного газобетона практикуют применение модификаторов протяженной геометрической формы. Так, неавтоклавный газобетон, полученный на основе цемента в количестве 50% в сочетании с известью 45–50%; алюминиевой пудрой 0,08%; каустической содой 0,05–1% и суперпластификатором 0,8%, армировали стекловолокном диаметром 75 мкм и дополнительно асбестовым волокном. Определена оптимальная длина волокна в 1 см, при предлагаемой технологии введения волокно равномерно распределяется в объеме материала [3].

Техногенные отходы в дисперсной форме также возможно использовать в виде вяжущего для приготовления неавтоклавного газобетона. Например, порошкообразный фосфогипс может служить сырьем для получения изделий плотностью 700 кг/м^3 при использовании 15% цемента; 30% гранулированного доменного шлака; 55% фосфогипса; 7% извести; 1,6% сульфата натрия и 0,074% алюминиевой пудры. При данных соотношениях прочность, морозостойкость и теплопроводность изделий соответствуют нормам, однако установлена высокая усадка, которая требует дополнительной оптимизации [4].

Подобный подход использования альтернативных цементу вяжущих применяется и за рубежом; так, в Индонезии предлагается использовать портландцемент в количестве 34%, фосфогипс – отход производства фосфорной кислоты местной компании производителя – 35% и негашеную известь 10% для производства неавтоклавного газобетона плотностью 806 кг/м^3 и прочностью 2,1 МПа [5].

Перспективным является использование отходов, таких как фторангидрит, в качестве вяжущих при изготовлении строительных материалов и изделий. Фторангидрит – многотоннажный отход производства, который без дополнительного обжига и обработки схватывается и твердеет, обеспечивая прочность на 28-е сут – 11 МПа, и ее можно повысить за счет введения оптимально подобранных активаторов твердения, например строительного гипса [6].

Возможным подходом к улучшению свойств вяжущих веществ на фторангидритовой основе является использование углеродсодержащих модификаторов, позволяющих достичь требуемых характеристик посредством формирования оптимальных гидратных новообразований [7, 8].

Регулирование гидрофизических свойств сульфатсодержащих вяжущих достигается посредством использования техногенных добавок, обеспечивающих объемную пропитку гидрофобными компонентами при термической обработке, что возможно при использовании модификаторов в виде технической серы [9].

Технология производства неавтоклавного газобетона позволяет изготавливать рациональные материалы, преимуществом которых является относительная дешевизна используемого оборудования, простота технологии изготовления и адаптивность технологии к утилизации отходов [10].

Цель исследований – оценка возможности создания неавтоклавного газобетона на основе техногенного вяжущего в виде фторангидрита, физико-механические характеристики которого сопоставимы с современными материалами.

Материалы и методы

В работе в качестве вяжущего применялся фторангидрит, являющийся сопутствующим отходом производства ООО «Галоген», г. Пермь. Для изготовления образцов осуществлялся домол вяжущего в лабораторной мельнице. Тонкость помола характеризуется остатком на сите 0,4 мм менее 13 мас. %. Компонентный состав представлен: $\text{CaSO}_4(\gamma\text{-CaSO}_4=20\%;$ $\beta\text{-CaSO}_4=78\%); \text{CaF}_2=1,8\%; \text{H}_2\text{SO}_4=1,2\%.$

В качестве газообразующей добавки использовалась алюминиевая суспензия в виде алюминиевой пудры и сульфанола. Концентрация алюминиевой пудры была выбрана на основе ранее проведенных исследований [11] и вводилась в количестве 0,5 и 1%.

Для активации процесса гидратации и набора прочности техногенного вяжущего использовался водный раствор фосфата натрия. Концентрация раствора варьировалась от 1 до 3%, с шагом 1%.

Для определения прочностных характеристик исследуемых составов изготавливались образцы-балочки размерами $40 \times 40 \times 160$ мм и образцы-кубы размерами $100 \times 100 \times 100$ мм. Испытания проводились на лабораторном прессе ПГМ-100МГ4 со скоростью нагружения 1 МПа/с. Для определения теплопроводности и термического сопротивления исследуемых образцов использовался измеритель теплопроводности ИТП-МГ4 «100».

Изучение физико-химических свойств матрицы на основе фторангидрита осуществлялось посредством растровой электронной микроскопии, энергодисперсионного анализа, инфракрасной спектроскопии. Растровые электронные изображения микроструктуры были получены с помощью автоэмиссионного растрового электронно-ионного (FIB) микроскопа Scios в Федеральном научно-исследовательском центре «Кристаллография и фотоника» РАН и ThermoFisher Scientific Quattro S (Центр коллективного пользования «Центр физических и физико-химических методов анализа, исследования свойств и характеристик поверхности, наноструктур, материалов и изделий» УдмФИЦУрО РАН). Инфракрасные спектры были получены с помощью спектрометра «IRAffinity-1».

Обсуждение результатов

Исследования физико-механических свойств газобетона при варьировании компонентов – содержа-

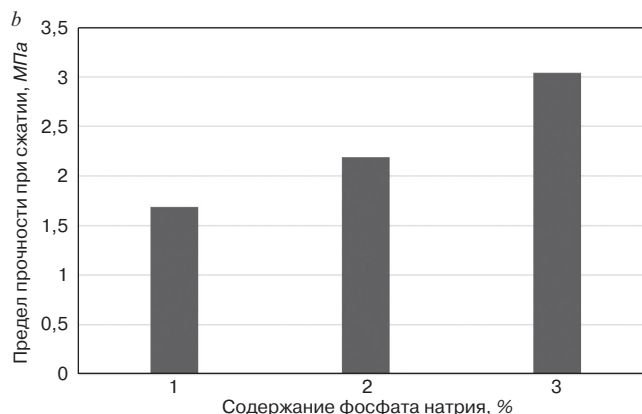
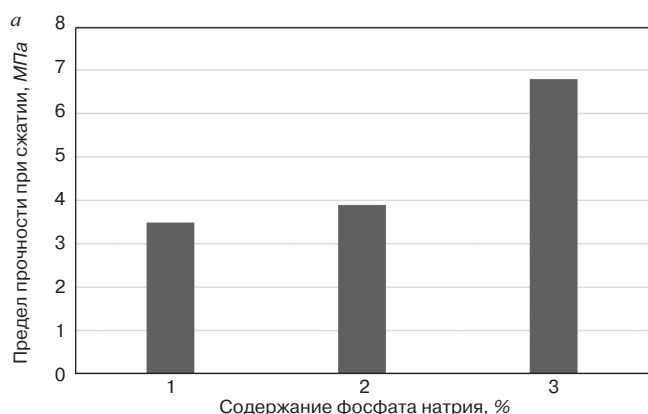


Рис. 1. Зависимость прочности образцов газобетона на фторангидридном вяжущем при различном содержании алюминиевой пудры: *a* – 0,5%; *b* – 1%
Fig. 1. Dependence of the strength of aerated concrete samples on fluoroanhydrite binder at different contents of aluminum powder: *a* – 0.5%; *b* – 1%

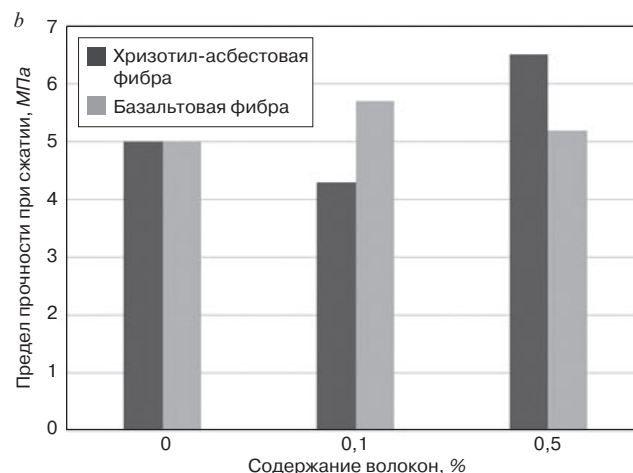
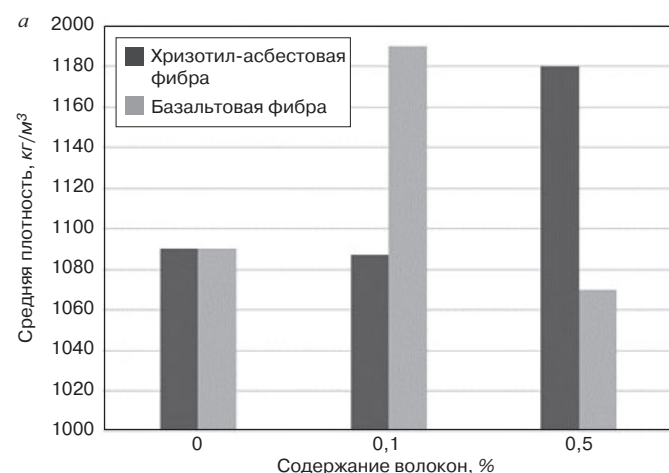


Рис. 2. Физико-механические свойства газобетона на основе фторангидрита, армированного волокнами хризотил-асбеста и базальта: *a* – средняя плотность; *b* – предел прочности при сжатии
Fig. 2. Physico-mechanical properties of aerated concrete based on fluoroanhydrite, reinforced with chrysotile asbestos and basalt fibers: *a* – average density; *b* – compressive strength

ния алюминиевой пудры и фосфата натрия приведены на рис. 1.

Проанализировав полученные данные, можно сделать вывод, что увеличение концентрации алюминиевой пудры до 1% и фосфата натрия до 3% позволяет достичь предела прочности при сжатии в возрасте 28 сут 3 МПа, обеспечить коэффициент теплопроводности 0,15–0,2 Вт·м/К и среднюю плотность образцов 1100 кг/м³.

Предложенные составы не отвечают требованиям по прочности; с целью повышения механических свойств в состав были включены минеральные дисперсные добавки на основе базальтового или хризотил-асбестового волокна.

Для равномерного распределения армирующего волокна в объеме газобетона изготавливались водные суспензии. В исследовании применялся хризотил сорта 7-370 Баженовского месторождения, соответствующий требованиям ГОСТ 12871–2013 «Хризотил. Общие технические условия». В качестве базальтового волокна использовался отход производства базальтовой ваты предприятия ООО «Воткинский завод теплоизоляционных материалов» (д. Кварса, Удмуртия).

Исследования физико-механических свойств составов позволили установить закономерности, приведенные на рис. 2.

Установлено, что введение хризотил-асбестового волокна (ХА) в концентрации 0,1% не оказывает существенного влияния на механические свойства газобетона, при этом увеличение концентрации до 0,5% обеспечивает рост прочностных характеристик на 30% в сравнении с бездобавочным контрольным составом. При введении суспензии базальтовой фибры (БФ) установлен обратный характер зависимости.

Для установления механизма влияния минеральных армирующих компонентов на структуру и состав газобетона был проведен комплекс физико-химических исследований (рис. 3, таблица).

Сравнительный анализ результатов показывает, что введение армирующих минеральных добавок приводит к незначительному изменению состава газобетона, о чем свидетельствует смещение волновых чисел, характерных для колебаний гидроксильных и сульфатных групп (рис. 3). Введение дисперсных волокон, вероятно, инициирует формирование аморфных продуктов на границе раздела фаз волокно–

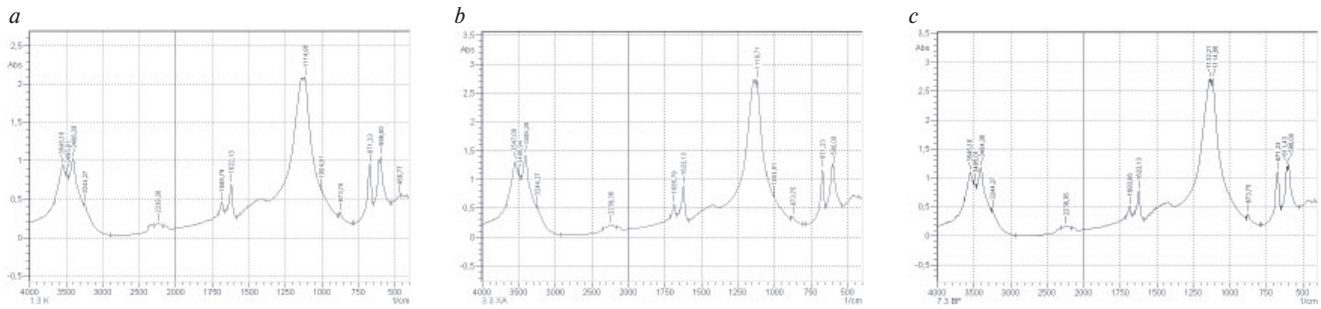


Рис. 3. ИК-спектральный анализ образцов газобетона на основе фторангидрита: *a* – контрольный состав; *b* – состав, армированный 0,5% хризотил-асбестовых волокон; *c* – состав, армированный 0,1% базальтовой фибры
Fig. 3. IR spectral analysis of aerated concrete samples based on fluoride: *a* – control composition; *b* – composition reinforced with 0.5% chrysotile asbestos fibers; *c* – composition reinforced with 0.1% basalt fiber

Характеристические линии поглощения составов на основе фторангидрита
Characteristic absorption lines of compositions based on acid fluorite

Группировка	Волновые числа, см ⁻¹		
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>
Симметричные и асимметричные валентные колебания ОН-групп	3545,16; 3495,01; 3406,29; 3244,27	3547,09; 3496,94; 3406,29; 32244,27	3545,16; 3495,01; 3404,36; 3244,27
Деформационные колебания молекул Н ₂ О	1685,79; 1622,13		1683,86; 1622,13
Карбонаты СО ₃ ²⁻	1400–1450; 873,75		
Сульфаты SO ₄ ²⁻	1114,86; 1004,91; 671,23; 596	1118,71; 1004,91; 671,23; 596	1132,21; 1114,86; 671,23; 611,43; 596
Оксиды металлов (СаО, Al ₂ O ₃ и др.)	466,77		

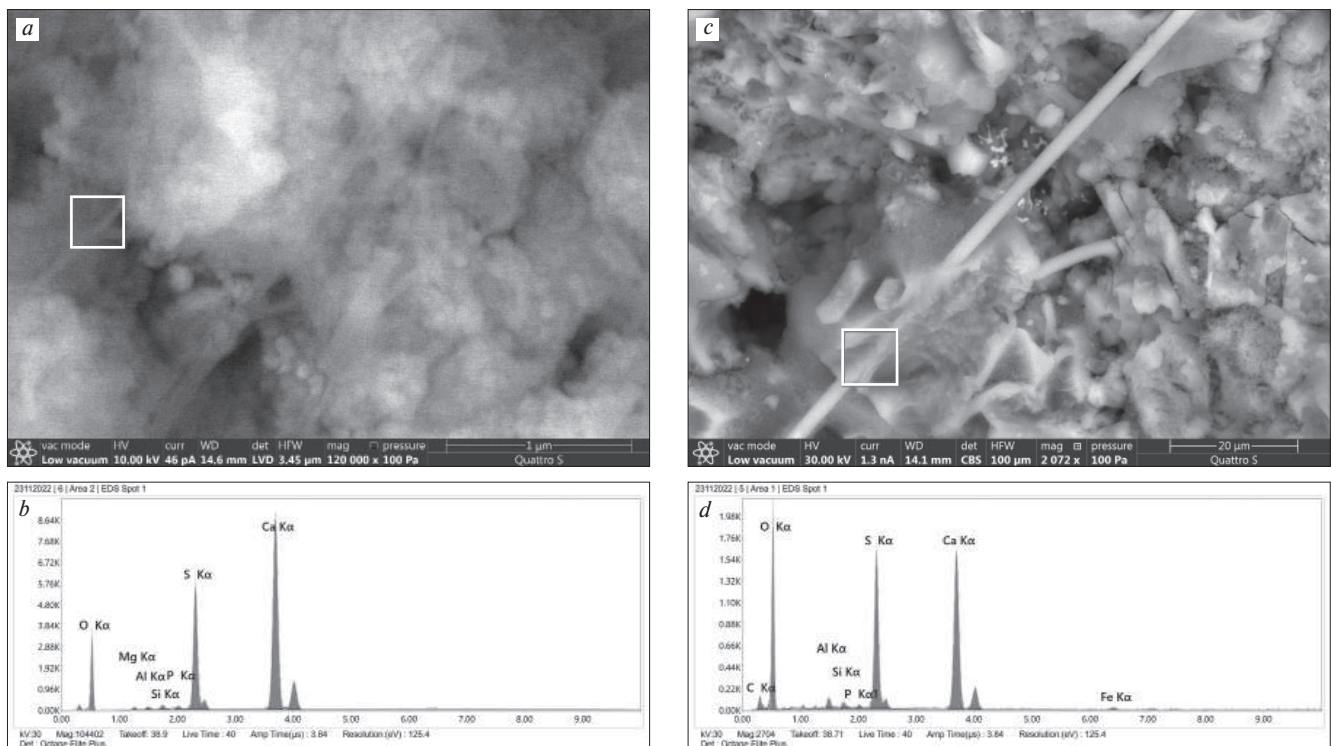


Рис. 4. Результаты энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии газобетона с привязкой к микроструктуре в области микроанализа: *a, b* – при введении 0,5% хризотил-асбестовой фибры; *c, d* – при введении 0,1% базальтовой фибры
Fig. 4. Results of energy-dispersive X-ray spectroscopy of aerated concrete with reference to the microstructure in the field of microanalysis: *a, b* – with the introduction of 0.5% chrysotiles-bestos fiber; *c, d* – with the introduction of 0.1% basalt fiber

матрица, которые способствуют адгезии компонентов и заполнению стенок пор более прочными частицами, таким образом обеспечивая повышение механических свойств.

Проведенный микроанализ поверхности волокон в объеме матрицы позволил подтвердить формирова-

ние аморфных продуктов на поверхности армирующих компонентов (рис. 4).

Локальная съемка микроструктуры образца позволила установить, что в контактной зоне волокно–минеральная матрица наряду с основными кристаллогидратами гипса формируются новообразования

на основе силикатов алюминия или магния. При этом стоит отметить, что толщина аморфных компонентов незначительна (не превышает 1 мкм), формируется только по поверхности волокна, в связи с содержанием химических элементов не превышает 1,5%.

Выводы

Проведенный комплекс исследований подтвердил возможность создания газобетонных изделий на основе техногенного вяжущего материала – фторангидрита. Установлено, что при введении в состав фторангидрита 3% раствора фосфата натрия с 1% суспензией алюминиевой пудры образцы газобетона характеризуются физико-механическими параметрами, сопоставимыми с существующими аналогами. Для улучшения прочностных параметров разработанного состава газобетона возможно применение суспензий минеральных армирующих волокон хризотиласбеста и базальтового волокна. Минеральное волокно распределяется в стенках пор и пустот газобетона, при этом имеет хорошую адгезию к матрице вяжущего состава. Введение волокон способствует повышению предела прочности при сжатии до 30% без увеличения плотности составов.

Список литературы / References

1. Chao-qiang Wang, Xiao-yan Lin, Dan Wang, Ming He, Si-lan Zhang, Utilization of oil-based drilling cuttings pyrolysis residues of shale gas for the preparation of non-autoclaved aerated concrete. *Construction and Building Materials*. 2018. Vol. 162, pp. 359–368. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.151>
2. Syed Aqeel Bukhari, Dipak Patil, Gogate N.G., Pravin R. Minde. Utilization of waste materials in non-autoclaved aerated concrete blocks: State of art review. *Materials Today: Proceedings*. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.02.334>
3. Тургунбаев У.Ж., Кудратов Б.Ш., Тухтабоев Э.И. Дисперсное армирование неавтоклавируемого асбестом и стекловолокном бетона. *Научные труды международной научно-технической конференции с участием зарубежных ученых «Ресурсосберегающие технологии на транспорте»*. 2–3 декабря 2022. Ташкент. 570 с.
3. Turgunbaev U.Zh., Kudratov B.Sh., Tukhtaboev E.I. Dispersed reinforcement of non-autoclaved aerated concrete with asbestos and fiberglass. *Scientific proceedings of the international scientific and technical conference with the participation of foreign scientists "Resource-saving technologies in transport"*. December 2–3, 2022. Tashkent. 570 p.
4. Lin Yang, Yun Yan, Zhihua Hu, Utilization of phosphogypsum for the preparation of non-autoclaved aerated concrete. *Construction and Building Materials*. 2013. Vol. 44, pp. 600–606. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.03.070>
5. Sukmana N.C., Khifdillah M.I., Nurkholil A.S., Anggarini U. Optimization of non-autoclaved aerated concrete using phosphogypsum of industrial waste based on the taguchi method. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2019. Vol. 509. 012095. doi: 10.1088/1757-899X/509/1/012095
6. Бархатов В.И., Добровольский И.П., Капкаев Ю.Ш. Отходы производств и потребления – резерв строительных материалов: Монография. Челябинск: Изд-во Челябинского гос. университета, 2017. 477 с.
6. Barkhatov V.I., Dobrovolsky I.P., Kapkaev Yu.Sh. Otkhody proizvodstv i potrebleniya – rezerv stroitel'nykh materialov: monografiya. [Industrial and consumption waste - a reserve of building materials: monograph]. Chelyabinsk: Chelyabinsk State University Publishing House. 2017. 477 p.
7. Гордина А.Ф., Гуменюк А.Н., Полянских И.С., Зарипова Р.И. Исследование влияния суспензии технического углерода на характеристики фторангидритовой матрицы // *Нанотехнологии в строительстве*. 2022. Т. 14. № 5. С. 381–391. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2022-14-5-381-391>
7. Gordina A.F., Gumenyuk A.N., Polyanskikh I.S., Zaripova R.I. Carbon-containing modifier for fluoroanhydrite binder. *Nanotechnologies in Construction*. 2022. Vol. 14. No. 5, pp. 381–391. DOI: 10.15828/2075-8545-2022-14-5-381-391
8. Gumeniuk A., Polyanskikh I., Gordina A. [et al.] Fluoroanhydrite based composites with the thermoplastic additive. *Magazine of Civil Engineering*. 2022. No. 4 (112). 11210. DOI: 10.34910/MCE.112.10
9. Rahman R.A., Fazlizan A., Asim N., Thongtha A. A review on the utilization of waste material for autoclaved aerated concrete production. *International Conference on Sustainable Energy and Green Technology 2019 (SEGT 2019)*. 11–14 December 2019. Bangkok, Thailand. DOI: 10.32604/jrm.2021.013296
10. Гильмиярова Ю.В., Овчаренко Г.И., Волков В.В. Разработка составов для производства неавтоклавируемого газобетона из сырьевых материалов Индии // *Ползуновский альманах*. 2019. Т. 1. № 2. С. 58–60.
10. Gilmiyarova Yu.V., Ovcharenko G.I., Volkov V.V. Development of compositions for the production of non-autoclaved aerated concrete from Indian raw materials. *Polzunovsky Almanakh*. 2019. Vol. 1. No. 2, pp. 58–60. (In Russian).
11. Яковлев Г.И., Полянских И.С., Кисляков М.А., Гырдымов Д.А. Конструкционно-теплоизоляционный материал на основе фторангидрита. *Фотинские чтения – 2021 (весеннее собрание): Материалы VIII Международной научно-практической конференции*. Ижевск. 25–27 марта. 2021. С. 193–198.
11. Yakovlev G.I., Polyanskikh I.S., Kislyakov M.A., Gyrdymov D.A. Structural and thermal insulation material based on acid fluoride. *Fotin Readings – 2021 (spring meeting): Proceedings of the VIII International Scientific and Practical Conference*. Izhevsk. March 25–27, 2021, pp. 193–198. (In Russian).

УДК 666.914

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-818-10-47-51>

Н.И. КОЖУХОВА¹, канд. техн. наук (kozuhovanata@yandex.ru),
 Р.А. ГЛАЗКОВ¹, аспирант (romanglazkov1998@yandex.ru),
 А.И. КОЛОМЫЦЕВА¹, магистрант (anna.kolomytceva@yandex.ru);
 И.С. НИКУЛИН^{2,3}, канд. физ.-мат. наук (ivanikulin@yandex.ru);
 А.В. ЧЕРЕВАТОВА¹, д-р техн. наук (cherry_611@mail.ru)

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

² Белгородский национальный исследовательский университет (308015, г. Белгород, ул. Победы, 85)

³ ООО «Фонд инновационных наукоемких технологий» (308518, Белгородская область, п. Новосадовый, ул. Перспективная (Новосадовый мкр.), зд. 1, офис 3.3)

Влияние цитрогипса на усадочные деформации в шлакощелочных вяжущих системах

В настоящее время многочисленными исследованиями доказано, что шлакощелочные системы – цементы и бетоны являются перспективными материалами, составляющими конкуренцию в строительной отрасли классическим цементобетонам. Это обосновано широким перечнем их конкурентоспособных свойств, отвечающих современным требованиям, предъявляемым к строительным материалам и изделиям. Однако, несмотря на положительные аспекты этой группы материалов, им свойственны значительные недостатки, ограничивающие их более масштабное практическое применение, среди которых усадочные деформации в процессе твердения. В рамках представленной работы изучено влияние гипсосодержащего компонента – цитрогипса на характер и кинетику усадочных деформаций шлакощелочных вяжущих различного компонентного состава в процессе твердения. Выявлено, что в зависимости от вида щелочного активатора добавка цитрогипса по-разному влияет на значения усадки вяжущей системы. При активации вяжущей системы щелочью NaOH введение цитрогипса способствует снижению усадочных деформаций до двух раз. При использовании солей Na₂CO₃ и Na₂SiO₃ в качестве щелочных активаторов добавка цитрогипса способствует резкому увеличению усадки от пяти до десяти раз.

Ключевые слова: шлакощелочное вяжущее, гипсосодержащий компонент, усадочная деформация, тип щелочного активатора, цитрогипс.

Исследование выполнено в рамках государственного задания на создание в 2021 г. новых лабораторий, в том числе под руководством молодых перспективных исследователей национального проекта «Наука и университеты», по научной теме «Разработка научных и технологических основ создания комплексной технологии переработки гипсосодержащих отходов различных промышленных предприятий», FZWG-2021-0017. Работа выполнена на оборудовании Центра высоких технологий БГТУ им. В.Г. Шухова.

Для цитирования: Кожухова Н.И., Глазков Р.А., Коломыцева А.И., Никулин И.С., Череватова А.В. Влияние цитрогипса на усадочные деформации в шлакощелочных вяжущих системах // *Строительные материалы*. 2023. № 10. С. 47–51.

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-818-10-47-51>

N.I. KOZHUKHOVA¹, Candidate of Science (Engineering) (kozuhovanata@yandex.ru), R.A. GLAZKOV¹, Postgraduate Student (romanglazkov1998@yandex.ru), A.I. KOLOMYTCEVA¹, Master Student (anna.kolomytceva@yandex.ru); I.S. NIKULIN^{2,3}, Candidate of Science (Physical and Mathematical) (ivanikulin@yandex.ru); A.V. CHEREVATOVA¹, Doctor of Science (Engineering) (cherry_611@mail.ru)

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

² Belgorod National Research University (85, Pobedy Street, Belgorod, 308015, Russian Federation)

³ Fund of Innovative Scientific Technologies (room 3.3, 1, Perspektivnaya Street (Novosadovy microdistrict), Novosadovy village, Belgorod region, 308518, Russian Federation)

Effect of Citrogyssum on Shrinkage in Slag Cements

Nowadays, numerous studies have proven that slag-alkaline systems: cements and concretes are promising materials that compete with ordinary cement concretes in the construction industry. This is justified by a wide list of their competitive properties that meet modern requirements for building materials and products. However, despite the positive aspects of this group of materials, they are characterized by significant drawbacks that limit their wider practical application, including shrinkage during hardening. Within the framework of the article, the influence of the gypsum-containing component – citrogypsum, on the character and kinetics of shrinkage deformations of slag cements of various component compositions during the hardening process was studied. It was found that, depending on the type of alkaline activator, the addition of citrogypsum had a different effect on the shrinkage values of the binding system. When the NaOH binding system is activated, the introduction of citrogypsum helps to reduce shrinkage deformations up to two times. When using Na₂CO₃ and Na₂SiO₃ salts as alkaline activators, the addition of citrogypsum contributes to a sharp increase in shrinkage from 5 to 10 times.

Keywords: slag cement, slag-alkaline binder, gypsum-containing component, shrinkage deformation, type of alkaline activator, citrogypsum.

The work was realized under support of the State Assignment for the creation of new laboratories in 2021, including under the guidance of young promising researchers of the national project «Science and Universities», research title is «Development of scientific and technological foundations for the creation of an integrated technology for processing gypsum-containing waste from various industrial enterprises», FZWG-2021-0017. The work was realized using equipment of the High Technology Center at BSTU named after V.G. Shukhov.

For citation: Kozhukhova N.I., Glazkov R.A., Kolomytseva A.I., Nikulin I.S., Cherevatova A.V. Effect of citrogypsum on shrinkage in slag cements. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2023. No. 10, pp. 47–51. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-818-10-47-51>

Разработка и внедрение шлакощелочных бетонов являются одним из наиболее перспективных направлений исследований в области строительных материалов [1–3]. Они представляют собой композиционные материалы, в которых основными составляющими компонентами являются щелочной активатор и шлак. Шлаки, получаемые при производстве чугуна и стали, являются побочным продуктом, который несколько десятилетий назад не представлял собой ценное сырье и поэтому не был востребован и складировался в качестве отхода [4–6]. Однако благодаря научным исследованиям [7–9] было обнаружено, что металлургический шлак можно использовать как ценный компонент для создания шлакощелочных бетонов.

Основными преимуществами шлакощелочных бетонов (ШЩБ) являются их высокие прочностные характеристики, долговечность, высокая устойчивость к атмосферным воздействиям, химическим агрессивным средам и открытому огню, высокая доступность и относительно низкая стоимость сырья, а также экологичность. Кроме того, ШЩБ обладают хорошей тепло- и звукоизоляцией, это способствует созданию комфортных условий в зданиях с их использованием. Таким образом, материалы на основе ШЩБ обладают отличными эксплуатационными свойствами, что делает их привлекательными для использования в строительстве.

Одним из главных недостатков шлакощелочных бетонов является высокая щелочность реакционной среды для эффективного твердения вяжущей системы, которая склонна сохранять высокое значение еще в течение длительного времени в процессе эксплуатации. Это может приводить к коррозии арматуры и других металлических элементов в составе конструкции на основе ШЩБ, что, как правило, негативно сказывается на прочности и долговечности. Кроме того, шлакощелочные бетоны имеют более высокую плотность, что может затруднять их обработку и увеличивать нагрузку на фундаменты зданий.

Следует отметить, что шлакощелочные вяжущие системы являются аналогами портландцемента с точки зрения механизма твердения – гидратационного, принцип которого основан на структурообразующей роли Ca^{2+} -катионов. Таким образом, реакционная активность такой вяжущей системы в зна-

чительной степени зависит от концентрации этих катионов. Зачастую в составе металлургических шлаков, концентрация Ca^{2+} -катионов варьируется в широком диапазоне, и в случае их низкого содержания шлак проявляет слабые вяжущие свойства. Для повышения реакционной активности шлаков, как правило, используют активаторы, содержащие катионы щелочных металлов, например $CaOH$, $NaOH$, Na_2SiO_3 и др.

Также в сфере синтеза щелочеактивированных систем имеется опыт применения гипсосодержащих компонентов, которые являются источниками Ca^{2+} -катионов. При этом широкое применение находят гипсосодержащие отходы в виде фосфогипса [10], гипса, образующегося при десульфуризации дымовых газов [11], цитрогипса [12] и др.

На основании литературного анализа использование гипсосодержащих компонентов в составе шлакощелочных систем позволяет добиваться ряда положительных эффектов: улучшения работоспособности смеси и регулирования реологических свойств, времени схватывания и отверждения и т. д. [12–15]. Подобный симбиоз гипсосодержащего компонента в шлакощелочной системе позволяет решать одновременно целый ряд задач в сфере ресурсо- и энергосберегающих технологий в строительстве, главной из которых является эффективная утилизация крупнотоннажных промышленных отходов.

Еще одним не менее важным недостатком ШЩБ, который также ограничивает области их применения, является склонность к усадочным деформациям в процессе сушки с последующим образованием как поверхностных, так и глубинных трещин и, как следствие, снижению эксплуатационных характеристик [16].

В связи с этим работа посвящена исследованию влияния гипсосодержащего компонента в виде промышленного отхода – цитрогипса в качестве источника Ca^{2+} -катионов на усадочные деформации шлакощелочных систем различного компонентного состава.

Материалы

Для синтеза шлакощелочных вяжущих использовался доменный гранулированный шлак (Новолипецкий металлургический комбинат, РФ), активированный щелочными активаторами. В качестве ще-

Таблица 1
Table 1

Химический состав используемых твердофазных компонентов
The chemical composition of the used solid phase components

Компонент	Содержание оксидов, % (вес.)															Остальное
	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	MnO	SrO	Cl	P ₂ O ₅	ZrO ₂	CeO ₂	
Доменный гранулированный	43,2	39,4	7,86	6,17	1,42	0,55	0,4	0,36	0,34	0,14	0,05	0,02	0,01	0,01	0,01	0,06
Цитрогипс	43,3	0,54	0,13	0,06	55,5	0,04	0,03	–	0,15	–	0,14	–	0,08	–	–	0,03

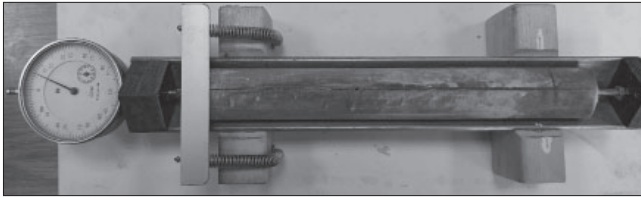


Рис. 1. Прибор для определения линейной усадки-расширения
Fig. 1. The device for determining the linear shrinkage-expansion

лочных активаторов были использованы три компонента: щелочь натр едкий NaOH (ЧДА, чистота 98%), натриевое жидкое стекло Na₂SiO₃ с силикатным модулем $M_{Si}=2,75$ и кальцинированная сода Na₂CO₃. В качестве гипсосодержащего компонента использовался отход производства лимонной кислоты – цитрогипс. Химические составы твердофазных компонентов – доменного гранулированного шлака и цитрогипса представлены в табл. 1.

Согласно данным табл. 1 совокупное содержание оксидов в составе доменного гранулированного шлака (CaO+MgO+Na₂O+K₂O) не превышает 50% по сравнению с традиционным портландцементом, где концентрация только CaO выше 60%. На основании этого можно предполагать, что используемый шлак обладает пониженной реакционной активностью в водной среде и требует активации дополнительными источниками щелочных катионов, вводимыми извне.

В свою очередь, используемый цитрогипс, содержащий в своем составе более 40% CaO, является подходящим источником Ca²⁺-катионов.

Методы испытаний

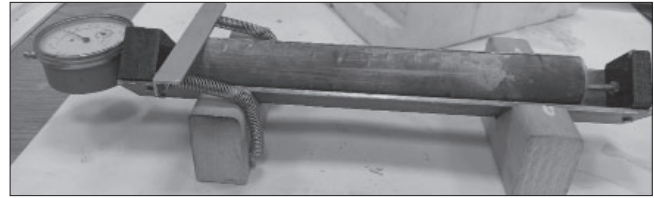
Определение усадочных деформаций затвердевших шлакощелочных систем осуществлялось на приборе, предназначенном для определения линейной усадки-расширения, представленном на рис. 1.

Результаты и обсуждения

Для проведения исследования было разработано восемь составов шлакощелочных вяжущих с соотношением компонентов в соответствии с существующим на сегодняшний день опытом их получения. Компонентные составы разработанных экспериментальных шлакощелочных вяжущих приведены в табл. 2.

Приготовление сырьевых смесей осуществлялось тщательным перемешиванием компонентов с целью обеспечения их равномерного распределения в объеме. Формовочные смеси готовились с условием равной подвижности. Так, на основании результатов табл. 1 стоит отметить, что составы 4 и 7 (активированные гидроксидом натрия) характеризуются наибольшей водопотребностью.

На стадии подготовки полученная сырьевая смесь была заформована в разъемные пластиковые формы. Полученные для экспериментальных исследований образцы имели форму цилиндров диаметром 28,7 и длиной 229 мм.



После формования образцы были помещены в камеру нормального твердения с температурой 23±3°C, относительной влажностью ≈95% с целью активации структурообразующего процесса, а также во избежание/снижение одновременного эффекта от воздушной и аутогенной усадки.

В возрасте 3 сут образцы расформовывались. На этой стадии экспериментальные составы были разделены на три группы: достигшие достаточной прочности, позволяющей осуществить их расформовку, – составы 3, 4, 5 и 7; составы, которые приобрели начальную прочность, но недостаточную для их расформовки, – составы 6 и 8; незатвердевшие составы, которые остались в состоянии первоначальной формовочной суспензии, – составы 1 и 2, которые характеризуются отсутствием какого-либо щелочного активатора в сырьевой смеси. Из-за специфики метода определения усадочных деформаций составы 1 и 2 не принимали участия в дальнейших испытаниях.

Кроме того, образцы составов 6 и 8, не достигшие расформовочной прочности, испытывались на усадку в заформованном виде.

Полученные данные были проанализированы для определения статистической значимости различий между образцами с разными щелочными активаторами, а также в присутствии/отсутствии гипсосодержащего компонента. Это позволило выявить их влияние на исследуемые свойства шлакощелочных вяжущих.

Испытания проводились в несколько этапов в различном возрасте твердения: на 3, 5, 10, 14 и

Таблица 2
Table 2

Компонентные составы экспериментальных
шлакощелочных вяжущих
Component compositions of experimental slag cements

Состав ID	Компонент, г					
	Шлак	Вода	Na ₂ CO ₃	NaOH	Na ₂ SiO ₃	Цитрогипс
1	360	78	–	–	–	–
2	342	78	–	–	–	18
3	360	78	24,48	–	–	–
4	360	88,4	–	18,57	–	–
5	360	78	–	–	14,4	–
6	342	78	24,48	–	–	18
7	342	90,6	–	18,57	–	18
8	342	78	–	–	14,4	18

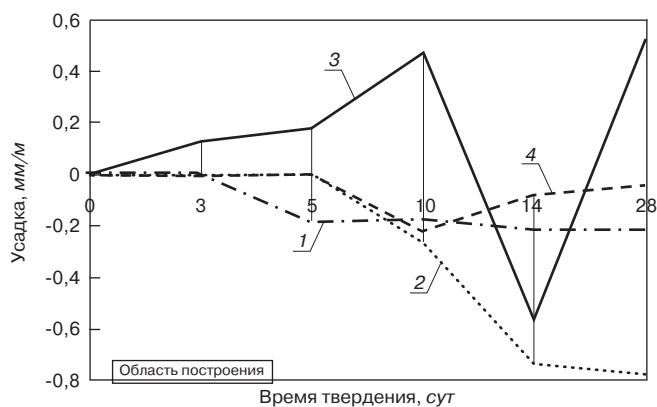
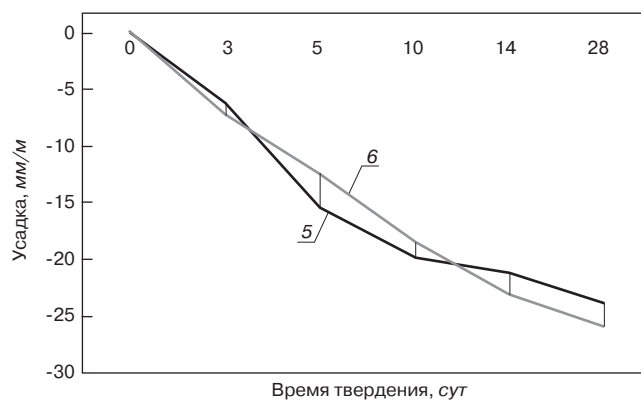


Рис. 2. Влияние состава шлакощелочных вяжущих на кинетику усадочных деформаций в процессе твердения: 1 – состав 3; 2 – состав 4; 3 – состав 5; 4 – состав 7; 5 – состав 6; 6 – состав 8

Fig. 2. Effect of slag cements composition on the kinetics of shrinkage during hardening period: 1 – composition 3; 2 – composition 4; 3 – composition 5; 4 – composition 7; 5 – composition 6; 6 – composition 8



28-е сут твердения. Этот подход позволил изучить изменения усадочных деформаций экспериментальных составов вяжущих в течение определенного временного промежутка и установить их развитие с течением времени.

Важно отметить, что образцы-цилиндры составов 3, 4, 5 и 7 после расформовки не имели никаких видимых повреждений, таких как сколы или трещины. Это обеспечило точность и достоверность результатов испытаний, так как полностью исключило возможные внешние факторы, которые могли бы искажать получаемые данные. Результаты по усадочным деформациям представлены на рис. 2.

На основании данных рис. 2 следует отметить, что для составов 3 и 7, активированных Na_2CO_3 и NaOH , соответственно наблюдаются минимальные колебания по усадочным деформациям. Причем для этих составов наблюдается только усадка на протяжении всего экспериментального периода (в течение 28 сут), которая не превышает $-0,21$ и $-0,22$ мм/м для составов 3 и 7 соответственно. Для составов 4 и 5 характерны колебания по усадочным деформациям в более широком диапазоне: от 0 до $-0,77$ мм/м – для состава 4 и от $-0,56$ до $0,52$ мм/м – для состава 5. Для состава 5 характерны как усадка, так и расширение в процессе 28-сут твердения системы. Наиболее высокие усадочные деформации наблюдаются для составов 6 и 8, активированных Na_2CO_3 и Na_2SiO_3 , и достигают в 28-сут возрасте $-23,9$ и -26 мм/м соответственно.

Анализируя влияние добавки гипсосодержащего компонента – цитрогипса на характер и кинетику усадочных деформаций, следует отметить, что для составов, активированных Na_2CO_3 и Na_2SiO_3 , введение цитрогипса существенно увеличивает их усадку – от 5 до 10 раз (при сравнении между собой составов 3 и 6; 5 и 8). В то же время в шлакощелочной вяжущей системе, активированной NaOH , введение цитрогипса, наоборот, способствует снижению усадки практически в два раза: от значения $-0,77$ мм/м – для состава 4 до значения $-0,22$ мм/м – для состава 7.

Экспериментальные составы шлакощелочных вяжущих, содержащие добавку цитрогипса (составы 6–8), на протяжении всего наблюдаемого 28-сут периода твердения демонстрируют непрерывно растущую усадку. В то же время для состава 7 при твердении в течение 10 сут наблюдается постепенное увеличение усадки до $-0,22$ мм/м, однако после 10 и до 28 сут происходит плавное снижение усадки системы до $-0,04$ мм/м, т. е. практически до исходного (формовочного) состояния.

Выводы

На основании проведенных исследований можно заключить.

В зависимости от типа щелочного активатора добавка гипсосодержащего компонента – цитрогипса по-разному влияет на характер усадочных деформаций шлакощелочных вяжущих в процессе их твердения: наблюдается положительное влияние щелочи NaOH и негативное влияние щелочных активаторов Na_2SiO_3 и Na_2CO_3 . В NaOH -активированной системе введение цитрогипса способствует сокращению усадочных деформаций почти в два раза: от $-0,77$ до $-0,22$ мм/м.

Вяжущие системы, активированные Na_2CO_3 и Na_2SiO_3 , при введении добавки цитрогипса показывают резкое повышение усадочных деформаций от пяти до десяти раз.

Наиболее высокими значениями усадочных деформаций характеризуются образцы шлакощелочных вяжущих, активированных Na_2CO_3 и Na_2SiO_3 , содержащих добавку цитрогипса $-23,9$ и -26 мм/м соответственно.

Для более глубокого понимания механизмов взаимодействия шлакощелочных систем и гипсосодержащих компонентов в вопросе усадочных деформаций и иных эксплуатационных свойств требуются дальнейшие исследования.

Список литературы / References

1. Krivenko P. Why alkaline activation – 60 years of the theory and practice of alkali-activated materials. *Journal*

- of *Ceramic Science and Technology*. 2017. Vol. 8. No. 3, pp. 323–334. DOI:10.4416/JCST2017-00042
2. Банул А.В. Шлакощелочные составы, их свойства и технология производства сухих шлакощелочных растворных смесей. *Сборник Международной научно-технической конференции «Эффективные рецептуры и технологии в строительном материаловедении»*. Новосибирск, 14–17 февраля. 2017. С. 196–200.
 2. Banul A.V. Slag-alkali compositions, their properties and production technology of dry slag-alkali mortar mixtures. *Collection of the International Scientific and Technical Conference «Effective Formulations and Technologies in Building Materials Science»*. Novosibirsk. February 14–17, 2017, pp. 196–200. (In Russian).
 3. Kozhukhova N.I., Alfimova N.I., Kozhukhova M.I., Nikulin I.S., Glazkov R.A., Kolomytceva A.I. Supplementary mineral additive on physical and mechanical performance of granulated blast furnace slag-based alkali-activated binders. *Recycling*. 2023. Vol. 8(1). No. 22. DOI:10.3390/recycling8010022
 4. Иванов К.С., Иванов Н.К. Комплексное использование отходов черной металлургии при изготовлении шлакощелочных мелкозернистых бетонов. *Строительные материалы*. 2005. № 11. С. 74–77.
 4. Ivanov K.S., Ivanov N.K. Complex use of ferrous metallurgy waste in the production of slag-alkaline fine-grained concrete. *Stroitel'nye Materials [Construction Materials]*. 2005. No. 11, pp. 74–77. (In Russian).
 5. Калмыкова Ю.С. Переработка отвальных доменных шлаков с получением шлакощелочных вяжущих. *Экология и промышленность России*. 2014. № 3. С. 21–25.
 5. Kalmykova Yu.S. Processing of waste blast-furnace slags with the production of slag-alkaline binders. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii*. 2014. No. 3, pp. 21–25. (In Russian).
 6. Kozhukhova N., Kadyshev N., Cherevatova A., Voitovich E. Reasonability of application of slags from metallurgy industry in road construction. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2017. Vol. 692, 776–782. https://doi.org/10.1007/978-3-319-70987-1_82
 7. Pudron A.O. The action of alkalis on blast furnace slag. *Journal of Society of Chemical Industry*. 1940. No. 59, pp. 191–202.
 8. Feret R. Slag for the manufacture of cement. *Revue des materiaux de construction et de travaux public*. 1939, pp. 121–126.
 9. Глуховский В.Д., Пашков Т.А., Яворский И.А. Новый строительный материал. *Бюллетень технической информации Главкиевстроя*. 1957. № 2. С. 43–47.
 9. Gluhovsky V.D., Pashkov T.A., Yavorsky I.A. New building material. *Bulletin of technical information of Glavkievstroy*. 1957. No. 2, pp. 43–47. (In Russian).
 10. Chang J.J., Yeh W., Hung C.C. Effects of gypsum and phosphoric acid on the properties of sodium silicate-based alkali-activated slag pastes. *Cement and Concrete Composites*. 2005. Vol. 27. No. 1, pp. 85–91 DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2003.12.001
 11. Shi H., Guo, X. Effects of Flue Gas Desulfurization (FGD) gypsum on the performances of cement-based materials. *Gypsum: Properties, Production and Applications*. 2011, pp. 153–174.
 12. Kozhukhova N.I., Shurakov I.M., Alfimova N.I., Zhernovskaya I.V., Kozhukhova M.I. Using of citrogypsum in alkali activated systems. *Key Engineering Materials*. 2022. Vol. 913, pp. 179–184. (In Russian).
 13. Kozhukhova N.I., Shurakov I.M., Kozhukhova M.I., Elistratkin M.Yu., Alfimova N.I. Understanding the relationship between composition and rheology in alkali-activated binders. *Journal of Physics: Conference Series. Advanced Trends in Civil Engineering 2021 (ATCE 2021)*. Vol. 2124. DOI 10.1088/1742-6596/2124/1/012004
 14. Банул А.В. Влияние режимов обжига на прочность и огневую усадку жаростойких мелкозернистых шлакобетонов. *Сборник Национальной научно-технической конференции с международным участием «Повышение качества и эффективности строительных и специальных материалов»*. Новосибирск, 18–22 февраля. 2019. С. 188–192.
 14. Banul A.V. Influence of firing regimes on the strength and fire shrinkage of heat-resistant fine-grained slag concrete. *Proceeding of the National Scientific and Technical Conference with international participation «Improving the quality and efficiency of building and special materials»*. Novosibirsk. 18–22 February 2019, pp. 188–192. (In Russian).
 15. Алфимова Н.И., Пириева С.Ю., Елистраткин М.Ю., Кожухова Н.И., Титенко А.А. Обзорный анализ способов получения вяжущих из гипсосодержащих отходов промышленных производств // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2021. № 11. С. 8–23. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-11-8-23
 15. Alfimova N.I., Pirieva S.Yu., Elistratkin M.Yu., Kozhuhova N.I., Titenko A.A. Production methods of binders containing gypsum-bearing wastes: a review. *Vestnik of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2020. No. 11, pp. 8–23. (In Russian). DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-11-8-23
 16. Omelchuk V., Ye G., Runova R., Rudenko I. Shrinkage behavior of alkali-activated slag cement pastes. *Key Engineering Materials*. 2018. Vol. 761, pp. 45–48. DOI:10.4028/www.scientific.net/KEM.761.45

М.С. ГАРКАВИ¹, д-р техн. наук (mgarkavi@mail.ru),
А.В. АРТАМОНОВ¹, канд. техн. наук (aav@uralomega.ru);
Е.В. КОЛОДЕЖНАЯ², канд. техн. наук (kev@uralomega.ru);
С.А. ДЕРГУНОВ³, канд. техн. наук (dergunow79@mail.ru),
С.В. СЕРИКОВ³, инженер (svserikov@list.ru)

¹ ЗАО «Урал-Омега» (455037, г. Магнитогорск, пр. Ленина, 89, стр. 7)

² Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова Российской академии наук (111020, г. Москва, Крюковский туп., 4)

³ Оренбургский государственный университет (460018, г. Оренбург, просп. Победы, 13)

Механохимический синтез композиционных ангидритовых вяжущих

Рассмотрен процесс механохимического синтеза композиционных ангидритовых вяжущих с использованием различных металлургических шлаков. Установлено, что при совместном измельчении компонентов композиционного вяжущего в энергонапряженной центробежно-ударной мельнице в смеси образуются механокомпозиты, которые представляют собой метастабильные структуры с высокой плотностью межфазных границ между исходными компонентами, это обеспечивает очень большую концентрацию дефектов и активных центров различной природы. При измельчении смеси ангидрита и металлургического шлака получен механокомпозит, представляющий собой систему $\text{CaSO}_4\text{-CaO-Al}_2\text{O}_3$ или $\text{CaSO}_4\text{-CaO-SiO}_2$, состоящих из алюминатов, силикатов и алюмосиликатов кальция. Эти механокомпозиты являются активаторами процесса твердения ангидритового компонента композиционного вяжущего за счет образования при гидратации гидроксидов кальция, алюминия и гидроалюминатов кальция. Установлено влияние химического состава металлургического шлака на прочностные характеристики композиционного ангидритового вяжущего.

Ключевые слова: ангидрит, металлургический шлак, центробежно-ударная мельница, механохимический синтез, механокомпозит.

Для цитирования: Гаркави М.С., Артамонов А.В., Колодежная Е.В., Дергунов С.А., Сериков С.В. Механохимический синтез композиционных ангидритовых вяжущих // *Строительные материалы*. 2023. № 10. С. 52–57.

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-818-10-52-57>

M.S. GARKAVI¹, Doctor of Sciences (Engineering) (mgarkavi@mail.ru),
A.V. ARTAMONOV¹, Candidate of Sciences (Engineering) (aav@uralomega.ru);
E.V. KOLODEZHNYAYA², Candidate of Sciences (Engineering) (kev@uralomega.ru);
S.A. DERGUNOV³, Candidate of Sciences (Engineering) (dergunow79@mail.ru),
S.V. SERIKOV³, Engineer (svserikov@list.ru)

¹ Ural-Omega, PJSC (89, Building 7, Lenina Avenue, Magnitogorsk, 455037, Russian Federation)

² Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources Russian Academy of Sciences (4, Kryukovskiy Impasse, Moscow, 111020, Russian Federation)

³ Orenburg State University (13, Pobedy Avenue, Orenburg, 460018, Russian Federation)

Mechanochemical Synthesis of Composite Anhydrite Binders

The process of mechanochemical synthesis of composite anhydrite binders using various metallurgical slags is considered. It has been established that during the joint grinding of the components of a composite binder in an energy-intensive centrifugal impact mill, mechanocomposites are formed in the mixture. Mechanocomposites are metastable structures with a high density of interfacial boundaries between the initial components, which provides a very high concentration of defects and active centers of various nature. When grinding a mixture of anhydrite and metallurgical slag, a mechanocomposite was obtained, which is a $\text{CaSO}_4\text{-CaO-Al}_2\text{O}_3$ or $\text{CaSO}_4\text{-CaO-SiO}_2$ system and consists of calcium aluminates, silicates and aluminosilicates. This mechanocomposites are activators of the hardening process of the anhydrite component of the composite binder due to the formation of calcium and aluminum hydroxides and calcium hydroaluminates during their hydration. The effect of the chemical composition of metallurgical slag on the strength characteristics of a composite anhydrite binder has been established.

Keywords: anhydrite, metallurgical slag, centrifugal impact mill, mechanochemical synthesis, mechanocomposite.

For citation: Garkavi M.S., Artamonov A.V., Kolodezhnaya E.V., Dergunov S.A., Serikov S.V. Mechanochemical synthesis of composite anhydrite binders. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2023. No. 10, pp. 52–57. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-818-10-52-57>

Накоплен многолетний опыт применения в строительстве материалов на основе ангидритового вяжущего, причем в последнее время актуальность их использования растет. Это обусловлено возрастающим развитием малоэтажного строительства, в котором сдерживающим фактором выступает высокая стоимость традиционных керамических и силикатных материалов. Ангидритовое вяжущее из природ-

ного ангидрита характеризуется низкой себестоимостью, так как энергозатраты на его производство значительно ниже, чем на изготовление портландцемента и строительного гипса. При этом технические показатели ангидрита не уступают вышеуказанным вяжущим.

Однако медленное твердение, необходимость увеличения распалубочной прочности, ползучесть за-

трудняют использование этого вяжущего. К технологическим приемам, способствующим ускорению твердения ангидритового вяжущего, повышению физико-технических показателей искусственного камня, относится использование тонкого измельчения ангидрита совместно с различными активаторами и минеральными добавками [1–5].

Процесс гидратации ангидритового вяжущего в значительной степени зависит от вида активаторов и способа их введения. Причем вид активирующей добавки определяет и механизм ее воздействия на твердение ангидритового вяжущего [3].

В качестве активаторов твердения, как правило, используют вещества, увеличивающие растворимость ангидрита и являющиеся центрами кристаллизации. Как показано в [6–8], многокомпонентные добавки, вводимые в суспензии ангидрита, позволяют регулировать скорость его растворения, скорость кристаллизации двуhydrата, изменять структуру воды и кислотность среды, а также другие параметры системы. При этом наиболее эффективны добавки, имеющие общий ион кальция с ангидритом и дающие щелочную среду водной вытяжки: известь, силикаты и алюминаты кальция, в качестве которых, в частности, целесообразно использовать металлургические шлаки [1, 6]. Среди модификаторов структуры ангидритовых материалов, которые одновременно являются и активаторами твердения, наиболее эффективными считаются добавки, имеющие повышенную дисперсность [9], поскольку в физико-химических процессах твердения важную роль играет состояние поверхности твердой фазы компонентов вяжущей системы.

Как известно, основной технологической операцией, в результате которой минеральное сырье переходит в активное состояние, является его тонкое измельчение [10]. При этом результатом механической обработки материала в мельнице является не только уменьшение размера частиц твердого тела, но и механохимическая активация, которая сопровождается изменением его физико-химических свойств [11, 12]. Следует отметить, что для проведения механохимической активации необходимы аппараты с высокой энергонапряженностью, так как в обычных аппаратах эффекты активации весьма незначительны.

По традиционной технологии ангидритовые композиционные вяжущие изготавливают либо совместным помолом компонентов в шаровой мельнице, либо их смешиванием. При этом получаемое композиционное вяжущее представляет собой механическую смесь компонентов, которую можно представить следующей схемой:

$$AKB=A+Ak+MH, \quad (1)$$

где AKB – ангидритовое композиционное вяжущее; A – ангидрит; Ak – активатор твердения; MH – минеральный наполнитель.

В этом вяжущем минеральный компонент выполняет, как правило, роль подложки для кристаллиза-

ции образующегося при твердении двухводного гипса [5, 13]. Это обусловлено тем, что при измельчении компонентов в шаровой мельнице, которая не является энергонапряженным аппаратом, не происходит активации поверхности минерального наполнителя [11]. Применительно к вяжущим на основе ангидрита активирующая роль минерального наполнителя минимальна либо отсутствует.

Иная картина наблюдается при совместном измельчении компонентов композиционного вяжущего в энергонапряженной мельнице. При помолке компонентов в таком аппарате (центробежно-ударной мельнице, планетарной мельнице, дезинтеграторе) в системе образуются механокомпозиаты, т. е. композиционное вяжущее можно представить следующей схемой:

$$AKB=A+MH+MK, \quad (2)$$

где MK – механокомпозит.

Понятие механокомпозитов связано со спецификой их формирования в энергонапряженных измельчителях вследствие механической активации смеси невзаимодействующих компонентов с образованием большой контактной поверхности между ними [14, 15]. Ввиду различной размолоспособности компонентов происходит образование слоистых структур и межфазной поверхности путем «намазывания» одного из компонентов на другой в местах их физического контакта. Согласно [14] механокомпозиты представляют собой метастабильные структуры с высокой плотностью межфазных границ между исходными компонентами, что обеспечивает очень большую концентрацию дефектов на поверхностях и в приповерхностных слоях.

Большая контактная поверхность между компонентами, большая запасенная энергия, обусловленные процессом механоактивации, создают идеальные условия для последующих химических превращений при взаимодействии механокомпозита с жидким реагентом. При этом может иметь место не только изменение кинетики взаимодействия твердой и жидкой фаз, но и изменение морфологии и размерных характеристик образующихся продуктов.

Рассмотрим образование механокомпозитов и их влияние на свойства композиционного ангидритового вяжущего, изготовленного с использованием металлургических шлаков различного генезиса, которые по своему химическому и вещественному составу могут выполнять роль активатора твердения ангидрита [16].

Материалы и методы исследования

В данной работе использовался природный ангидрит Порецкого месторождения с содержанием сульфата кальция 85,5%. Вещественный состав ангидрита приведен в табл. 1.

Для получения композиционных ангидритовых вяжущих применялись глиноземистый и сталеplавильный шлаки Чусовского металлургического завода,

Таблица 1
Table 1

Минеральный состав ангидрита
Mineral composition of anhydrite

Массовая доля компонентов, %			
CaSO ₄	CaSO ₄ ·2H ₂ O	SiO ₂	CaMg(CO ₃) ₂
85,5	11,5	1	2

Таблица 2
Table 2

Химический состав металлургических шлаков
Chemical composition of metallurgical slags

Шлак	Массовая доля компонентов, %					
	CaO	SiO ₂	MgO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SO ₃
Глиноземистый	23,5	2,7	0,7	0,6	70,2	0,3
Сталеплавильный	41,4	23	9,1	0,7	22,5	0,5
Доменный отвальный	37,9	37,8	2,44	3,94	9,23	1,82
Конвертерный	39,4	12,4	14,6	22,4	4,2	0,3

доменный отвальный шлак ЮГПК, конверторный шлак ММК, химический состав которых представлен в табл. 2.

В фазовом составе глиноземистого шлака преобладают моно- и диалюминат кальция: CaO·Al₂O₃ и CaO·2Al₂O₃. Сталеплавильный, конвертерный и доменный отвальные шлаки содержат в своем составе силикаты и алюмосиликаты кальция, главным образом ларнит (2CaO·SiO₂), псевдоволластонит (CaO·SiO₂) и геленит (2CaO·Al₂O₃·SiO₂). Такой состав шлаков позволяет рассматривать их в качестве потенциальных активаторов твердения ангидрита, т. е. как активные компоненты композиционного ангидритового вяжущего.

Смесь ангидрита и используемого шлака в заданном соотношении измельчалась в центробежно-ударной мельнице КИ-0,36, в которой совмещены две высокоэффективные системы: центробежно-ударного измельчения и воздушной классификации. Отличительной особенностью центробежно-ударной мельницы является ее высокая энергонапряженность (более 10 кВт/кг), что позволяет проводить в ней процесс механохимической активации, при которой в измельчаемой смеси создаются необходимые условия для образования механокомпозиатов.

Результаты и обсуждение

Математическое моделирование процесса образования механокомпозиатов показало, что оптимальное объемное соотношение между ангидритом и металлургическим шлаком в смеси находится в диапазоне 25–30%, а превышение этого соотношения не приводит к росту объема механокомпозиатов [17]. При длительности измельчения компонентов ангидрито-

шлаковой смеси в центробежно-ударной мельнице свыше трех минут, что соответствует продолжительности реального процесса помола, они теряют свою индивидуальность, т. е. продукт помола практически состоит из механокомпозиатов. Зерновой состав образующихся механокомпозиатов характеризуется размерами частиц d₅₀=3,63 мкм и d₉₀=7,76 мкм, что хорошо коррелируется с результатами численного моделирования [17].

В зависимости от вида используемого шлака механокомпозиаты по своему составу соответствуют системам CaSO₄–CaO–Al₂O₃; CaSO₄–CaO–SiO₂, причем при использовании глиноземистого шлака преобладает первая система. Близок к данной системе и механокомпозиат на основе сталеплавильного шлака с высоким содержанием Al₂O₃. При использовании доменного отвального и конвертерного шлаков механокомпозиаты в большей степени соответствуют второй системе. Поскольку механокомпозиаты являются прекурсорами, которые выполняют роль активатора твердения ангидрита, то их состав определяет не только кинетику твердения композиционного вяжущего, но и свойства образующегося искусственно-го камня.

Согласно современным воззрениям поверхность твердого вещества бифункциональна, так как представляет собой совокупность центров Льюиса и Бренстеда как кислотного, так и основного типов [18]. Следует отметить, что содержание кислотных центров Льюиса, способных каталитически активировать процесс гидратации ангидрита, резко увеличивается при совместном измельчении компонентов композиционного вяжущего в центробежно-ударной мельнице, поэтому механокомпозиаты обладают не только поверхностью с большим содержанием дефектов различной природы, но и высокой концентрацией указанных активных центров.

Роль механокомпозиатов в составе композиционного ангидритового цемента хорошо иллюстрируется данными, приведенными на рис. 1. Как следует из этих данных, наличие механокомпозиатов в ангидрито-шлаковом вяжущем с использованием глиноземистого шлака, полученном в центробежно-ударной мельнице, способствует увеличению прочности в возрасте 28 сут более чем в 1,5 раза.



Рис. 1. Влияние способа измельчения на прочность искусственного ангидрито-шлакового камня

Fig. 1. Influence of grinding method on the strength of artificial anhydrite-slag stone

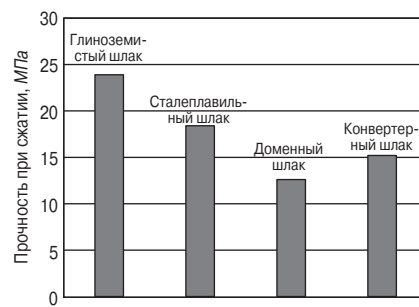


Рис. 2. Влияние вида шлака в составе композиционного вяжущего на прочность искусственного камня

Fig. 2. Influence of the type of slag in the composition of the composite binder strength of artificial stone

Аналогичная картина наблюдается и при использовании других исследуемых шлаков в составе композиционного вяжущего.

При твердении композиционных ангидридовых вяжущих в первую очередь развивается реакция гидратации механокомпозитов, что связано с их высоко развитой поверхностью с большим количеством структурных дефектов и активных поверхностных центров. На поверхностных активных центрах происходит диссоциативная адсорбция молекул воды с образованием активных частиц OH^- и H^+ (H_3O^+) [19]. Образующиеся группы OH^- частично связываются с поверхностными кислотными центрами, но в основном остаются в растворе и повышают его pH, способствуя растворению ангидрита. Протоны связываются основными центрами поверхности и протонируют связи $-\text{Ca}-\text{O}-\text{Si}\equiv$ силикатов кальция, входящих в состав металлургических шлаков. В результате происходит разрыв этих связей и имеет место гидратация шлаковой составляющей механокомпозита.

При гидратации глиноземистого шлака в составе механокомпозита образуются гидроксиды кальция, алюминия и гидроалюминаты кальция [20], которые являются эффективными активаторами твердения ангидридового компонента с образованием двуводного гипса. Кроме того, будет иметь место и взаимодействие ангидридового компонента механокомпозита с гидроалюминатом кальция с образованием гидросульфалюминатов кальция различного состава, которые выполняют роль центров кристаллизации двуводного гипса и армируют структуру формирующегося камня. Подобный механизм процесса имеется и при твердении композиционного вяжущего на основе сталеплавильного шлака, в состав которого также входят алюминаты кальция.

При гидратации механокомпозитов, содержащих доменный отвальный или конвертерный шлаки, образуется гидроксид кальция, активирующий растворение и твердение ангидрита, а также в небольшом количестве гидросиликаты кальция, способствующие повышению прочности искусственного камня. Входящие в состав конвертерного шлака ферриты кальция при взаимодействии с ангидридовым компонентом образуют гидросульфферриты кальция, уплотняющие структуру камня.

Список литературы

1. Гордина А.Ф., Полянских И.С., Гафипов А.Т., Кузьмина Н.В., Пудов И.А. Особенности формирования структуры и свойств фторангидридовых материалов // *Строительные материалы*. 2022. № 11. С. 50–57. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-808-11-50-57>
2. Нуриева Е.М., Бахтин А.И., Денисов И.Г., Галеев А.А., Алтыкис М.Г., Халиуллин М.И., Рахимов Р.З. О механизме влияния минеральных и химических добавок на процесс гидратации гипсового вяжущего на основе ангидрита

Особенностью действия механокомпозитов при твердении композиционного ангидридового вяжущего является взаимное влияние его компонентов друг на друга. Продукты гидратации шлаковой составляющей ускоряют растворение ангидрита, вследствие чего в растворе растет концентрация ионов $[\text{SO}_4]^{2-}$, что предопределяет развитие процесса сульфатной активации шлаков [20]. Следовательно, механокомпозиты участвуют в своеобразном автокатализе процесса твердения композиционного ангидридового вяжущего.

В силу различия вещественного состава шлаков, содержащие их механокомпозиты по-разному влияют на физико-механические свойства затвердевшего композиционного ангидридового вяжущего в 28-суточном возрасте (рис. 2).

Из приведенных данных следует, что шлаки с высоким содержанием оксида алюминия образуют в составе композиционного цемента механокомпозиты с максимальным активирующим эффектом. Среди шлаков, содержащих силикаты и алюмосиликаты кальция, наибольшей активирующей способностью обладают включающие в себя высокоосновные силикаты кальция. Полученные результаты позволяют не только прогнозировать свойства композиционных вяжущих различного состава, но и осуществлять целенаправленный выбор их состава исходя из имеющегося сырья.

Заключение

Выполненные исследования показали эффективность механохимического синтеза в центробежно-ударной мельнице механокомпозитов с использованием металлургических шлаков различного химического состава в композиционном ангидридовом вяжущем. Механокомпозиты в составе композиционного цемента являются эффективными активаторами твердения ангидридового компонента и способствуют повышению прочностных показателей искусственного камня.

References

1. Gordina A.F., Polyanskikh I.S., Gafipov A.T., Kuzmina N.V., Pudov I.A. Structure formation aspects for fluoranhydrate-based materials. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2022. No. 11, pp. 50–57. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-808-11-50-57>
2. Nurieva E.M., Bakhtin A.I., Denisov I.G., Galleev A.A., Altykis M.G., Khaliullin M.I., Rakhimov R.Z. On the mechanism of influence of mineral and chemical additives on the hydration process of gypsum binder based on anhydrite (CaSO_4 II). *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo*. 1999. No. 1, pp. 56–62. (In Russian).
3. Altykis M.G., Rakhimov R.Z., Khaliullin M.I., Morozov V.P. Development of theoretical foundations and creation of a new generation of high-quality, economical and environmentally friendly gypsum

- (CaSO₄ II) // *Известия вузов. Строительство*. 1999. № 1. С. 56–62.
3. Алтыкис М.Г., Рахимов Р.З., Халиуллин М.И., Морозов В.П. Развитие теоретических основ и создание нового поколения высококачественных, экономичных и экологически чистых гипсовых вяжущих и материалов. В сб.: *Повышение эффективности производства и применения гипсовых материалов и изделий*. М., 2002. С. 138–142.
 4. Гордина А.Ф., Полянских И.С., Токарев Ю.В., Бурьянов А.Ф., Сеньков С.А. Водостойкие гипсовые материалы, модифицированные цементом, микрокремнеземом и наноструктурами // *Строительные материалы*. 2014. № 6. С. 35–37.
 5. Петропавловская В.Б., Белов В.В., Новиченкова Т.Б. Малоэнергоёмкие гипсовые строительные композиты: Монография. Тверь: ТвГТУ, 2014. 136 с.
 6. Клименко В.Г. Активаторы твердения ангидрита на основе продуктов термообработки гипса // *Известия вузов. Строительство*. 2011. № 4 (628). С. 21–28.
 7. Фишер Х.-Б., Второв Б.Б., Бурьянов А.Ф. Исследование влияния многокомпонентных активаторов твердения на свойства природного ангидрита // *Строительные материалы*. 2023. № 1–2. С. 63–68. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-810-1-2-63-68>
 8. Бурьянов А.Ф., Фишер Х.-Б., Гальцева Н.А., Махортов Д.Н., Хасаншин Р.Р. Исследование влияния различных активизирующих добавок на свойства ангидритового вяжущего // *Строительные материалы*. 2020. № 7. С. 4–9. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-782-7-4-9>
 9. Батова М.Д., Семёнова Ю.А., Гордина А.Ф., Яковлев Г.И., Бурьянов А.Ф., Стивенс А.Э., Бегунова Е.В. Структура и свойства гипсовых композиций с минеральными дисперсными добавками // *Строительные материалы*. 2021. № 10. С. 49–53. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-796-10-49-53>
 10. Сулименко Л.М., Шалуненко Н.И., Урханова Л.А. Механохимическая активация вяжущих композиций // *Известия вузов. Строительство*. 1995. № 11. С. 63–68.
 11. Аввакумов Е.Г., Гусев А.А. Механические методы активации в переработке природного и техногенного сырья. Новосибирск: Гео, 2009. 155 с.
 12. Прокофьев В.Ю., Гордина Н.Е. Процессы измельчения и механохимической активации в технологии оксидной керамики: обзор // *Стекло и керамика*. 2012. № 2. С. 29–34.
 13. Ивашенко Ю.Г., Евстигнеев С.А., Страхов А.В. Роль наполнителей и модификаторов в формировании структуры и свойств композитов на основе гипсового вяжущего. *Надежность и долговечность строительных материалов, конструкций и оснований фундаментов: Материалы VI Международной научно-технической конференции*. Волгоград: ВолГАСУ, 2011. С. 159–162.
 - binders and materials. *Increasing the efficiency of production and use of gypsum materials and products*. Moscow. 2002, pp. 138–142. (In Russian).
 4. Gordina A.F., Polyanskikh I.S., Tokarev Yu.V., Buryanov A.F., Senkov S.A. Water-resistant gypsum materials modified with cement, microsilica and nano-structures. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2014. No. 6, pp. 35–37. (In Russian).
 5. Petropavlovskaya V.B., Belov V.V., Novichenkova T.B. Maloenergoyemkiye gipsovyye stroitel'nyye kompozity: monografiya [Low-energy gypsum building composites: monograph]. Tver: TVGTU. 2014. 136 p.
 6. Klimenko V.G. Anhydrite hardening activators based on gypsum heat treatment products. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo*. 2011. No. 4 (628), pp. 21–28. (In Russian).
 7. Fisher H.-B., Vtorov B.B., Buryanov A.F. Study of the effect of multicomponent hardening activators on the properties of natural anhydrite. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2023. No. 1–2, pp. 63–68. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-810-1-2-63-68>
 8. Buryanov A.F., Fisher H.-B., Gal'tseva N.A., Machortov D.N., Hasanshin R.R. Research in the influence of various activating additives on the properties of anhydrite binder. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2020. No. 7, pp. 4–9. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-782-7-4-9>
 9. Batova M.D., Semenova Yu.A., Gordina A.F., Yakovlev G.I., Buryanov A.F., Stevens A.E., Begunova E.V. Structure and properties of gypsum compositions with mineral dispersed additives. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2021. No. 10, pp. 49–53. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-796-10-49-53>
 10. Sulimenko L.M., Shalunenko N.I., Urkhanova L.A. Mechanochemical activation of binder compositions. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo*. 1995. No. 11, pp. 63–68. (In Russian).
 11. Avvakumov E.G., Gusev A.A. Mekhanicheskie metody aktivatsii v pererabotke prirodnogo i tekhnogenno-go syr'ya [Mechanical methods of activation in the processing of natural and technogenic raw materials]. Novosibirsk: "Geo". 2009. 155 p.
 12. Prokofiev V.Yu., Gordina N.E. Processes of grinding and mechanochemical activation in the technology of oxide ceramics (review). *Steklo i keramika*. 2012. No. 2, pp. 29–34. (In Russian).
 13. Ivashchenko Yu.G., Evstigneev S.A., Strakhov A.V. The role of fillers and modifiers in the formation of the structure and properties of composites based on gypsum binder. *Reliability and durability of building materials, structures and foundations: Proceedings of the VI International Scientific and Technical Conference*. Volgograd: VolGASU. 2011, pp. 159–162. (In Russian).
 14. Ancharov A.I. Mekhanokompozity – prekursory dlya sozdaniya materialov s novymi svoystvami [Mechano-composites as precursors for creating materials with

14. Анчаров А.И. Механокомпозиты-прекурсоры для создания материалов с новыми свойствами. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2010. 424 с.
15. Смоляков В.К., Лапшин О.В. Макроскопическая кинетика механохимического синтеза: Монография. Томск: Издательство Института оптики атмосферы СО РАН, 2011. 192 с.
16. Будников П.П., Зорин С.П. Ангидритовый цемент. М.: Промстройиздат, 1954. 93 с.
17. Гаркави М.С., Дергунов С.А., Сериков С.В. Формирование структуры композиционного цемента в процессе измельчения // *Строительные материалы*. 2021. № 10. С. 65–68. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-796-10-65-68>
18. Байдарашвили М.М., Сахарова А.С. Исследование сорбционных свойств материалов с помощью физико-химического метода распределения центров адсорбции // *Сорбционные и хроматографические процессы*. 2020. Т. 20. № 1. С. 87–94.
19. Сычев М.М. Твердение вяжущих веществ. Л.: Стройиздат (Ленинград. отделение), 1974. 80 с.
20. Кузнецова Т.В., Сычев М.М., Осокин А.П. и др. Специальные цементы: Учебное пособие для вузов. СПб.: Стройиздат, 1997. 314 с.
- new properties]. Novosibirsk: Publishing house of SO RAN. 2010. 424 p.
15. Smolyakov V.K., Lapshin O.V. Makroskopicheskaya kinetika mekhanokhimicheskogo sinteza: monografiya [Macroscopic kinetics of mechanochemical synthesis: monograph]. Tomsk: Publishing House of the Institute of Atmospheric Optics SB RAS, 2011. 192 p.
16. Budnikov P.P., Zorin S.P. Anhydrite cement [Anhydrite cement]. Moscow: Promstroyizdat. 1954. 93 p.
17. Garkavi M.S., Dergunov S.A., Serikov S.V. Formation of the structure of composite cement in the grinding process. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2021. No. 10, pp. 65–68. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-796-10-65-68>
18. Baidarashvili M.M., Sakharova A.S. Study of the sorption properties of materials using the physicochemical method of distribution of adsorption centers. *Sorbtsionnyye i khromatograficheskiye protsessy*. 2020. Vol. 20. No. 1, pp. 87–94. (In Russian).
19. Sychev M.M. [Hardening of binders]. Leningrad: Stroyizdat (Leningrad branch). 1974. 80 p.
20. Kuznetsova T.V., Sychev M.M., Osokin A.P. and others. *Spetsial'nye tsementy: Uchebnoe posobie dlya vuzov* [Special cements: Textbook for universities]. St. Petersburg: Stroyizdat. 1997. 314 p.

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.



**Заказать литературу можно через редакцию
по тел.: (499) 390-87-17; e-mail: mail@rifsm.ru,
или оформить заявку на сайте www.rifsm.ru**

УДК 666.914

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-818-10-58-62>

Н.И. АЛФИМОВА¹, канд. техн. наук, доцент (alfimovan@mail.ru);

С.Ю. ПИРИЕВА^{1,2}, ассистент (p-sevda@mail.ru)

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

² Белгородский государственный национальный исследовательский университет (308015, г. Белгород, ул. Победы, 85)

Изучение влияния рецептурно-технологических параметров на водопоглощение прессованных материалов из цитрогипса

Использование гипсосодержащих отходов в качестве сырья для производства гипсовых вяжущих и изделий на их основе вписывается в концепцию рационального природопользования. Однако получение качественного готового продукта в случае замены природного гипса гипсосодержащими отходами с применением стандартных технологических режимов и оборудования крайне затруднено. Это способствует разработке дополнительных приемов и новых подходов к изготовлению гипсовых изделий, наиболее перспективным из которых является прессование. Исходя из того, что изготовление изделий методом прессования – энергоемкий процесс, крайне важна его оптимизация путем подбора рациональных рецептурно-технологических параметров, которые будут обеспечивать получение изделий с заданными физико-механическими характеристиками при минимальных материально-энергетических затратах. С этой целью было проведено исследование влияния количества наполнителя, давления прессования и водотвердого отношения на водопоглощение изделий, полученных путем прессования полусухой сырьевой смеси, состоящей из цитрогипсового вяжущего и цитрогипса (наполнитель).

Ключевые слова: рациональное природопользование, утилизация отходов, гипсосодержащие отходы, цитрогипс, полусухое прессование.

Исследование выполнено в рамках государственного задания на создание в 2021 г. новых лабораторий, в том числе под руководством молодых перспективных исследователей национального проекта «Наука и университеты», по научной теме «Разработка научных и технологических основ создания комплексной технологии переработки гипсосодержащих отходов различных промышленных предприятий», FZWG-2021-0017. Работа выполнена на оборудовании Центра высоких технологий БГТУ им. В.Г. Шухова.

Для цитирования: Алфимова Н.И., Пириева С.Ю. Изучение влияния рецептурно-технологических параметров на водопоглощение прессованных материалов из цитрогипса // *Строительные материалы*. 2023. № 10. С. 58–62.

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-818-10-58-62>

N.I. ALFIMOVA¹, Candidate of Sciences (Engineering) (alfimovan@mail.ru); S.Yu. PIRIEVA^{1,2}, Assistant (p-sevda@mail.ru)

¹ Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (46, Kostukova Street, Belgorod, 308012, Russian Federation)

² Belgorod National Research University (85, Pobedy Street, Belgorod, 308015, Russian Federation)

Study of the Effect of Recipe and Technological Parameters for Water Absorption of Pressed Citrogyypsum-Based Materials

The use of gypsum-containing by-products as a raw material for the production of gypsum binders and products corresponds to the concept of rational environmental management. However, obtaining a high-quality gypsum product, in the case of replacing natural gypsum with gypsum-containing by-products, using standard technological methods and equipment is extremely difficult. This contributed to the development of additional techniques and new approaches to the manufacture of gypsum products, the most promising of which is the pressing method. Based on the fact that the manufacture of products using the pressing method is an energy-intensive process, it is extremely important to optimize it by selecting rational formulation and technological parameters that will ensure the production of a product with specified physical and mechanical characteristics with minimal material and energy consumption. For this purpose, the influence of the amount of filler, pressing pressure and water-solid ratio on the water absorption of products obtained by pressing a semi-dry raw mixture consisting of citrogypsum binder and citrogypsum (filler) was studied.

Keywords: rational environmental management, waste disposal, gypsum-containing by-products, citrogypsum, semi-dry pressing method.

The work was realized under support of the State Assignment for the creation of new laboratories in 2021, including under the guidance of young promising researchers of the national project «Science and Universities», research title is «Development of scientific and technological foundations for the creation of an integrated technology for processing gypsum-containing waste from various industrial enterprises», FZWG-2021-0017. The work was realized using equipment of the High Technology Center at BSTU, named after V. G. Shukhov.

For citation: Alfimova N.I., Pirieva S.Yu. Study of the effect of recipe and technological parameters for water absorption of pressed citrogypsum-based materials. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2023. No. 10, pp. 58–62. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-818-10-58-62>

Рациональное природопользование – один из приоритетов развития многих отраслей промышленности, в том числе и строительной. В связи с этим, поиск путей повторного использования отходов различных производств и получение на их основе строительных материалов являются актуальной задачей, решение которой позволит не только снизить экологический прессинг, но и расширить сырьевую базу регионов [1–5].

Гипсосодержащие отходы (ГСО) – цитрогипс, фосгогипс, борогипс, отходы производства гипсокартона и др. – могут выступать в качестве альтернативы природному гипсу при получении гипсовых вяжущих и изделий на их основе [6–10]. Специфика

гический прессинг, но и расширить сырьевую базу регионов [1–5]. Гипсосодержащие отходы (ГСО) – цитрогипс, фосгогипс, борогипс, отходы производства гипсокартона и др. – могут выступать в качестве альтернативы природному гипсу при получении гипсовых вяжущих и изделий на их основе [6–10]. Специфика

ГСО (наличие примесей, высокая влажность, удельная поверхность и т. д.) предполагает использование специальных, отличных от традиционных подходов, которые позволяют нивелировать данные особенности и получать на выходе качественный материал с достаточно высокими физико-механическими характеристиками, наиболее перспективным из которых является прессование.

Эффективность получения изделий методом прессования из различных гипсосодержащих отходов подтверждена результатами многочисленных исследований [11–17 и др.]. Также необходимо отметить, что получение конечных изделий может осуществляться как из $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$, так и из его смеси с $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Изготовление изделий из смеси полу(вяжущее) и дигидрата кальция (наполнитель) позволит увеличить объем утилизации гипсосодержащих отходов и снизить расходы, связанные с производством вяжущих.

Исходя из того, что изготовление изделий с использованием метода прессования является энергоемким процессом, а при повышенном давлении (более 10 МПа) также возрастает его металлоемкость, крайне важна оптимизация процесса производства путем подбора рациональных рецептурно-технологических параметров, которые обеспечивали бы получение изделий с заданными физико-механическими характеристиками при минимальных материально-энергетических затратах.

Ранее была доказана эффективность изготовления изделий методом полусухого прессования сырьевой смеси, состоящей из цитрогипсового вяжущего (ЦГВ) и цитрогипса (ЦГ), при давлении прессования 5–7 МПа, а также изучено влияние рецептурно-технологических параметров (количества ЦГ в смеси, давления прессования и водотвердого отношения) на среднюю плотность и предел прочности при сжатии образцов сразу после прессования (сырцы), среднюю плотность и предел прочности при сжатии образцов, высушенных в естественных условиях до постоянной массы. Анализ полученных зависимостей позволил установить, что увеличение давления прессования, водотвердого отношения и снижение доли наполнителя в смеси способствуют росту физико-механических характеристик изделий [17].

Целью данного исследования было выявление влияния обозначенных рецептурно-технологических параметров на водопоглощение образцов.

Объекты и методы исследований

В качестве объекта исследования выступал отход биохимического синтеза лимонной кислоты – цитрогипс (г. Белгород) и вяжущее на его основе.

Сырьевая смесь изготавливалась путем смешивания до однородной массы цитрогипсового вяжущего, фракционированного цитрогипса и воды, взятых в необходимом процентном соотношении (табл. 1).

Таблица 1

Table 1

Условия планирования эксперимента
Experiment planning conditions

Фактор		Уровень варьирования			Интервал варьирования
Натуральный вид	Кодированный вид	-1	0	+1	
Содержание ФЦГ, мас. %	X_1	10	30	50	20
Давление прессования, МПа	X_2	3	5	7	2
Водотвердое отношение	X_3	0,15	0,2	0,25	0,05

Таблица 2

Table 2

Матрица планирования
Planning matrix

№ п/п	Значения факторов						Водопоглощение, мас. %
	Кодированный вид			Натуральный вид			
	X_1	X_2	X_3	Содержание ФЦГ, мас. %	Давление прессования, МПа	Водотвердое отношение	
1	+1	+1	+1	50	7	0,25	17,7
2	+1	+1	-1	50	7	0,15	15,4
3	+1	-1	+1	50	3	0,25	16,6
4	+1	-1	-1	50	3	0,15	17,4
5	-1	+1	+1	10	7	0,25	11,5
6	-1	+1	-1	10	7	0,15	12,5
7	-1	-1	+1	10	3	0,25	11,7
8	-1	-1	-1	10	3	0,15	18
9	+1	0	0	50	5	0,2	16
10	-1	0	0	10	5	0,2	12,3
11	0	+1	0	30	7	0,2	11,8
12	0	-1	0	30	3	0,2	15,8
13	0	0	+1	30	5	0,25	13
14	0	0	-1	30	5	0,15	15,8
15	0	0	0	30	5	0,2	15,4
Контрольная серия							
16	-	-1	-1	0	3	0,15	17
17	-	0	0	0	5	0,2	12,1
18	-	+1	+1	0	7	0,25	11,1

Синтез вяжущего из цитрогипса осуществлялся путем обжига при температуре 175°C. Также цитрогипс фракции менее 112 мкм (фракционированный цитрогипс ФЦГ) выступал в качестве наполнителя.

Формование образцов осуществлялось путем прессования в металлической пресс-форме с цилиндрической поверхностью при заданном давлении (табл. 1) с помощью лабораторного гидравлического пресса с усилием прессования 10 т; выдерживание образца при заданном давлении осуществлялось в

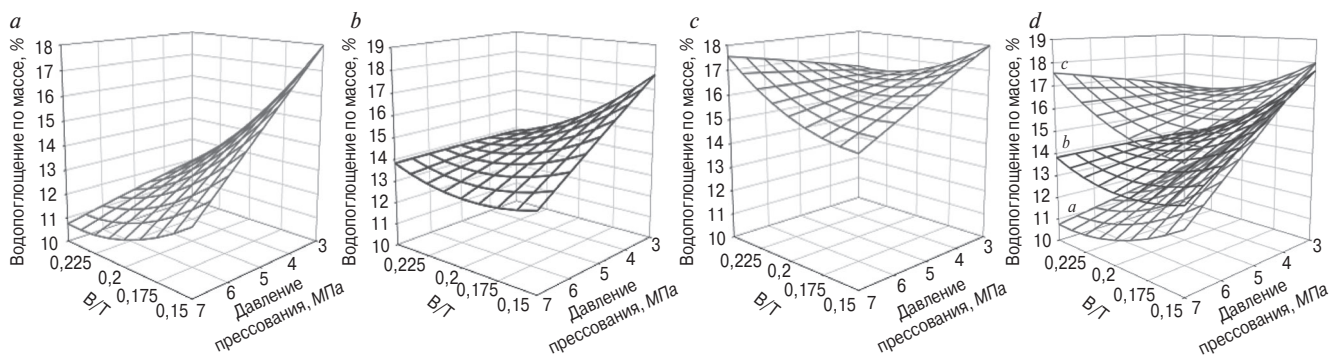


Рис. 1. Влияние давления прессования и В/Т на водопоглощение (мас. %) образцов в зависимости от содержания фракционированного цитрогипса в смеси: *a* – 10%; *b* – 30%; *c* – 50%; *d* – совмещенные номограммы

Fig. 1. Effect of pressure and W/T on water absorption by weight of samples depending on the content of fractionated citrogypsum in the mixture: *a* – 10%; *b* – 30%; *c* – 50%; *d* – combined nomograms

течение 30 с, после чего давление снималось и образец выдавливался из формы в ручном режиме (рис. 1, *b*). На выходе получались образцы-цилиндры диаметром 31 мм и высотой 30–40 мм. Наиболее подробно процесс изготовления цитрогипсового вяжущего и образцов описан в [17].

Изучение влияния рецептурно-технологических параметров на водопоглощение осуществлялось с помощью метода математического планирования эксперимента по некомпозиционному трехуровневому плану Бокса–Бенкина. В качестве факторов варьирования выступали содержание фракционированного цитрогипса в смеси (X_1), давление прессования (X_2) и водотвердое отношение (X_3) (табл. 1).

Водопоглощение определялось по стандартной методике путем отношения массы воды, поглощенной образцом при полном насыщении, к массе сухого образца в процентах.

Микроструктура образцов исследовалась с помощью сканирующего электронного микроскопа TESCAN MIRA 3 LMU.

Результаты и обсуждение

В соответствии с матрицей планирования (табл. 1) было изготовлено 15 серий образцов, а также три серии контрольных образцов, не содержащих в своем составе фракционированный цитрогипс (табл. 2, состав № 16–18).

После статистической компьютерной обработки экспериментальных данных было получено уравнение регрессии, позволяющее описать влияние варьируемых факторов на водопоглощение образцов по массе – W . Полученная модель достаточно хорошо описывает изучаемую систему, о чем свидетельствует высокий коэффициент среднеквадратического отклонения ($R^2=0,92$):

$$W = 14,1 + 1,7X_1 - 1,1X_2 - 0,9X_3 + 0,3X_1^2 - 0,02X_2^2 + 0,6X_3^2 + 0,6X_1X_2 + 1,1X_1X_3 + 1,1X_2X_3$$

Анализ уравнения регрессии позволяет сделать вывод, что наиболее сильное влияние на водопоглощение оказывает фактор X_1 (содержание ФЦГ, мас. %), так как он имеет наибольший по абсолютной величине коэффициент (+1,7). При нулевых

значениях X_2 и X_3 с уменьшением доли ФГЦ в смеси значение водопоглощения будет снижаться и при минимальном значении данного фактора ($X_1=10\%$) снижение по отношению к среднему ($X_1=30\%$) составит 1,4%, а по отношению к максимальному ($X_1=50\%$) – 3,4%. Наименьшее влияние на снижение водопоглощения будет оказывать увеличение водотвердого отношения (X_3): при нулевых значениях X_1 и X_2 с увеличением В/Т от 0,2 ($X_3=0$) до 0,25 ($X_3=+1$) водопоглощение снизится на 0,3%.

Также из уравнения регрессии можно сделать вывод, что при отрицательном значении коэффициента при X_2 с увеличением давления прессования водопоглощение будет снижаться.

С помощью полученного уравнения регрессии были построены зависимости контролируемого параметра (рис. 1) от варьируемых факторов, анализ которых позволил выявить ряд закономерностей. В частности, при 10%-м содержании ФЦГ (рис. 1, *a*) с увеличением давления прессования и водотвердого отношения наблюдается снижение водопоглощения и минимальными значениями данного параметра (11,5%) отличаются образцы, заформованные при 7 МПа и В/Т = 0,25 (табл. 2, состав № 5), максимальными (18%) – образцы, заформованные при 3 МПа и В/Т = 0,15 (табл. 2, состав № 8). Показатели водопоглощения в зависимости от В/Т и давления прессования лежат в пределах 11,5–18%.

При 30%-м содержании ФЦГ в смеси (рис. 1, *b*) на снижение водопоглощения в большей степени оказывает влияние водотвердое отношение. Так, при В/Т=0,15 с увеличением давления прессования от 3 до 7 МПа показатели водопоглощения снижаются на 4%; при В/Т=0,2 – на 2%. Таким образом, при 30%-м содержании цитрогипса и В/Т=0,2 формируется максимально плотная структура материала.

Сопоставление графиков зависимостей позволило установить, что с увеличением доли ФЦГ в смеси водопоглощение увеличивается, это связано со снижением средней плотности образцов (рис. 1, *c*).

Также необходимо отметить, что вне зависимости от содержания ФЦГ в смеси максимальными, примерно равными значениями водопоглощения по массе ($\approx 17,5$ –18%) отличаются образцы, заформо-

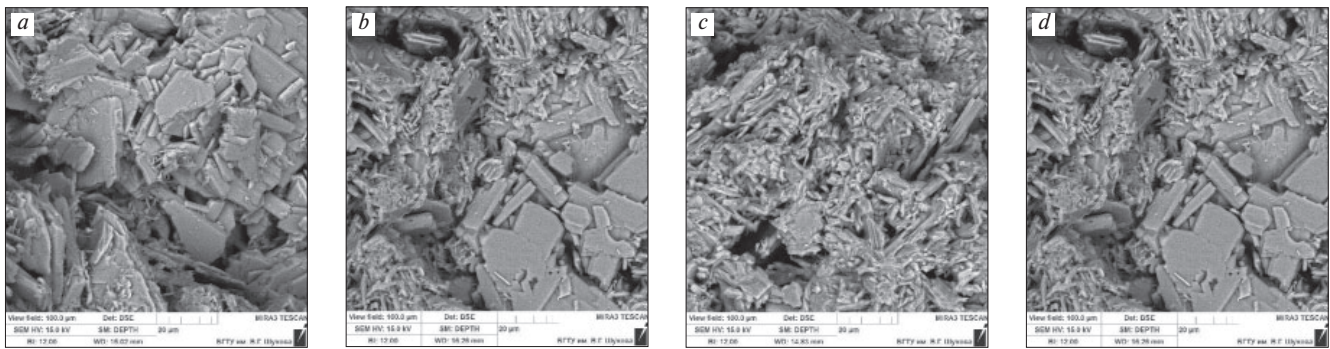


Рис. 2. Микроструктура образцов, изготовленных при давлении прессования 5 МПа ($X_2=0$); В/Т=0,2 ($X_3=0$) с содержанием ФЦГ по массе: *a* – 50%; *b* – 30%; *c* – 10%; *d* – 0%

Fig. 2. Microstructure of samples made with pressure of 5 MPa ($X_2 = 0$) and W/T of 0.2 ($X_3=0$) containing FCG by weight: *a* – 50%; *b* – 30%; *c* – 10%; *d* – 0%

ванные при минимальных значениях давления прессования (3 МПа) и водотвердого отношения (0,15).

При ранее полученных значениях средней плотности сухих образцов [16] и водопоглощения было установлено, что данные свойства имеют обратную зависимость: вне зависимости от содержания ФЦГ в системе, при снижении показателей средней плотности сухих образцов водопоглощение увеличивается. Однако необходимо отметить, что при 50%-м содержании ФЦГ есть некоторое отклонение от общей закономерности. Так, при В/Т=0,25 с ростом давления наблюдается увеличение средней плотности образцов и показателей водопоглощения. Данная закономерность, вероятно, связана с тем, что высокое давление прессования и показатель В/Т обеспечивают значительное уплотнение системы, однако в данном случае из-за пониженного содержания вяжущего в формовочной массе находится значительное количество свободной воды, которая выдавливается, способствуя формированию на поверхности образцов большого количества открытых пор, предопределяя тем самым рост водопоглощения. К тому же водопоглощение контрольной серии образцов без ФЦГ (табл. 2, составы № 16, 18) лежит в тех же пределах (11,1–18%), что и образцов, изготовленных с введением ФЦГ; при этом сопоставление показателей по контрольной группе позволило установить, что с увеличением давления прессования и В/Т показатели водопоглощения снижаются, это предопределяется повышением их средней плотности.

Анализ микроструктуры образцов, изготовленных при $X_2=0$ (давление прессования 5 МПа) и $X_3=0$ (водотвердое отношение=0,2), показал, что с увеличением доли фракционированного цитрогипса в смеси закономерно увеличивается рыхлость структуры и количество пор. Наиболее плотной структурой и, как следствие, более низкими показателями водопоглощения отличаются образцы, изготовленные из смеси с 10 мас. % содержанием фракционированного цитрогипса (рис. 2, *c*, состав № 10 табл. 2), и контрольный состав (рис. 2, *d*, состав № 17 табл. 2), что согласуется с ранее сделанными выводами.

Выводы

В ходе проведенных экспериментов установлено влияние рецептурно-технологических параметров (содержания ФЦГ в смеси, давления прессования, водотвердого отношения) на водопоглощение образцов, полученных путем прессования полусухой сырьевой смеси, состоящей из фракционированного цитрогипса и цитрогипсового вяжущего. Выявлено, что определяющим фактором, влияющим на рост показателей водопоглощения, является увеличение доли ФЦГ, что обусловлено повышением пористости и рыхлости структуры образцов. При этом повышение давления прессования и количества воды затворения положительно сказывается на водопоглощении, снижая его значения.

Список литературы / References

1. Jawaid M., Singh B., Kian L.K., Zaki S.A., Radzi A.M. Processing techniques on plastic waste materials for construction and building applications. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*. 2023. Vol. 40. 100761. DOI: 10.1016/j.cogsc.2023.100761.
2. Oluleye B.I., Chan D.W.M., Saka A.B., Olawumi T.O., Circular economy research on building construction and demolition waste: A review of current trends and future research directions. *Journal of Cleaner Production*. 2022. Vol. 357. 131927. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.131927.
3. Ву Ким З., Танг В.Л., Баженова С.И., Нгуен Дуюн П. Возможность использования доменных шлаков в производстве бетонов и растворов во Вьетнаме // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2019. № 11. С. 17–24. DOI: 10.34031/2071-7318-2019-4-11-17-24.
3. Vu Kim Z., Tang V.L., Bazhenova S.I., Nguyen Duyen P. Possibility of using blast-furnace slags in the production of concretes and mortars in Vietnam. *Vestnik of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2019. No. 11, pp. 17–24. (In Russian) DOI: 10.34031/2071-7318-2019-4-11-17-24
4. Аль-Бу-Али У.С., Лесовик Р.В., Сопин Д.М., Ахмед А.А.А., Лесовик Г.А. Переработанный строительный отход как бетонный заполнитель для

- устойчивых строительных материалов // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2020. № 11. С. 32–40. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-11-32-40.
4. Al-Bu-Ali U.S., Lesovik R.V., Sopin D.M., Akhmed A.A.A., Lesovik G.A. Recycled building waste as concrete aggregate for sustainable building materials. *Vestnik of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2020. No. 11, pp. 32–40. (In Russian) DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-11-32-40
 5. Kozhukhova N., Kozhukhova M., Teslya A., Nikulin I. The effect of different modifying methods on physical, mechanical and thermal performance of cellular geopolymers as thermal insulation materials for building structures. *Buildings*. 2022. Vol. 12. 241. DOI: 10.3390/buildings12020241
 6. Calderón-Morales B.R.S., García-Martínez A., Pineda P., García-Tenório R. Valorization of phosphogypsum in cement-based materials: Limits and potential in eco-efficient construction. *Journal of Building Engineering*. 2021. Vol. 44. 102506. DOI: 10.1016/j.jobbe.2021.102506
 7. Алфимова Н.И., Пириева С.Ю., Елистраткин М.Ю., Кожухова Н.И., Титенко А.А. Обзорный анализ способов получения вяжущих из гипсосодержащих отходов промышленных производств // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2020. № 11. С. 8–23.
 7. Alfimova N.I., Pirieva S.Yu., Elistratkin M.Yu., Kozhuhova N.I., Titenko A.A. Production methods of binders containing gypsum-bearing wastes: a review. *Vestnik of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2020. No. 11, pp. 8–23. (In Russian) DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-11-8-23
 8. Чернышева Н.В., Свергузова С.В., Тарасова Г.И. Получение гипсового вяжущего из фосфогипса Туниса // *Строительные материалы*. 2010. № 7. С. 28–30.
 8. Chernysheva N.V., Svergzuzova S.V., Tarasova G.I. Obtaining a gypsum binder from Tunisian phosphogypsum. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2010. No. 7, pp. 28–30. (In Russian).
 9. Guan B., Yang L., Wu Z., Shen Z., Ma X., Ye Q. Preparation of α -calcium sulfate hemihydrate from FGD gypsum in K, Mg-containing concentrated CaCl_2 solution under mild conditions. *Fuel*. 2009. Vol. 88, pp. 1286–1293. DOI: 10.1016/j.fuel.2009.01.004
 10. Ma B., Lu W., Su Y., Li Y., Gao C., He X. Synthesis of α -hemihydrate gypsum from cleaner phosphogypsum. *Journal of Cleaner Production*. 2018. Vol. 195, pp. 396–405. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.05.228
 11. Мирсаев Р.Н., Бабков В.В., Недосеко И.В. и др. Структурообразование и твердение прессованных композиций на основе дигидрата сульфата кальция // *Строительные материалы*. 2009. № 6. С. 6–9.
 11. Mirsaev R.N., Babkov V.V., Nedoseko I.V. et al. Structure formation and hardening of pressed compositions based on calcium sulfate dehydrate. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2009. No. 6, pp. 6–9. (In Russian).
 12. Petropavlovskii K., Novichenkova T., Petropavlovskaya V., Sulman M., Fediuk R., Amran M. Faience waste for the production of wall. *Materials*. 2021. Vol. 14(21). 6677. DOI: 10.3390/ma14216677
 13. Алфимова Н.И., Пириева С.Ю., Левицкая К.М. Повышение качественных характеристик прессованных изделий из цитрогипса и вяжущего на его основе // *Строительные материалы*. 2023. № 5. С. 89–94. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-813-5-89-94>
 13. Alfimova N.I., Pirieva S.Yu., Levickaya K.M. Improvement in qualitative characteristics of pressed products from citrogypsum and based binder. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2023. No. 5, pp. 89–94. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-813-5-89-94>
 14. Петропавловская В.Б., Новиченкова Т.Б., Бурьянов А.Ф. Повышение технологических свойств безобжиговых гиперпрессованных гипсовых изделий // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2013. № 6. С. 75–78.
 14. Petropavlovskaya V.B., Novichenkova T.B., Buryanov A.F. Improving the technological properties of non-firing hyper-pressed gypsum products. *Vestnik of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2013. No. 6, pp. 75–78. (In Russian).
 15. Халиков Р.М., Синицина Е.А., Силантьева Е.И., Пудовкин А.Н., Недосеко И.В. Модифицирующее усиление твердения прессованных строительных гипсовых нанокомпозитов // *Нанотехнологии в строительстве: научный интернет-журнал*. 2019. Т. 11. № 5. С. 549–560. DOI: 10.15828/2075-8545-2019-11-5-549-560
 15. Khalikov R.M., Sinitsina E.A., Silantyeva E.I., Pudovkin A.N., Nedoseko I.V. Modifying intensification of the hardening of extruded construction gypsum nanocomposites. *Nanotehnologii v stroitel'stve*. 2019. Vol. 11. No. 5, pp. 549–560. DOI: 10.15828/2075-8545-2019-11-5-549-560
 16. Петропавловская В.Б., Бурьянов А.Ф., Петропавловский К.С., Новиченкова Т.Б. Высокопрочные гипсовые материалы // *Химия, физика и механика материалов*. 2019. № 1 (20). С. 3–13.
 16. Petropavlovskaya V.B., Buryanov A.F., Petropavlovskii K.S., Novichenkova T.B. High strength gypsum materials. *Khimiya, fizika i mexanika materialov*. 2019. No. 1 (20), pp. 3–13. (In Russian).
 17. Алфимова Н., Пириева С., Левицкая К., Елистраткин М. The production of gypsum materials with recycled citrogypsum using semi-dry pressing technology. *Recycling*. 2023. Vol. 8. 34. doi:10.3390/recycling8020034

УДК627.8.034.94:677.494.743.22

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-818-10-63-69>

В.Н. ШАЛИМОВ¹, канд. техн. наук, рук. службы технической поддержки (shalimov@tn.ru),
 А.В. ЦЫБЕНКО¹, рук. технической службы направления «Инженерная гидроизоляция» (cybenko@tn.ru),
 И.Н. ГОГЛЕВ¹, технический специалист направления «Инженерная гидроизоляция» (goglev@tn.ru);
 С.А. ЛОГИНОВА², канд. техн. наук (sl79066171227@yandex.ru)

¹ ООО «ТехноНИКОЛЬ – Строительные Системы» (129110, г. Москва, ул. Гиляровского, 47, стр. 5)

² Ярославский государственный технический университет (150001, г. Ярославль, Московский пр., 88)

Исследование химической стойкости ПВХ-мембран для гидроизоляции

Рассмотрены сферы применения полимерных гидроизоляционных ПВХ-мембран при строительстве различных зданий и сооружений, в частности сооружений класса КС-3. Кратко рассмотрены основные преимущества полимерных гидроизоляционных мембран на основе ПВХ, такие как высокая прочность на одноосное и многоосное растяжение, высокая степень относительного удлинения, химическая/биологическая стойкость, долговечность и др. Данные преимущества позволяют применять ПВХ-мембраны в качестве гидроизоляции и вторичной защиты различных железобетонных и бетонных конструкций независимо от назначения. Проведены исследования химической стойкости гидроизоляционных полимерных ПВХ-мембран. В первой части исследования произведена оценка химической стойкости мембраны LOGICBASE™ марки V-SL в соответствии с требованиями ГОСТ Р 56910–2016, а также в соответствии с требованиями по защите бетонных и железобетонных конструкций от коррозии в СП 28.13330.2017 и ГОСТ 31384–2017. Рассмотрено влияние растворов агрессивных химических веществ (гидрокарбонат и хлорид натрия, гидроксид натрия, гидроксид кальция, сернистая и серная кислоты) на физико-механические свойства полимерных гидроизоляционных мембран (прочность при растяжении, относительное удлинение). Испытуемые образцы из полимерных мембран погружали в растворы агрессивных химических веществ сроком на 30–120 сут. Далее производился контроль изменения физико-механических характеристик материала (прочность при растяжении, относительное удлинение, потеря массы и т. д.). По результатам исследования выявлено, что при воздействии 3%-го раствора гидрокарбоната натрия NaHCO₃ в течение 120 сут прочность мембраны при продольном растяжении возросла на 6,44%, а относительное удлинение увеличилось на 2,74%. В дальнейшем произведен расчет в соответствии с ПНСТ 630–2011 по определению потенциального срока службы полимерной мембраны LOGICBASE™ V-SL в условиях агрессивных воздействий подземных вод, который составил не менее 100–150 лет.

Ключевые слова: бетон, железобетон, вторичная защита, коррозия бетона, ПВХ, полимерные мембраны, гидроизоляция, химическая стойкость, растяжение, относительное удлинение, долговечность.

Для цитирования: Шалимов В.Н., Цыбенко А.В., Гоглев И.Н., Логинова С.А. Исследование химической стойкости ПВХ-мембран для гидроизоляции // *Строительные материалы*. 2023. № 10. С. 63–69. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-818-10-63-69>

V.N. SHALIMOV¹, Candidate of Sciences (Engineering), head of technical support (shalimov@tn.ru),

A.V. CYBENKO¹, head of the technical service of the direction "Engineering waterproofing" (cybenko@tn.ru),

I.N. GOGLEV¹, technical specialist of the direction "Engineering waterproofing" (goglev@tn.ru);

S.A. LOGINOVA², Candidate of Sciences (Engineering) (sl79066171227@yandex.ru)

¹ LLC TECHNOCOL-Construction Systems (47, str. 5, Gilyarovskogo Street, Moscow, 129110, Russian Federation)

² Yaroslavl State Technical University (88, Moskovsky Avenue, Yaroslavl, 150001, Russian Federation)

Investigation of Chemical Resistance of PVC Membranes for Engineering Waterproofing

The scope of application of polymer waterproofing PVC membranes in the construction of various buildings and structures (in particular, structures of the CS-3 class) are considered. The main advantages of PVC-based polymer waterproofing membranes, such as: high uniaxial and multiaxial tensile strength, high degree of relative elongation, chemical/biological resistance, durability, etc. are briefly considered. These advantages allow the use of PVC-membranes as waterproofing and secondary protection of various reinforced concrete and concrete structures, regardless of their purpose. Chemical resistance researches of waterproofing polymer PVC-membranes have been conducted in three parts. In the first part of the research, the chemical resistance of the LOGICBASE™ membrane of the V-SL brand was evaluated on the basis of the Testing Laboratory of JSC TSNII Promzdaniy, in accordance with the requirements of GOST R 56910–2016, as well as in accordance with the requirements for the protection of concrete and reinforced concrete structures from corrosion in SP 28.13330.2017 and GOST 31384–2017. The influence of solutions of aggressive chemicals (such as bicarbonate and sodium chloride, sodium hydroxide, calcium hydroxide, sulfuric and sulfurous acids) on the physical and mechanical properties of polymer waterproofing membranes (for example, on tensile strength and elongation) are considered. Test samples from polymer membranes were immersed in solutions of aggressive chemicals for a period of 30 to 120 days. Changes in physical and mechanical characteristics (tensile strength, elongation, mass loss, etc.) were monitored further. According to the results of the study, for example, when exposed to 3% sodium bicarbonate solution (NaHCO₃, for 120 days), the longitudinal tensile strength of the membrane increased by 6.44%, and the relative elongation increased by 2.74%. A calculation in accordance with PNST 630-2011 to determine the potential service life of the LOGICBASE™ V-SL polymer membrane under the aggressive effects of groundwater, which was at least 100–150 years, were made in the future. A report according to the results of the research was obtained.

Keywords: concrete, reinforced concrete, secondary protection, concrete corrosion, PVC, polymer membranes, waterproofing, chemical resistance, tensile strength, elongation, durability.

For citation: Shalimov V.N., Tsybenko A.V., Goglev I.N., Loginova S.A. Study of the chemical resistance of PVC membranes for engineering waterproofing. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2023. No. 10, pp. 63–69. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-818-10-63-69>

Полимерные рулонные гидроизоляционные материалы широко применяются для защиты строительных конструкций, в том числе в зданиях и сооружениях повышенного уровня ответственности класса КС-3 (рис. 1) [1–3] согласно ГОСТ 27751–2014. С учетом данных, изложенных в п. 3.6 ГОСТ 31384–2017, п. 4.4 СП 229.1325800.2014 и п. 4.7 СП 28.13330.2017, полимерные мембраны на основе ПВХ, используемые в качестве гидроизоляции подземных строительных конструкций из бетона или железобетона, относятся к материалам, обеспечивающим их вторичную защиту [4, 5]. Данный вид материалов позволяет защитить бетонные и железобетонные конструкции и их поверхность от контакта с коррозионно-активными средами, например с подземными водами и растворенными в них солями [6–8]. Без устройства систем гидроизоляции [5] бетонные и железобетонные конструкции будут подвергаться коррозионной деградации с течением времени, например различным видам химической [9] и биологической коррозии [10]. Подземные и атмосферные воды имеют различный химический состав. Критерии оценки агрессивности почвенно-грунтовых вод приведены в нормативных документах, в частности в СП 28.13330.2017 «Защита строительных конструкций от коррозии» и ГОСТ 31384–2017 «Защита бетонных и железобетонных конструкций от коррозии. Общие технические требования». В соответствии с СП 28.13330 (Прил. А, Б, В) подземные конструкции, как правило, находятся в слабоагрессивной и среднеагрессивной среде с водородным показателем pH 6–8, что соответствует слабокислой, нейтральной и слабощелочной средам. Химический состав подземных вод характеризуется главным образом содержанием в почве макрокомпонентов, т. е. веществ, содержание которых в растворе исчисляется миллиграммами, и даже граммами на литр. К ним относятся, как правило, анионы (хлор-, сульфат-, карбонат-ионы) и катионы (натрий, калий, кальций, магний и др.). Чаще всего в почвах и подземных водах встречаются хлориды (например, NaCl), сульфаты (например, H_2SO_4 , Na_2SO_4 , $CaSO_4$), карбонаты и гидрокарбонаты (например, $NaHCO_3$). Как правило, все соли натрия хорошо растворимы в воде, поэтому его ионы чаще всего встречаются в грунтовых водах [6–8]. Почвенно-грунтовые воды могут быть также загрязнены растворами кислот (серной H_2SO_4 и сернистой H_2SO_3) при выпадении кислотных дождей в промышленных зонах городов (это связано с выбросами на производствах в основном сернистого газа SO_2) [13] или при таянии снега. Кислотные дожди образуются при реакции между водой и загрязняющими оксидами, например оксидами серы (SO_2 и SO_3) или азота (NO_2), полученными в результате жизнедеятельности человека (выхлопы автомобильного транспорта, животноводство, деятельность металлургических предприятий, тепловых электростанций, «лисий хвосты» химических производств и т. п.), а также в естественных условиях – вулканами [13]. Важно отметить, что кислот-

ные дожди могут выпадать на значительном расстоянии от места своего образования, что связано с розой ветров [6, 8, 13].

Поскольку одними из главных показателей физико-механических характеристик полимерных мембран на основе ПВХ являются прочность при одноосном растяжении в продольном/поперечном направлении и прочность при многоосном растяжении [14], внимание уделяется влиянию различных химических веществ (реагентов и солей в подземных/атмосферных водах) на изменение данных показателей. Показатель прочности при одноосном растяжении у полимерной мембраны LOGICBASE™ V-SL достигает 16/15 МПа в продольном и поперечном направлении соответственно [14]. Относительное удлинение мембраны при этом может составлять до 320–400%, т. е. полоска материала увеличивает свою длину более чем в три раза до разрыва, при осевом растяжении. Полученные показатели позволяют эксплуатировать материал в самых сложных условиях, в том числе в зонах с высокой сейсмичностью [5, 14]. Однако гидроизоляционный материал эксплуатируется при постоянном воздействии химических веществ в подземных водах, вследствие чего деформативно-прочностные свойства со временем могут измениться. Определение химической стойкости ПВХ-мембран проведено с целью получения данных о прогнозировании изменения их потенциального срока службы на реальных объектах.

Авторами представлены результаты первой части исследований химической стойкости и долговечности полимерного рулонного гидроизоляционного материала LOGICBASE™ марки V-SL, выполненных в лаборатории АО «ЦНИИПромзданий».

Материалы и методы

ПВХ-мембраны LOGICBASE™ (рис. 2) представляют собой рулонные полимерные материалы, изготовленные путем экструдирования сырьевой массы, состоящей из поливинилхлорида (ПВХ), наполнителей и технологических добавок, например стабилизаторов, пластификаторов и т. д. В первой части исследования химическая стойкость и долговечность определялись для двухслойных неармированных мембран LOGICBASE™ марки V-SL [5, 14]. Характерной особенностью данной мембраны является наличие сигнального слоя желтого цвета, который позволяет обнаружить места повреждения мембраны (на контрасте с тыльной стороной черного цвета) при выполнении гидроизоляционных работ [5, 14].

До начала проведения исследований гидроизоляционного материала подготовлены контрольные образцы-лопатки для испытания на деформативно-прочностные свойства по ГОСТ 31899-2–2011 «Материалы кровельные и гидроизоляционные гибкие полимерные (термопластичные или эластомерные). Методы определения деформативно-прочностных свойств (прочность при растяжении и относительное



Рис. 1. Примеры строительства высотных зданий (класс КС-3) в Москве с применением гидроизоляционных ПВХ-мембран LOGICBASE™ в укрепленных котлованах

Fig. 1. An example of the construction of high-rise buildings (class KS-3) in Moscow using LOGICBASE™ waterproofing PVC membranes in reinforced pits



Рис. 2. Мембрана LOGICBASE™ V-SL (а); испытание образца мембраны LOGICBASE™ V-SL на осевое растяжение (б)

Fig. 2. LOGICBASE™ V-SL membrane (a); axial tensile testing of the LOGICBASE™ V-SL membrane sample (b)

Рис. 3. Испытательная машина И 1147М-10-02-1

Fig. 3. Testing machine I 1147M-10-02-1

удлинение)» и ГОСТ 2678–94 «Материалы рулонные кровельные и гидроизоляционные. Методы испытаний» (изменение массы, гибкости и водонепроницаемости).

Выдерживание образцов в химических средах выполнено в соответствии с методикой ГОСТ Р 56910 с небольшим изменением: в отличие от «классических» требований указанного ГОСТ, по которым гидроизоляционные материалы полностью погружаются в химическую среду, при данных исследованиях испытательной жидкостью воздействовали на одну сторону покрытия, как это происходит в естественных условиях эксплуатации гидроизоляционных материалов при защите ими подземных конструкций зданий и сооружений (рис. 2). В связи с этим при проведении испытаний на воздействие агрессивных жидких сред из гидроизоляционного материала готовили образцы-корыта с таким расчетом, чтобы из его дна можно было вырезать образцы-лопатки требуемых размеров для определения физико-механических характеристик (деформативно-прочностных свойств, гибкости, толщины и водонепроницаемости); борта корыта имели высоту около 50 мм. В корыто наливали испытательные жидкости, приведенные в табл. 1, а в ходе испытаний их перемешивали

Таблица 1
Table 1

Испытательные жидкие химические среды
Test liquid chemicals

Вещество	Концентрация раствора
Гидрокарбонат натрия NaHCO_3	3%
Гидроксид натрия NaOH	1%
Гидроксид кальция Ca(OH)_2	насыщенный
Хлорид натрия NaCl	насыщенный
Сернистая кислота H_2SO_3	6%
Серная кислота H_2SO_4	0,5%

стеклянной палочкой не реже одного раза в сутки. Продолжительность проведения фазы длительных испытаний (период вымачивания образцов) принята в соответствии с п. 4.3 ГОСТ 12020 и составила 120 сут (16 недель).

После окончания вымачивания образцы извлекали из испытательных жидкостей и тщательно промывали. Затем образцы протирали сухой фильтровальной бумагой или тканью без ворса и выдерживали в течение не менее 24 ч при температуре $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$ и относительной влажности $(50 \pm 5)\%$. После высушивания образцов определяют их деформативно-прочностные свой-

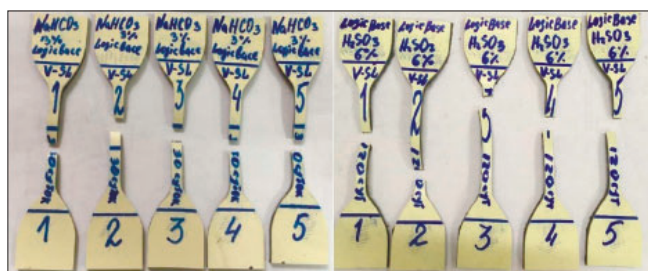


Рис. 4. Внешний вид образцов мембраны после вымачивания, высушивания и разрыва на испытательной машине И 1147М-10-02-1

Fig. 4. Appearance of membrane samples after soaking, drying and rupture on the testing machine I 1147M-10-02-1

ства (по ГОСТ 31899-2), массу, гибкость и водонепроницаемость (по ГОСТ 2678). Основным испытательным оборудованием являлась машина И 11М модификации И 1147М-10-02-1 (рис. 3).

По результатам испытаний отслеживали изменение физико-механических характеристик материала (относительного удлинения, прочности при растяжении) и показателей его массы, гибкости

и др. После этого производили оценку потенциального срока службы гидроизоляционного материала LOGICBASE™ V-SL.

Обсуждение и результаты

Результаты испытаний образцов материала LOGICBASE™ V-SL до и после воздействия на него агрессивных химических сред приведены в табл. 2 и 3, а также на рис. 5–6. В табл. 2 приведены величины снижения механических показателей рулонного полимерного гидроизоляционного материала LOGICBASE™ V-SL за 120 сут нахождения в агрессивных химических средах.

Определение потенциального срока службы гидроизоляционного материала производят по изменению механического показателя данного материала (прочности – разрывной силы) или деформативности (относительного удлинения) после воздействия на него внешних жидких химических сред, имеющего наибольшее снижение (принцип «слабого звена»). Под действием внешних эксплуатационных факто-

Таблица 2
Table 2

Изменение механических показателей материала LOGICBASE™ V-SL при воздействии водных растворов химических реагентов
Changes in the mechanical properties of the LOGICBASE™ V-SL material when exposed to aqueous solutions of chemical reagents

Показатель	Химическая среда					
	NaHCO ₃	NaCl	Ca(OH) ₂	NaOH	H ₂ SO ₃	H ₂ SO ₄
Изменение разрывной силы при растяжении в продольном направлении, %	+ 6,44	+ 6,15	+ 6,44	+ 2,19	- 1,48	+ 0,45
Изменение относительного удлинения, %	+ 2,74	- 1,27	- 2,88	- 8,55	- 0,73	- 9,36

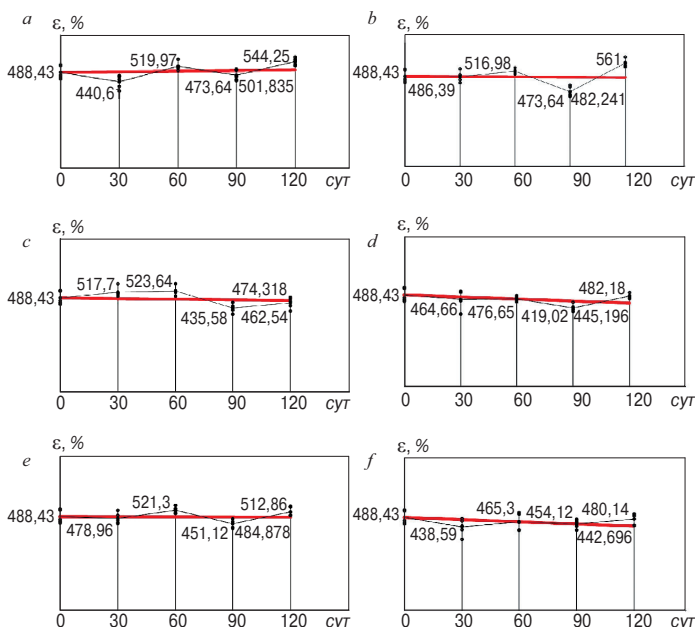


Рис. 5. Изменение показателя относительного удлинения образцов мембраны LOGICBASE™ V-SL при воздействии водных растворов химических реагентов: а – NaHCO₃; б – NaCl; в – Ca(OH)₂; д – NaOH; е – H₂SO₃; ф – H₂SO₄

Fig. 5. Change in the relative elongation of LOGICBASE™ V-SL membrane samples when exposed to aqueous solutions of chemical reagents: а – NaHCO₃; б – NaCl; в – Ca(OH)₂; д – NaOH; е – H₂SO₃; ф – H₂SO₄

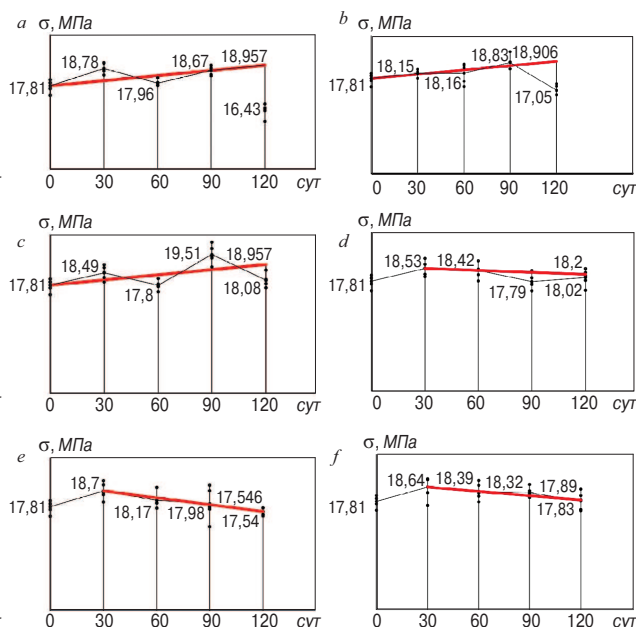


Рис. 6. Изменение показателя прочности при растяжении у образцов мембраны LOGICBASE™ V-SL при воздействии водных растворов химических реагентов: а – NaHCO₃; б – NaCl; в – Ca(OH)₂; д – NaOH; е – H₂SO₃; ф – H₂SO₄

Fig. 6. Change in the tensile strength index of LOGICBASE™ V-SL membrane samples when exposed to aqueous solutions of chemical reagents: а – NaHCO₃; б – NaCl; в – Ca(OH)₂; д – NaOH; е – H₂SO₃; ф – H₂SO₄

Таблица 3
Table 3

Средние величины коэффициентов стойкости в принятые сроки испытаний (120 сут)
Average values of resistance coefficients in the accepted test periods (120 days)

Показатель	Результаты испытаний			
	30	60	90	120
Относит. удлин. контр. образцов, %	488,430			
Относит. удл. после NaHCO ₃ , %	440,61	519,97	473,64	501,835
Относит. удл. после NaCl, %	486,39	516,98	473,64	482,241
Относит. удл. после Ca(OH) ₂ , %	517,7	523,64	435,58	474,318
Относит. удл. после NaOH, %	464,66	467,65	419,02	445,196
Относит. удл. после H ₂ SO ₃ , %	478,96	521,3	451,12	484,878
Относит. удл. после H ₂ SO ₄ , %	438,59	465,3	454,12	442,696
Коэффициент стойкости к NaHCO ₃	0,9021	1,0646	0,9697	1,0274
Коэффициент стойкости к NaCl	0,9958	1,0585	0,9697	0,9873
Коэффициент стойкости к Ca(OH) ₂	1,0599	1,0721	0,8918	0,9711
Коэффициент стойкости к NaOH	0,9513	0,9575	0,8579	0,9115
Коэффициент стойкости к H ₂ SO ₃	0,9806	1,0673	0,9236	0,9927
Коэффициент стойкости к H ₂ SO ₄	0,898	0,9526	0,9298	0,9064

ров в течение заданного срока службы допустимое снижение механических показателей должно соответствовать величине $C=0,5$ (не более 50%). В процессе исследования был выявлен высокий коэффициент устойчивости материала ко всем указанным агрессивным веществам, вследствие чего по техническому заданию срок службы материала был увеличен до 150 лет.

Для принятого периода эксплуатации надежность гидроизоляционного материала к внешним воздействиям обеспечивается при условии (1):

$$K_H \geq 1 - C, \quad (1)$$

где K_H – коэффициент стойкости, вычисленный путем потенцирования величины, полученной по формуле (2). Для прогнозирования величины коэффициента стойкости K_H в течение принятого срока эксплуатации используют зависимость (при $\tau \geq 30$ сут).

$$\lg K_H = a + b \cdot \lg \tau, \quad (2)$$

где $\lg K_H$ и $\lg \tau$ – логарифмы коэффициента стойкости и принятого срока эксплуатации; a и b – постоянные коэффициенты для данного вида гидроизоляционного материала и данной среды, рассчитываемые по формуле:

$$a = \lg \bar{K}_H - b \cdot \lg \bar{\tau}, \quad (3)$$

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n (\lg \bar{K}_H - \lg K_{H,i}) \cdot (\lg \bar{\tau} - \lg \tau_i)}{(\lg \bar{\tau} - \lg \bar{\tau}_i)^2}, \quad (4)$$

где $\lg \bar{K}_H = \frac{\sum_{i=1}^n \lg K_{H,i}}{n}$ – средние значения логарифма коэффициента стойкости гидроизоляционного материала к внешним факторам воздействия за время испытаний; $\lg \bar{\tau} = \frac{\sum_{i=1}^n \lg \tau_i}{n}$ – средние значения логарифма времени испытаний; $\lg K_{H,i}$ и $\lg \tau_i$ – соответственно логарифмы коэффициентов стойкости и времени испытаний в i -й серии испытаний (промежуточных сроков испытаний); n – число серий испытаний.

Срок службы гидроизоляционных мембран, принятый с учетом требований по минимальной продолжительности эксплуатации подземных конструкций зданий и сооружений (бетонных и железобетонных фундаментов) до капитального ремон-

та, равен **60 лет** (согласно ВСН 58-88р), **не менее 100 лет** (по СП 120.13330. – для материалов и конструкций тоннельных обделок и по ГОСТ 27751 – для уникальных зданий и сооружений), а также **150 лет** (в соответствии с техническим заданием).

Коэффициенты a и b уравнения (2) рассчитываются по показателю относительного удлинения в момент разрыва после воздействия на образец мембраны LOGICBASE™ V-SL H₂SO₄ (т. е. максимальный показатель снижения из табл. 2) путем подставления данных из табл. 3 в формулы (3) и (4). В табл. 4 приведены все промежуточные значения величин для подсчета коэффициентов.

Получаем коэффициент $b=0,0093$, коэффициент $a=-0,00355-0,0093 \cdot 1,8221=-0,0524$.

Таблица 4
Table 4

Промежуточные значения для подсчета коэффициентов
Intermediate values for calculation of coefficients

Номер серии	$\lg \tau_i$	$\lg K_{H,i}$	$\lg \bar{K}_H - \lg K_{H,i}$	$\lg \bar{\tau} - \lg \tau_i$	$\sum_{i=1}^n (\lg \bar{K}_H - \lg K_{H,i}) \cdot (\lg \bar{\tau} - \lg \tau_i)$	$(\lg \bar{\tau} - \lg \tau_i)^2$
1	1,4771	-0,0467	0,0112	0,345	0,0039	0,119
2	1,7781	-0,0211	-0,0144	0,044	-0,0006	0,0019
3	1,9542	-0,0316	-0,0039	-0,1321	0,0005	0,0175
4	2,0791	-0,0427	0,0072	-0,257	-0,0019	0,066
Суммы	7,2885	-0,1421			0,0019	0,2044
Среднее значение	$\lg \bar{\tau} = 1,8221$	$\lg \bar{K}_H = -0,0355$				

Потенциальный срок службы (согласно СП 120) гидроизоляционного материала LOGICBASE™ V-SL в первом приближении принимаем $\tau=100$ лет (36500 сут), при этом допустимое снижение прочности за этот срок должно быть не более $C=0,5$. Подставляя потенциальный срок службы в формулу (2), определяем коэффициент стойкости материала, который не должен превышать нормируемое значение по формуле (1):

$$\lg K_H = a + b \cdot \lg \tau = -0,0524 + 0,0093 \cdot \lg 36500 = -0,01,$$

тогда коэффициент стойкости равен $K_H=0,9772$. Подставляем полученные результаты в формулу (1) и получаем:

$$0,9772 \geq 1 - 0,5 = 0,5.$$

Коэффициент стойкости гидроизоляционного материала LOGICBASE™ V-SL в принятых агрессивных средах эксплуатации значительно превышает допустимое значение (0,5), следовательно, потенциальный срок службы гидроизоляционного материала LOGICBASE V-SL составит **не менее 100 лет**.

Поскольку полученный результат показывает, что у материала LOGICBASE™ V-SL высокий запас долговечности, по техническому заданию было принято решение об увеличении срока службы материала до 150 лет.

Потенциальный срок службы гидроизоляционного материала LOGICBASE™ V-SL во втором приближении принимаем $\tau=150$ лет (54750 сут), при этом допустимое снижение прочности за этот срок должно быть не более $C=0,2$.

$$\lg K_H = a + b \cdot \lg \tau = -0,0524 + 0,0093 \cdot \lg 54750 = -0,0083,$$

Список литературы

1. Ведяков И.И., Еремеев П.Г., Соловьев Д.В. Научно-техническое сопровождение и нормативные требования при реализации проектов зданий и сооружений повышенного уровня ответственности // *Промышленное и гражданское строительство*. 2018. № 12. С. 14–19.
2. Белостоцкий А.М., Крючков С.А., Рытов С.А., Рытова Т.Г., Чаускин А.Ю. Особенности научно-технического сопровождения изысканий и проектирования для зданий повышенного уровня ответственности на примере жилого дома в г. Самаре // *Вестник НИЦ «Строительство»*. 2021. № 2 (29). С. 28–37. DOI: 10.37538/2224-9494-2021-2(29)-28-37
3. Кловский А.В., Мареева О.В. Особенности проектирования объектов повышенного уровня ответственности при пограничных значениях сейсмичности площадки строительства // *Природообустройство*. 2018. № 3. С. 63–69.
4. Степанова В.Ф., Соколова С.Е., Полушкин А.Л. Эффективные способы вторичной защиты для повышения долговечности зданий и сооружений

тогда коэффициент стойкости равен $K_H=0,9809$. Подставляем полученные результаты в формулу (1) и получаем:

$$0,9809 \geq 1 - 0,2 = 0,8.$$

Коэффициент стойкости гидроизоляционного материала LOGICBASE™ V-SL в принятых агрессивных средах эксплуатации превышает допустимое значение (0,2), следовательно, потенциальный срок службы гидроизоляционного материала LOGICBASE™ V-SL (согласно проведенному расчету) составит **не менее 150 лет**.

Выводы

Выполненная первая часть исследования наглядно демонстрирует высокую химическую стойкость полимерных мембран LOGICBASE™ одновременно с сохранением их высокой прочности при разрыве, поскольку максимальное снижение показателей прочности при растяжении и относительного удлинения составило не более 1,48% и не более 9,4% соответственно. Потенциальный срок службы рулонного гидроизоляционного материала LOGICBASE™ V-SL определен (оценен) расчетами и составляет не менее 150 лет, что значительно выше, чем у традиционных гидроизоляционных материалов. Подобные показатели позволяют применять данный материал для гидроизоляции подземных частей зданий и сооружений, в том числе зданий и сооружений повышенного уровня ответственности (класс КС-3 по ГОСТ 27751–2014), например при строительстве высотных объектов, объектов атомной энергетики или при строительстве тоннелей [15].

References

1. Vedyakov I.I., Eremeev P.G., Solovyev D.V. Scientific and technical support and standard requirements when realizing projects of buildings and structures with increased level of responsibility. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2018. No. 12, pp. 14–19. (In Russian).
2. Belostotsky A.M., Kryuchkov S.A., Rytov S.A., Rytova T.G., Chauskin A.Yu. Specific features of scientific and technical support of engineering survey and design for buildings of a high level of responsibility in the city of Samara. *Vestnik NIC "Stroitel'stvo"*. 2017. No.2(29),pp.28–37. (In Russian). DOI: 10.37538/2224-9494-2021-2(29)-28-37
3. Klovsky A.V., Mareeva O.V. Features of objects designing of the increased level of responsibility under boundary values of seismicity of the construction site. *Prirodoobustrojstvo*. 2018. No. 3, pp. 63–69. (In Russian).
4. Stepanova V.F., Sokolova S.E., Polushkin A.L. Effective means of secondary protection to improve the durability of buildings and structures. *Vestnik*

- // Вестник НИЦ «Строительство». 2017. № 1 (12). С. 126–133.
5. Шалимов В.Н., Цыбенко А.В., Гоглев И.Н. Исследование расхода инъекционных составов в ремонтпригодных системах гидроизоляции фундаментов // *Умные композиты в строительстве*. 2022. № 2 (3). С. 29–44. DOI: https://doi.org/10.52957/27821919_2022_2_29
 6. Каримов Т.Х., Канаев М.Д., Орозахунова С.К., Бекболот К.А. Очистка подземных вод от солей. *International Scientific and Practical Conference World science*. 2018. № 6 (34). С. 17–20. DOI: 10.31435/rsglobal_ws/12062018/5814
 7. Ушакова И.Г., Горелкина Г.А., Корчевская Ю.В. Анализ источников водоснабжения населенных пунктов Омской области, расположенных вдоль р. Оми // *Вестник Омского государственного аграрного университета*. 2017. № 4 (28). С. 258–262.
 8. Черноусенко Г.И., Панкова Е.И., Калинина Н.В., Убугунова В.И., Рухович Д.И., Убугунов В.Л., Цыремпилов Э.Г. Засоленные почвы Баргузинской котловины // *Почвоведение*. 2017. № 6. С. 652–671. DOI: 10.7868/Б0032180ХГ706003Х
 9. Румянцева В.Е., Гоглев И.Н., Логинова С.А. Применение полевых и лабораторных методов определения карбонизации, хлоридной и сульфатной коррозии при обследовании строительных конструкций зданий и сооружений // *Строительство и техногенная безопасность*. 2019. № 15 (67). С. 51–58.
 10. Логинова С.А., Гоглев И.Н. К вопросу о повышении биостойкости бетонных и железобетонных мостовых опор // *Вестник НИЦ «Строительство»*. 2022. № 1 (32). С. 115–127. DOI: 10.37538/2224-9494-2022-1(32)-115-127
 11. Степанова В.Ф., Розенталь Н.К., Чехний Г.В. Разработка пособия к своду правил 28.13330.2017 «СНИП 2.03.11–85 Защита строительных конструкций от коррозии» // *Вестник НИЦ «Строительство»*. 2018. № 4 (19). С. 93–103.
 12. Степанова В.Ф., Розенталь Н.К., Чехний Г.В. Изменение № 1 к СП 72.13330.2016 «СНИП 3.04.03–85 Защита строительных конструкций и сооружений от коррозии» // *БСТ*. 2019. № 7 (1019). С. 12–13.
 13. Бегалиева Д.У., Плошанская О.С. Кислотные дожди // *Вестник Казахской академии транспорта и коммуникаций им. М. Тынышпаева*. 2008. № 3 (52). С. 216–219.
 14. Цыбенко А.В., Шалимов В.Н., Гоглев И.Н., Логинова С.А. Работа полимерного рулонного гидроизоляционного материала LOGICBASE™ на многоосное растяжение // *Промышленное и гражданское строительство*. 2023. № 3. С. 74–79.
 15. Чубинишвили А.Т. Применение специализированных гидроизоляционных мембран в подземном строительстве // *Метро и тоннели*. 2015. № 6. С. 31–33.
 - NIC “Stroitel’stvo”*. 2017. No. 1 (12), pp. 126–133. (In Russian).
 5. Shalimov, V.N., Cybenko, A.V. & Goglev, I.N. Investigation of the consumption of injection formulations in maintainable waterproofing systems of foundations. *Umnnye kompozity v stroitel’stve*. 2022. No. 3 (2), pp. 29–44. (In Russian). DOI: https://doi.org/10.52957/27821919_2022_2_29
 6. Karimov T.H., Kanaev M.D., Orozahunova S.K., Bekbolot K.A. Purification of groundwater from salts. *International Scientific and Practical Conference World science*. 2018. No. 6 (34), pp. 17–20. (In Russian). DOI: 10.31435/rsglobal_ws/12062018/5814
 7. Ushakova I.G., Gorelkina G.A., Korchevskaya Ju.V. The analysis of water supply sources of Omsk Region settlements along the Om river. *Vestnik Omskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2017. No. 4 (28), pp. 258–262. (In Russian).
 8. Chernousenko G.I., Pankova E.I., Kalinina N.V., Rukhovich D.I., Ubugunova V.I., Ubugunov V.L., Tsyrempilov E.G. Salt-affected soils of the Barguzin depression. *Eurasian Soil Science*. 2017. No. 6 (50), pp. 646–663. (In Russian). DOI: 10.7868/Б0032180ХГ706003Х
 9. Rumyantseva V.E., Goglev I.N., Loginova S.A. Application of field and laboratory methods for the determination of carbonation, chloride and sulfate corrosion in the examination of building structures of buildings and structures. *Stroitel’stvo i texnogennaya bezopasnost’*. 2019. No. 15, pp. 51–58. (In Russian).
 10. Loginova S.A., Goglev I.N. Improving the biostability of concrete and reinforced concrete bridge supports. *Vestnik NIC “Stroitel’stvo”*. 2022. No. 1 (32), pp. 115–127. (In Russian). DOI: 10.37538/2224-9494-2022-1(32)-115-127
 11. Stepanova V.F., Rosental N.K., Chehniy G.V. Development of the manual to the code of Rules 28.13330.2017 “Protection of building structures from corrosion”. *Vestnik NIC “Stroitel’stvo”*. 2018. No. 4 (19), pp. 93–103. (In Russian).
 12. Stepanova V.F., Rosental N.K., Chehniy G.V. Change No. 1 to SP 72.13330.2016 “SNIP 3.04.03–85 Protection of building structures and structures from corrosion”. *BST*. 2019. No. 7 (1019), pp. 12–13. (In Russian).
 13. Begaliev D.U., Ploshanskaya O.S. Acid rains. *Vestnik of the Kazakh Academy of Transport and Communications named after. M. Tynyspayeva*. 2008. No. 3 (52), pp. 216–219. (In Russian).
 14. Cybenko A.V., Shalimov V.N., Goglev I.N., Loginova S.A. Operation of Logicbase™ polymer roll waterproofing material for multiaxial stretching. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel’stvo*. 2023. No. 3, pp. 74–79. (In Russian).
 15. Chubinishvili A.T. Application of special polymeric waterproofing membrane for underground works. *Metro i tonneli*. 2015. No. 6, pp. 31–33. (In Russian).

АПКСМ 15 лет



Ассоциации производителей керамических стеновых материалов исполнилось 15 лет. Торжества, посвященные этому событию, прошли в Казани. В них приняли участие представители кирпичных заводов, члены Ассоциации, а также приглашенные гости — компании — продавцы керамического кирпича. Торжественное собрание АПКСМ состоялось на базе кирпичного завода «Винербергер Куркачи», что символично, так как завод в Татарстане — ровесник ассоциации, он также был запущен в 2008 г.

На торжественном собрании бессменный директор АПКСМ В.Н. Герашченко рассказал об истории создания и становлении отраслевого объединения кирпичников.

Здесь уместно напомнить, что к 2008 г. в строительной отрасли накопились серьезные проблемы и противоречия, связанные в том числе с ужесточением теплотехнических норм при строительстве жилья. Это привело к тому, что традиционные, проверенные временем кирпичные стены перестали соответствовать новым требованиям по теплосопротивлению. Им на смену пришли многослойные конструкции, в составе которых применяли эффективный минераловатный утеплитель, полимерные пароизоляционные мембраны, металлические системы подконструкции, различные связи и элементы крепления. Большая часть компонентов для новых стен в России не производилась (что, собственно, и требовалось зарубежным компаниям, начавшим экспансию на российский рынок) или производилась иностранными компаниями, открывшими производства в России (минераловатный утеплитель). Кроме того, у отечественных проектировщиков не было опыта расчета новых стеновых конструкций, а у строителей — навыка качественного возведения сложных в исполнении стен. Естественно, через некоторое время многослойные конструкции с облицовкой из керамического кирпича стали разрушаться, на домах появлялись трещины, кирпич выкрашивался, были вопиющие случаи обрушения больших фрагментов стен с катастрофическими последствиями.

При анализе причин разрушения многослойных стен с облицовкой из керамического кирпича именно керамический кирпич «назначали» главным виновником. Уже не отдельным предприятиям, а всей отрасли стало необходимо защищаться от неправомерных нападков на материал, проверенный временем, а также в борьбе за долю рынка стеновых материалов.

15 декабря 2008 г. в Москве прошло собрание инициативной группы руководителей кирпичных заводов, на котором было принято решение о создании Ассоциации производителей керамических стеновых материалов (АПКСМ) в формате некоммерческого партнерства («Строительные материалы» № 4-2009).

Президентом нового объединения российских кирпичников единодушно был избран канд. техн. наук **Владимир Алексеевич Терехов** — крупный организатор промышленности с большим опытом государственной службы (он возглавлял Научно-техническое управление Министерства промышленности строительных материалов РСФСР, руководил строительством многих кирпичных заводов в разных регионах России). Исполнительным директором Ассоциации был назначен Владислав Николаевич Герашченко, которому поручили провести необходимую процедуру государственной регистрации нового отраслевого объединения.

Перед Ассоциацией ставился широкий круг задач, но первой и главной стала борьба за честное имя керамического кирпича в условиях нецивилизованного дав-





ления на отрасль и конкуренции со стороны производителей других штучных стеновых материалов.

Сразу после создания Ассоциации ее представители вошли в состав Технического комитета по стандартизации ТК 465 «Строительство», а после создания в 2016 г. – и в ТК 144. На этих площадках ведется работа по актуализации нормативно-технической базы строительства и промышленности строительных материалов.

23 мая 2008 г. было выпущено распоряжение Минмосoblстроа № 18 «О применении трехслойных стеновых ограждающих конструкций с внутренним слоем из плитного эффективного утеплителя и лицевым слоем из кирпичной кладки при строительстве гражданских зданий на территории Московской области», а 6 апреля 2009 г. – распоряжение Правительства Москвы № 587-РП «О запрете применения на объектах государственного заказа города Москвы многослойного кирпича в качестве облицовки слоистых стеновых ограждающих конструкций зданий». Кроме того, что данные распоряжения касались самого крупного стройкомплекса страны, они давали прецедент, который начали тиражировать в регионах.

Ассоциация и привлеченные ею специалисты в области строительной физики, материаловедения, проектирования провели большую работу по нескольким направлениям. Были проведены научные исследования, результаты которых опубликованы в авторитетных научных СМИ, в том числе в журнале «Строительные материалы». На основании научных данных подготовлены аргументированные письма о неправомерности запрета облицовочного кирпича для многослойных стен.

В результате было принято более взвешенное решение – создать ряд нормативных документов по ограждающим конструкциям и альбом технических решений для кладки ограждающих конструкций с применением лицевого кирпича.

Большая работа проделана АПКСМ при обсуждении и принятии изменений СНиП 23-02–2003 «Тепловая защита зданий», а также при создании нового СП 50.13330.2012 «Тепловая защита зданий».

Вызовом для отрасли стало включение карьеров по добыче глины в Реестр опасных производственных объектов. Ассоциации совместными усилиями с другими отраслевыми объединениями удалось доказать, что глины являются общераспространенными полезными ископаемыми.

АПКСМ представлена в рабочих группах и научно-технических советах Минстроя, Минпромторга, Минэкономразвития, Совета Федерации и Государственной Думы РФ.

В 2017 г. была открыта Школа каменщиков, созданная АПКСМ на базе НИИ строительной физики РААСН при поддержке Минстроя РФ. Основная задача школы – восстановление традиций советской школы повышения квалификации рабочих кадров. Обучение проходит по двум программам: 40 ч обучения – подготовка каменщиков не ниже 2-го разряда; 72 ч – подготовка каменщиков 3-го разряда. Занятия включают теоретический и практический курсы.

Важно, что учащиеся не только осваивают профессию каменщика и повышают квалификацию, но и знакомятся с новыми керамическими материалами, в частности с пустотно-поризованными крупноформатными керамическими блоками, лицевым кирпичом, осваивают новые методы кладки.

АПКСМ – активный участник экспозиций и деловых программ отраслевых выставок в различных регионах страны, организатор поездок руководителей и специалистов заводов на предприятия зарубежных стран.

В период пандемии COVID-19 Ассоциация успешно помогала предприятиям оформлять на работу иностранных специалистов.

Постоянной работой Ассоциации является помощь в решении транспортных проблем предприятий в разных регионах.

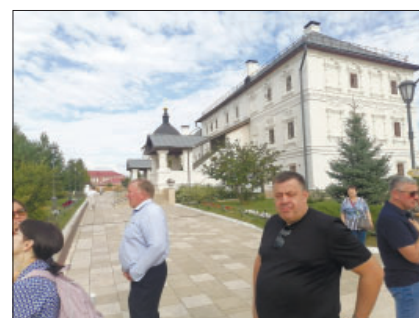
Поскольку кирпичные заводы попали в I категорию производств НВОС, то в ближайший год предприятиям предстоит получить КЭР. АПКСМ включилась в эту работу.

После торжественного собрания состоялась производственная экскурсия по заводу. Для коллег это большая удача, так как до недавнего времени российские заводы «Винербергер» были закрыты для посещения.

Проектная мощность завода «Винербергер Куркачи» – 150 млн шт. усл. кирпича в год. Здесь выпускается широкий ассортимент поризованных блоков различного формата торговой марки Porotherm (РТН12, РТН25, РТН38, РТН44, РТН51, доборные блоки к РТН 38, 44, 51).

После официальной части празднования состоялись экскурсии по Казани и на остров-град Свияжск.

За 15 лет для подотрасли стеновых керамических материалов сделано немало. А впереди работы еще больше. АПКСМ всегда с отраслью!





Анатолию Петровичу ПИЧУГИНУ, 80 лет

д-ру техн. наук, профессору, заслуженному работнику высшей школы РФ, почетному работнику высшего профессионального образования РФ, почетному работнику агропромышленного комплекса РФ,

Судьба Анатолия Петровича Пичугина — яркая иллюстрация возможностей советской системы, позволявшей раскрыться талантам любого человека при трудолюбии и упорстве.

Он родился 22 октября 1943 г. в г. Уссурийске Приморского края в семье служащих и получил всестороннее образование: окончил музыкальную школу и изостудию; занимался в кружках технического творчества и спортивных секциях; участвовал в художественной самодеятельности. Затем техникум, а после инженерно-строительный факультет Дальневосточного политехнического института им. В.В. Куйбышева, который успешно окончил в 1968 г.

Опыт практической работы Анатолий Петрович получил в тресте «Жилстрой-1» Главладивостокстроя, но сколько научная деятельность влекла его со студенчества, то вскоре он связал жизнь с преподаванием и научной работой, сначала в родном ДВПИ, затем в Приморском сельхозинституте, а после переезда в 1978 г. в Новосибирск — в Новосибирском сельскохозяйственном институте, где трудится по сей день.

В 1969 г. А.П. Пичугин поступил в аспирантуру на кафедру полимерных материалов Московского инженерно-строительного института им. В.В. Куйбышева к известному ученому-материаловеду, заслуженному деятелю науки и техники РСФСР профессору В.А. Воробьеву. Направление диссертационных исследований было продиктовано жизнью — низкая коррозионная стойкость используемых материалов для полов и ограждающих конструкций животноводческих помещений. И через три года Анатолий Петрович успешно защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук «Полимербетонные покрытия для полов сельскохозяйственных и производственных помещений».

Именно аспирантские годы, общение с известными учеными, атмосфера тогдашнего МИСИ раскрыли в молодом ученом потребность в постоянном научном поиске, обсуждениях и творческих встречах с коллегами.

С 1978 г. А.П. Пичугин возглавил кафедру строительного дела Новосибирского сельскохозяйственного института. Под его руководством была развернута большая работа по организации студенческих строительных отрядов, обучению бойцов ССО строительным профессиям. В 1979 г. у него вышла монография «Ремонт неметаллических элементов бытовых приборов» (М.: Легкая индустрия), ставшая учебным пособием для студентов и аспирантов многих вузов страны.

В 1984–1986 гг. А.П. Пичугин работал проректором НСХИ по строительству.

Пятнадцать лет он был деканом нового для сельскохозяйственного университета факультета государственного и муниципального управления. Под руководством Анатолия Петровича сформирован квалифицированный преподавательский состав, сформирована профильная библиотека научных и учебных материалов. На факультете организован студенческий клуб, драмкружок, рок-группа и др.

А.П. Пичугиным организована научно-исследовательская лаборатория строительных материалов, преобразованная впоследствии в лабораторию нанотехнологий и наноматериалов.

На протяжении сорока пяти лет работы в НГАСУ Анатолий Петрович постоянно занимается научно-исследовательской работой. Им были разработаны научные основы и критерии оценки материалов по их диффузионным характеристикам и проницаемости. Это позволило создать ряд эффективных материалов на основе местного сырья и отходов производства, модифицированных полимерами, а также найти проектные и конструктивные решения для полов сельскохозяйственных производственных зданий, что способствовало увеличению сроков службы с полутора до пятнадцати—двадцати лет. Данные рекомендации внедрены в более 120 организациях России и стран СНГ.

Под научным руководством А.П. Пичугина подготовлено 24 кандидата и три доктора технических наук. В настоящее время он руководит научной работой пяти аспирантов и соискателей, а также трех докторантов.

А.П. Пичугин — автор более тысячи научных трудов, в том числе сорока трех книг и учебных пособий. Кроме того, он автор пятидесяти авторских свидетельств и патентов на изобретение.

На протяжении всей своей научной деятельности А.П. Пичугин уделяет самое пристальное внимание творческому росту научно-педагогических кадров, обсуждению результатов их работы и поисков. С 1979 г. он организует всероссийские, всесоюзные и международные научно-технические конференции по проблемам эффективного использования строительных материалов и местного сырья, долговечности зданий и сооружений сельскохозяйственного назначения, по рациональному использованию полимеров для обеспечения надежности и коррозионной стойкости строительных конструкций, внедрению нанодобавок в строительные композиты. Многие доктора и кандидаты наук получили путевку в научную жизнь, нашли дружескую и творческую поддержку именно на этих мероприятиях. В 2023 г. был проведен 45-й научный форум!

Родные, друзья и коллеги также знают Анатолия Петровича как писателя и поэта. Под литературным псевдонимом А.П. Анатольев он издал роман, семь сборников повестей и рассказов, более тридцати сборников стихов, десятки од и поэм.

Анатолий Петрович отличается простотой и доброжелательностью, готов всегда прийти на помощь людям, для всех у него находится доброе слово, толковый совет и, как правило в тему, анекдот. Он пользуется большим уважением коллег и друзей, обожает своей семьей (у него трое детей, 11 внуков и правнук).

А.П. Пичугин является членом Союза писателей, членом Союза журналистов России. Он имеет различные награды РАЕН, Международного благотворительного фонда «Меценаты столетия», мэрии Новосибирска.

Редакция журнала «Строительные материалы»®, коллеги, ученики сердечно поздравляют Анатолия Петровича, желают доброго здоровья, благополучия и благодарят за многие годы тесного сотрудничества.

УДК 691.57:539.2

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-818-10-73-77>

А.В. ПЧЕЛЬНИКОВ, канд. техн. наук, доцент, докторант (pchelaleksandr@mail.ru),

А.П. ПИЧУГИН, д-р техн. наук, профессор (gmunsau@mail.ru)

Новосибирский государственный аграрный университет (630039, г. Новосибирск, ул. Добролюбова, 160)

Обеспечение механической прочности защитных лакокрасочных покрытий стальных металлоконструкций

Рассмотрены вопросы обеспечения механической прочности защитных лакокрасочных покрытий стальных металлоконструкций за счет применения наноразмерных добавок. Представлены результаты исследования физико-механических свойств наномодифицированных лакокрасочных покрытий (адгезии, прочности к истиранию, твердости, деформационной устойчивости) и результаты исследования линейных размеров элементов структуры микро- и нанорельефа поверхности покрытий. Определено, что при введении в лакокрасочный материал состава с углеродными нанотрубками и оксида висмута в количестве 0,1 и 1% соответственно возможно добиться высоких показателей механической прочности покрытий, которые способны надежно защитить стальные металлоконструкции в условиях эксплуатационных сред и воздействий. При этом в 2–3 раза повышается адгезионная прочность, в 1,5–2,5 раза прочность к истиранию, существенно уменьшается количество и величина микротрещин на покрытии; кроме того поверхность покрытия становится более гладкой, покрытие упрочняется (средняя шероховатость Ra уменьшается с 60–70 до 20–30 нм).

Ключевые слова: лакокрасочное покрытие, наноразмерные добавки, углеродные нанотрубки, оксид висмута, диоксид кремния, адгезионная прочность, металлоконструкции, защитные покрытия.

Для цитирования: Пчельников А.В., Пичугин А.П. Обеспечение механической прочности защитных лакокрасочных покрытий стальных металлоконструкций // *Строительные материалы*. 2023. № 10. С. 73–77. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-818-10-73-77>

A.V. PCHELNIKOV, Candidate of Sciences (Engineering), associate professor, doctoral student (pchelaleksandr@mail.ru),

A.P. PICHUGIN, Doctor of Sciences (Engineering), Professor (gmunsau@mail.ru)

Novosibirsk State Agrarian University (160, Dobrolyubova Street, Novosibirsk, 630039, Russian Federation)

Ensuring Mechanical Strength of Protective Paint Coatings of Steel Metal Structures

This article discusses the issues of ensuring the mechanical strength of protective paint coatings of steel structures through the use of nano-sized additives. The results of a study of the physical and mechanical properties of nanomodified paint coatings (adhesion, abrasion resistance, hardness, deformation stability) and the results of a study of the linear dimensions of the elements of structures of the micro- and nanorelief of the surface of the coatings are presented. It has been determined that with the introduction of a composition with carbon nanotubes and bismuth oxide, in the amount of 0.1% and 1%, respectively, into the paintwork material, it is possible to achieve high mechanical strength of coatings that can reliably protect steel structures under operating environments and impacts. At the same time, the adhesion strength increases by 2–3 times, the abrasion resistance by 1.5–2.5 times, the number and size of microcracks on the coating are significantly reduced, and the surface of the coating becomes smoother, the coating is strengthened (the average roughness Ra decreases from 60–70 nm to 20–30 nm).

Keywords: paint coating, nanoscale additives, carbon nanotubes, bismuth oxide, silicon dioxide, adhesive strength, abrasion resistance, adhesive strength, metal structures, protective coatings.

For citation: Pchelnikov A.V., Pichugin A.P., Ensuring mechanical strength of protective paint coatings of steel metal structures. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2023. No. 10, pp. 73–77. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-818-10-73-77>

В настоящее время в строительстве наблюдается тенденция применения все большего количества металлоконструкций, которые используются в качестве каркасов зданий, при возведении высотных сооружений, при установке листовых сплошностенчатых, обслуживающих, металлургических конструкций [1]. По данным анализа рынка строительных металлоконструкций, его стоимость в России сегодня оценивается более чем в 24 млрд р. (около 700 млн евро) и растет на 15–20% в год. Применение металлических конструкций при строительстве позволяет значительно снизить временные и материальные затраты, а наибольшая доля применяемых металлоконструкций (до 97,6%) относится к стальным [1, 2].

За последние пять лет, несмотря на влияние пандемии, производство строительных металлоконструкций в РФ выросло с 4,8 до 5,5 млн т. Так, по итогам первого квартала 2023 г. производство металлоконструкций строительного назначения в России выросло по сравнению с 2022 г. на 5%. Наиболее

существенный рост спроса на металлоконструкции наблюдается в строительстве объектов, логистических центров, объектов социального назначения и агропромышленного комплекса. По прогнозам «BusinessStat» (https://businessstat.ru/images/demo/construction_metal_structures_russia_demo_businessstat.pdf?ysclid=lkt4vwfir9702445222), к 2025 г. это производство увеличится до 6,1–6,3 млн т.

В среднесрочной перспективе дополнительный спрос на строительные металлоконструкции будет связан с возведением многоэтажных жилых домов с использованием металлического каркаса, что также обусловлено высокими темпами строительства (тонна металлокаркаса заменяет 12–15 т бетона, а скорость возведения здания на металлокаркасе на 20–30% выше, чем в монолитном исполнении [1, 2]). Таким образом, по прогнозам «BusinessStat», в ближайшем будущем объем жилого строительства на стальном каркасе достигнет 1 млн м². Еще одно перспективное направление – социальная инфраструктура развива-

ющихся городов. В настоящее время активно возводятся спортивные, логистические, оздоровительные и учебные объекты.

Как было отмечено, наибольшая доля применяемых металлоконструкций относится к стальным (до 97,6%); в связи с этим вопросы их применения, требуют более тщательного внимания.

Большинство из применяемых металлических конструкций имеют ряд недостатков, ограничивающих их использование [1]. Ввиду этого, при эксплуатации объектов особое внимание необходимо уделять вопросам устранения этих недостатков. Один из основных — низкая коррозионная устойчивость. Незащищенные должным образом поверхности металла при эксплуатации разрушаются, причем в неблагоприятных условиях срок их службы может сокращаться с 15–20 до 2–3 лет. Самыми агрессивными условиями эксплуатации металлоконструкций и их защитных покрытий является их использование под воздействием механических нагрузок (истирающие, ударные, деформационные воздействия), это емкости, резервуары с сыпучими материалами, конвейеры, конструкции, работающие в напряженно-деформированном состоянии и др. [1, 2].

Распространенный технологически простой и экономичный путь решения недостатков металлических конструкций — создание на их поверхностях защитных лакокрасочных покрытий, которые отвечают требованиям для заданных условий эксплуатации. Для этого применяют либо специальные лакокрасочные материалы, либо вводят в традиционные материалы модифицирующие добавки направленного действия, которые обеспечивают будущее покрытие необходимыми качествами [3–6].

Эффективным способом повышения эксплуатационных характеристик строительных материалов, в том числе защитных покрытий, является их наномодификация [7–13]. Введение определенных наноразмерных добавок в материал в малом количестве (как правило, до 1%) позволяет комплексно улучшить свойства покрытий и обеспечить по сравнению с традиционными специальными лакокрасочными материалами покрытия с широким спектром свойств для агрессивных, специфических условий эксплуатации. Для снижения себестоимости покрытия к перспективным направлениям относится введение нанодобавок в материал на этапе их приготовления, перед непосредственным применением (работа с готовым лакокрасочным материалом) [6, 14].

Исходя из изложенного целью исследования являлось обеспечение механической прочности защитных лакокрасочных покрытий стальных металлоконструкций путем их наномодифицирования.

Материалы и методы

Испытания проводились на акриловой эмали, широко распространенной для окрашивания металлоконструкций. Для модификации лакокрасочных материалов применялся состав с углеродными нано-

трубками (УНТ) Matrix-204 и наночастицы оксида висмута и диоксида кремния отечественных производителей, выбор которых обоснован в других исследованиях авторов [3, 5, 6].

Исследования физико-механических свойств осуществлялись в соответствии со стандартными методиками: ГОСТ 32299–2013; ГОСТ Р 24621–2015; ГОСТ 6806–73; ГОСТ 31993–2013.

Исследование линейных размеров элементов структуры микро- и нанорельефа поверхности наномодифицированных покрытий проведено с использованием атомно-силового микроскопа (АСМ) на базе платформы зондовой нанолaborатории ИНТЕГРА Аура компании НТ-МДТ. Для получения изображений использовали полуконтактный (прерывисто-контактный) метод, для повышения добротности колебаний кантилевера и соответственно увеличения чувствительности, надежности и достоверности в измерениях слабых сил между зондом и образцом исследование проводилось в условиях низкого вакуума. Разрешение по вертикали 0,05 нм, латеральное разрешение ~10 нм. По АСМ данным, среднеквадратичная шероховатость такой поверхности не превышала 0,4 нм.

Результаты исследования и их обсуждение

По результатам испытаний (табл. 1) установлено, что покрытие, полученное на основе акриловой эмали без добавления модификаторов, обладает адгезией в среднем 2,2 МПа, при этом характер отрыва испытательного упора от основания 100% адгезионный (рис. 1). Толщина и твердость покрытия составляет 50–52 мкм и 63–65 ед. соответственно.

Добавление наночастиц диоксида кремния приводит к повышению адгезионной прочности покрытия до 2,7–3,2 МПа уже при концентрации в составе лакокрасочного материала 1%. При этом характер отрыва адгезионно-когезионный (А60–К40), что говорит об истинном значении адгезии [15], превышающем значение 3,1 МПа.

При модификации лакокрасочных покрытий оксидом висмута наблюдается более значительное изменение адгезионной прочности. Уже при введении 0,25% модификатора адгезионная прочность возрастает до 2,8–3 МПа при характере отрыва адгезионно-когезионном (А90–К10). При достижении 1% концентрации в составе лакокрасочного материала адгезия возрастает до 3,5 МПа при характере отрыва преимущественно когезионном (А10–К90), что говорит об истинном значении адгезии, существенно превышающем 3,5 МПа [15]. Добавление более 1% оксида висмута существенных изменений адгезионной прочности не вызывает. Вместе с тем при добавлении оксида висмута наблюдается также повышение твердости получаемого покрытия с 63–65 до 81–88 ед., что говорит о возможном повышении механической прочности.

При введении в лакокрасочный материал состава с УНТ изменение адгезионной прочности наблюдается

Таблица 1
Table 1

Результаты испытаний
наномодифицированных покрытий
Test results of nanomodified coatings

Содержание в ЛКМ, %	Средняя толщина, мкм	Твердость по Шору	Истираемость, г	Адгезионная прочность, МПа	Характер отрыва (адгезионный / когезионный (А-К)), %
Без добавок					
0	50–52	63–65	0,036–0,038	2,2–2,4	А-К 100–0
Оксид висмута					
0,25	50–53	63–66	0,034–0,037	2,8–3	А-К 90–10
0,5	52–54	62–67	0,030–0,033	3–3,3	А-К 90–10
1	61–65	81–88	0,028–0,032	3,3–3,5	А-К 10–90
2,5	62–66	76–82	0,028–0,033	3,2–3,4	А-К 10–90
5	67–72	86–94	0,030–0,034	3,3–3,5	А-К 30–70
Диоксид кремния					
0,25	50–53	63–66	0,033–0,036	2,3–2,6	А-К 90–10
0,5	48–51	63–69	0,034–0,038	2,5–2,9	А-К 80–20
1	52–55	65–71	0,030–0,033	2,8–3,2	А-К 60–40
2,5	53–60	64–72	0,031–0,035	2,7–3,1	А-К 60–40
Состав с УНТ					
0,01	52–54	63–65	0,032–0,036	2,8–3,1	А-К 95–5
0,05	50–53	66–68	0,028–0,032	3,4–3,7	А-К 90–10
0,1	49–52	70–73	0,025–0,029	3,9–4,1	А-К 50–50
0,25	50–52	71–74	0,023–0,026	4,3–4,5	А-К 50–50
0,5	53–55	77–79	0,022–0,026	4,8–5,1	А-К 15–85

уже при незначительных концентрациях (от 0,01%), адгезия возрастает с 2,2–2,4 до 2,8–3,1 МПа при характере отрыва адгезионно-когезионном А95–К5. Дальнейшее введение состава с УНТ приводит к еще более стремительному повышению адгезионной прочности и при концентрации 0,5% достигает 4,8–5,1 МПа при характере отрыва преимущественно когезионном (А15–К85), что говорит об истинном значении адгезии, значительно превышающем 5 МПа (рис. 1). Стоит отметить, что при введении 0,1% и более при отрыве испытательного упора наблюдалась деформация металлической поверхности металла 08кп толщиной 1 мм и в соответствии с этим необходимо применять при оценке адгезионной прочности модифицированных УНТ металл большей толщины. Также введение в лакокрасочный материал 0,25% и более приводит к существенному повышению вязкости получаемого материала, что, в свою очередь, приводит к технологическому усложнению применения такого состава и дополнительному расходу разбавителей для достижения требуемого значения вязкости. При введении состава отмечено некоторое повышение значения твердости покрытия с 63–65 до 77–79 ед. при 0,5% УНТ, что также говорит о вероятном повышении механической прочности покрытия.

Проведенные дополнительно испытания эластичности лакокрасочных покрытий методом изгиба позволили выявить восприимчивость наномодифици-

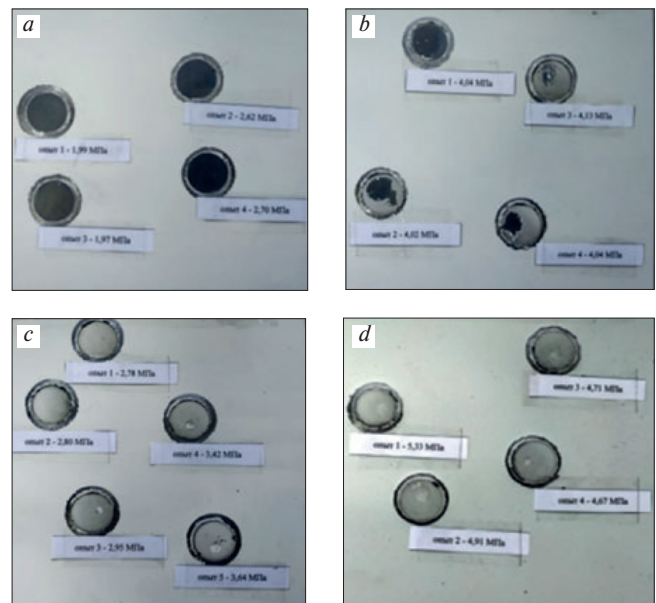


Рис. 1. Результаты испытаний адгезионной прочности наномодифицированных лакокрасочных покрытий: а – без добавок; б – диоксид кремния 0,1%; в – оксид висмута 0,1%; д – состав с УНТ 0,5%

Fig. 1. Results of testing the adhesion strength of nanomodified paint coatings: a – without additives; b – silicon dioxide 0.1%; c – bismuth oxide 0.1%; d – composition with CNT 0.5%

рованных покрытий к деформационным воздействиям. В табл. 2 представлены результаты испытаний; фотографии поверхностей получены с помощью оптического микроскопа. Таким образом, ряд покрытий, которые показали высокую твердость, адгезию и прочность к истиранию, демонстрируют низкую восприимчивость к деформационным нагрузкам (покрытия с составами УНТ более 0,1% и с наночастицами оксида висмута более 1%). Лакокрасочные покрытия без нанодобавок начинают разрушаться (образование трещин) после деформации вокруг металлического стержня диаметром $d=16$ мм, при этом количество и величина микротрещин равномерная на всем изгибаемом участке (табл. 2). При изгибе образцов с составами УНТ количество и величина микротрещин уменьшаются и при содержании УНТ 0,1% сводятся к минимуму, при этом диаметр стержня, при котором начинает разрушаться покрытие, также уменьшается ($d=10$ мм). Однако при большем введении состава УНТ диаметр стержня, при котором разрушается покрытие и начинают появляться микротрещины, вновь увеличивается ($d=16$ мм и более), но при незначительном возрастании количества и величины микротрещин.

При обработке результатов испытаний образцов с наночастицами оксида висмута определено, что при введении модификатора в состав лакокрасочного материала количество и величина микротрещин в покрытии, а также диаметр стержня, при котором разрушается покрытие, уменьшаются (до $d=14$ мм) и при содержании 1% сводятся к минимуму. Стоит отметить значительное ухудшение стойкости покрытий к деформационным воздействиям при содержании в составе наночастиц оксида висмута более 1%: при

Таблица 2
Table 2

Результаты испытаний деформационной устойчивости лакокрасочных покрытий (размер фотографий 10×10; увеличение ×500)
Results of testing the deformation resistance of paint and varnish coatings (photo size 10×10; magnification ×500)

УНТ	Вид покрытия после воздействия	Оксид висмута	Вид покрытия после воздействия
0% d=16 мм		0% d=16 мм	
0,05% d=14 мм		0,25% d=16 мм	
0,1% d=10 мм		0,5% d=16 мм	
0,25% d=16 мм		1% d=14 мм	
0,5% d=18 мм		2,5% d=20 мм	

концентрации 2,5% покрытие полностью теряет свои защитные качества и разрушается при диаметре стержня d=20 мм.

Результаты исследования линейных размеров элементов структуры микро- и нанорельефа поверхности покрытий на примере наномодифицированных покрытий с УНТ с использованием атомно-силового микроскопа представлены на рис. 2. Сканирование различных участков поверхностей образцов лакокрасочных покрытий показало, что при

Список литературы

- Беленя Е.И., Балдин В.А., Ведеников Г.С. Металлические конструкции: Общий курс. М.: Стройиздат, 1986. 560 с.
- Еремин К.И. Особенности эксплуатации металлических конструкций промышленных зданий. Москва: МИСИ–МГСУ, 2012. 248 с.
- Пчельников А.В. Концепция повышения качества защитных покрытий металлических конструкций агропромышленного комплекса // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2022. № 11 (767). С. 38–52.

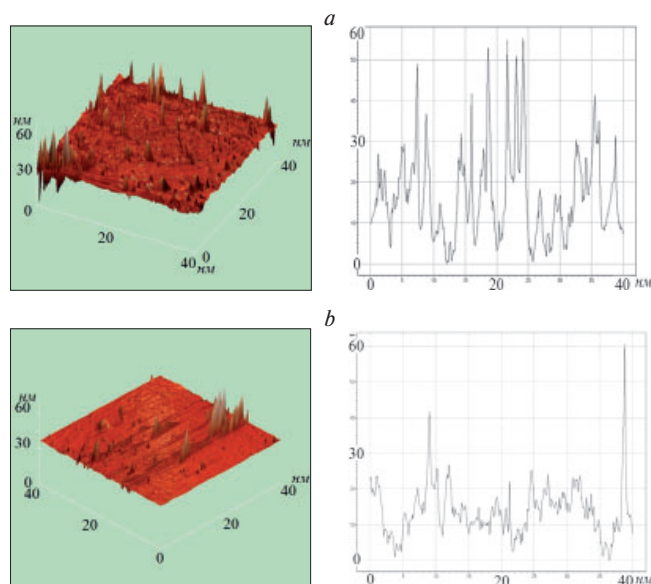


Рис. 2. Исследование линейных размеров элементов структур микро- и нанорельефа поверхности: а – без нанодобавок; б – с составом УНТ 0,1%
Fig. 2. Study of the linear dimensions of the elements of the structures of the micro- and nanorelief of the surface: a – without nanoadditives; b – with a CNT composition of 0.1%

введении состава с УНТ поверхность становится более гладкой, средняя шероховатость Ra уменьшается с 60–70 до 20–30 нм.

Заключение

Исходя из результатов исследования можно сделать вывод, что обеспечение механической прочности защитных покрытий металлоконструкций возможно при введении в лакокрасочный материал наноразмерных добавок. Однако стоит тщательно подходить к выбору вида и концентрации нанодобавок в материале: необходимо проводить комплекс исследований для выявления потенциальных свойств получаемых покрытий. Настоящие результаты показали, что при использовании в сочетании с акриловым лакокрасочным материалом состава с УНТ и оксида висмута в количестве 0,1 и 1% соответственно возможно добиться высоких показателей механической прочности (адгезии, прочности к истиранию, твердости, деформационной устойчивости) покрытий, которые способны надежно защитить стальные металлоконструкции в условиях эксплуатационных сред и воздействий.

References

- Belenya E.I., Baldin V.A., Vedenikov G.S. Metallicheskie konstruksii. Obshchii kurs. [Metal constructions. General course]. Moscow: Stroyizdat. 1986. 560 p.
- Eremin K.I. Osobennosti ekspluatatsii metallicheskih konstruksii promyshlennykh zdanii [Peculiarities of operation of metal structures of industrial buildings]. Moscow: Publishing house MISS–MGSU. 2012. 248 p.
- Pchel'nikov A.V. The concept of improving the quality of protective coatings of metal structures of the agro-industrial complex. Izvestiya vysshikh uchebnykh

4. Логанина В.И., Светалкина М.А., Арискин М.В. Оценка напряженного состояния лакокрасочных покрытий в зависимости от шероховатости их поверхности // *Известия высших учебных заведений. Строительство*. 2023. № 2 (770). С. 36–43.
5. Пичугин А.П., Пчельников А.В., Хританков В.Ф., Туляганов А.К. Оценка эффективности использования нанодобавок в защитных покрытиях // *Строительные материалы*. 2023. № 3. С. 20–26. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-811-3-20-26>
6. Пчельников А.В., Пичугин А.П., Хританков В.Ф., Смирнова О.Е. Роль нанодобавок в формировании прочного контактного слоя защитных покрытий // *Строительные материалы*. 2022. № 7. С. 45–50. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-804-7-45-50>
7. Хозин В.Г., Абдрахманова Л.А., Низамов Р.К. Общая концентрационная закономерность эффектов наномодифицирования строительных материалов // *Строительные материалы*. 2015. № 2. С. 25–33.
8. Нелюбова В.В., Кузьмин Е.О., Строкова В.В. Структура и свойства нанодисперсного кремнезема, синтезированного золь-гель методом // *Строительные материалы*. 2022. № 12. С. 38–44. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-809-12-38-44>
9. Лесовик В.С., Федюк Р.С., Гридчин А.М., Мурали Г. Повышение эксплуатационных характеристик защитных композитов // *Строительные материалы*. 2021. № 9. С. 32–40. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-795-9-32-40>
10. Ильина В.Н., Ильин С.В., Халикова Г.Р. Исследование влияния нанокремнезема на морфологию эпоксидного связующего // *Нанотехнологии в строительстве: Научный интернет-журнал*. 2023. Т. 15, № 4. С. 328–336.
11. Ильина В.Н., Ильин С.В., Гафарова В.А., Кузеев И.Р. Влияние нанокремнезема на свойства композиционных материалов // *Нанотехнологии в строительстве: Научный интернет-журнал*. 2023. Т. 15. № 3. С. 228–237.
12. Массалимов И.А., Чуйкин А.Е., Массалимов Б.И., Мустафин А.Г. Новые защитные покрытия на основе наночастиц серы, полученные из полисульфида калия // *Нанотехнологии в строительстве: научный интернет-журнал*. 2023. Т. 15. № 1. С. 27–36.
13. Теруков Е.И., Бабаев А.А., Ткачев А.Г., Жилина Д.В. Радиопоглощающие свойства полимерных композитов на основе шунгита и углеродного наноматериала «Таунит-М» // *Журнал технической физики*. 2018. Т. 88. № 7. С. 1075–1079.
14. Шашок Ж.С., Прокопчук Н.Р. Применение углеродных наноматериалов в полимерных композициях. Минск: БГТУ, 2014. 232 с.
15. Зимон А.Д. Адгезия пленок и покрытий. М.: Химия, 1977. 352 с.
4. Loganina V.I. Svetalkina M.A., Ariskin M.V. Assessment of the stress state of paint and varnish coatings depending on the roughness of their surface *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Stroitel'stvo*. 2023. No. 2 (770), pp. 36–43. (In Russian).
5. Pichugin A.P., Pchelnikov A.V., Khritankov V.F., Tulyaganov A.K. Evaluation of the effectiveness of the use of nano-additives in protective coatings. *Stroitel'nye Materialy [Construction Materials]*. 2023. No. 3, pp. 20–26. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-811-3-20-26>
6. Pchelnikov A.V., Pichugin A.P., Khritankov V.F., Smirnova O.E. The role of nano-additives in the formation of a strong contact layer of protective coatings. *Stroitel'nye Materialy [Construction Materials]*. 2022. No. 7, pp. 45–50. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-804-7-45-50>
7. Khozin V.G., Abdrakhmanova L.A., Nizamov R.K. General concentration pattern of effects of nanomodification of building materials. *Stroitel'nye Materialy [Construction Materials]*. 2015. No. 2, pp. 25–33. (In Russian).
8. Nelubova V.V., Kuzmin E.O., Stroikova V.V. Structure and properties of nanodispersed silica synthesized by the sol-gel method. *Stroitel'nye Materialy [Construction Materials]*. 2022. No. 12, pp. 38–44. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-809-12-38-44>
9. Lesovik V.S., Fediuk R.S., Gridchin A.M., Murali G. Improving the operational characteristics of protective composites. *Stroitel'nye Materialy [Construction Materials]*. 2021. No. 9, pp. 32–40. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-795-9-32-40>
10. Ilyina V.N., Ilyin S.V., Khalikova G.R. Study of the influence of nanocarbon fillers on the morphology of an epoxy binder. *Nanotekhnologii v stroitel'stve*. 2023. Vol. 15. No. 4, pp. 328–336. (In Russian).
11. Ilyina V.N., Ilyin S.V., Gafarova V.A., Kuzeev I.R. The influence of nanocarbon fillers on the properties of composite materials. *Nanotekhnologii v stroitel'stve*. 2023. Vol. 15. No. 3, pp. 228–237. (In Russian).
12. Massalimov I.A., Chuikin A.E., Massalimov B.I., Mustafin A.G. New protective coatings based on sulfur nanoparticles obtained from potassium polysulfide. *Nanotekhnologii v stroitel'stve*. 2023. Vol. 15. No. 1, pp. 27–36. (In Russian).
13. Terukov E.I., Babaev A.A., Tkachev A.G., Zhilina D.V. Radio-absorbing properties of polymer composites based on shungite and carbon nanomaterial “Taunit-M”. *Zhurnal tekhnicheskoi fiziki*. 2018. Vol. 88. No. 7, pp. 1075–1079. (In Russian).
14. Shashok Zh.S., Prokopchuk N.R. Primenenie ugle-rodneykh nanomaterialov v polimernykh kompozitsiyakh [Application of carbon nanomaterials in polymer compositions]. Minsk: BSTU, 2014. 232 p.
15. Zimon A.D. Adgeziya plenok i pokrytii [Adhesion of membrane and coatings]. Moscow: Khimiya. 1977. 352 p.

УДК 691:666

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-818-10-78-84>

П.А. ФЕДОРОВ, канд. техн. наук (fpa_idpo@mail.ru),
Д.А. СЕНИЦИН, канд. техн. наук, Г.Ю. ШАГИГАЛИН, инженер

Уфимский государственный нефтяной технический университет (450064, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1)

Использование пыле-уноса из системы газоочистки вагранки минераловатного производства для бесклинкерного вяжущего

Разработка вяжущих на основе техногенных отходов промышленности является наиболее перспективным направлением развития строительного материаловедения. Одним из пригодных для данного направления отходов является пыле-унос из системы газоочистки вагранки минераловатного производства. Приведены результаты исследований структуры пыле-уноса, а также физико-механических свойств бесклинкерного вяжущего в сопоставлении с портландцементом. Предложена технологическая подготовка пыле-уноса путем просеивания ее через сито 0,16 мм и последующей механической активации. Наилучшие значения показал состав вяжущего с удельной поверхностью 733 м²/кг, затворенный водным раствором едкого натра с концентрацией 8,3 М. Для этого состава в 28 сут нормального твердения прочность при сжатии составила 54,3 МПа, при изгибе – 6,6 МПа. Рассмотрено влияние состава щелочного активатора, условий твердения на прочность образцов при изгибе и сжатии. Проведена оценка структуры формирующейся цементной матрицы, а также ее минералогический состав. Исследование продуктов структурообразования цементной матрицы из пыле-уноса показало, что она формируется минералами цеолитовой группы.

Ключевые слова: пыле-унос, бесклинкерное вяжущее, портландцемент, техногенные отходы, цеолиты, энергосбережение.

Работа выполнена в рамках реализации программы стратегического развития «Приоритет 2030».

Для цитирования: Федоров П.А., Сеницин Д.А., Шагигалин Г.Ю. Использование пыле-уноса из системы газоочистки вагранки минераловатного производства для бесклинкерного вяжущего // *Строительные материалы*. 2023. № 10. С. 78–84.

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-818-10-78-84>

P.A. FEDOROV, Candidate of Sciences (Engineering) (fpa_idpo@mail.ru) (d4013438@yandex.ru),

D.A. SINITSIN, Candidate of Sciences (Engineering) (3505040@mail.ru), G.Yu. SHAGIGALIN, Engineer (ufa-gazinur@mail.ru)

Ufa State Petroleum Technological University (1, Kosmonavtov Street, Ufa, 450064, Russian Federation)

Use of Dust Entrainment from the Gas-Cleaning System of a Cladder of Mineral Wool Production for Clinker-Free Binder

The development of binders based on man-made industrial waste is one of the most popular areas of development of building materials science. One of the promising wastes is dust removal from the gas cleaning system of the mineral wool production cupola. The article presents the results of studies of the structure of dust entrainment, as well as the physical and mechanical properties of a clinker-free binder in comparison with Portland cement. The technological preparation of dust removal by sifting it through a 0.16 mm sieve and subsequent mechanical activation is proposed. The best values were shown by the composition of the binder with a specific-to-specific surface area of 733 m²/kg sealed with an aqueous solution of caustic soda with a concentration of 8.3 M. For this composition, during 28 days of normal hardening, the compressive strength was 54.3 MPa, bending strength was 6.6 MPa. The influence of the composition of the alkaline activator, the hardening conditions on the strength of the samples during bending and compression is considered. An assessment of the structure of the forming cement matrix, as well as its mineralogical composition, was carried out. The study of the products of the structure formation of the cement matrix from dust-entrainment is represented by cyolite group minerals.

Keywords: dust entrainment, clinker-free binder, Portland cement, man-made waste, cyolites, energy saving.

The work was carried out as part of the implementation of the strategic development program “Priority 2030”.

For citation: Fedorov P.A., Sinitsin D.A., Shagigalin G.Yu. Use of dust entrainment from the gas-cleaning system of a cladder of mineral wool production for clinker-free binder.

Stroitel'nye Materialy [Construction Materials]. 2023. No. 10, pp. 78–84. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-818-10-78-84>

Интенсивное развитие мировой промышленности способствует истощению природно-ресурсной базы, накоплению значительных объемов отходов производства и прочих факторов, ухудшающих экологическую безопасность. Так, по статистическим данным Росстата¹, только за 2019 г. в РФ накоплено отходов производства и потребления в количестве

7,75 млрд т, а утилизировано лишь 3,857 млрд т. Для улучшения этой ситуации необходимо разрабатывать ресурсосберегающие технологии для производства товарной продукции с использованием отходов производства. Одним из востребованных направлений утилизации отходов остается производство строительных материалов и изделий.

¹ Количество образованных отходов производства и потребления <https://www.fedstat.ru/indicator/42720> (дата обращения 14.05.2023); количество использованных отходов производства и потребления <https://www.fedstat.ru/indicator/42718> (дата обращения 14.05.2023).

В настоящее время на территории РФ производство минераловатного утеплителя является одним из перспективных направлений строительной индустрии. Это связано с тем, что, с одной стороны, данное производство экономически эффективно за счет большого объема потребителей и имеющейся практически неограниченной ресурсной базы горных пород, таких как габбро, базальты, доломиты и пр. С другой стороны, увеличение мощностей производства минеральной ваты способствует образованию многотоннажных техногенных отходов производства. Так, по данным [1], ежегодно при производстве минеральной ваты образуются отходы порядка 10–16% от объема готовой продукции. В зависимости от технологии производства это значение может достигать до 60% [2].

Основными видами отходов минераловатного производства являются отсеиваемые сырьевые материалы и волокна минеральной ваты, пыле-уноса, отходы расплава, обрезков матов и пр. Часть отходов может использоваться в качестве возвратного сырья. Однако их значительная часть является безвозвратными потерями. Это связано с тем, что при производстве стекловидных изделий требуется высокая степень постоянства рецептуры.

По объему накопления одним из многотоннажных отходов является пыле-унос из системы газоочистки вагранки. Так, по результатам оценки воздействия на окружающую среду проектных решений завода по производству минераловатного утеплителя в индустриальной зоне «Кайрат» (Респ. Казахстан)¹ установлено, что в этой системе среднее количество образования пыле-уноса составляет 14 г/м³. При производительности системы очистки и дожига вагранки в объеме 20000 м³/ч пыле-уноса образуется в час 280 кг, за смену – 2,3 т. Хотя этот вид отхода относится к IV классу опасности (малоопасные отходы для окружающей среды, со временем восстановления после ущерба не менее трех лет), рекультивация земель на полигоне происходит достаточно долгое время.

В настоящее время наиболее распространенным направлением утилизации этого отхода является использование его в качестве инертного заполнителя в бетонной смеси [3] или как добавка к клинкерному цементу [4]. В работе [4] указывается, что структура цементной матрицы имеет повышенную прочность цементного камня при сжатии и высокую скорость гидратации силикатов кальция. Однако существует ограничение по количеству пыле-уноса в цементе. Так, по данным [5], содержание пыле-уноса более 7% от массы цемента приводит к снижению прочности и, следовательно, к низкой коррозионной стойкости. В работе [6] показано, что при разработке составов огнеупорного бетона на основе кальций-алюминатного цемента установлено, что пыле-унос может выступать заменителем технического микрокремнезема. Еще одним направлением утилизации этого от-

хода является использование его в качестве добавки к глинистому сырью при производстве керамических строительных изделий [7].

Одним из возможных направлений утилизации пыле-уноса является использование его в бесклинкерных вяжущих (шлакощелочных или щелочеактивированных вяжущих и геополимерах). Эти цементы имеют меньший углеродный след в отличие от портландцемента за счет снижения энергоемкости получения [8, 9]. В данных типах вяжущих, как правило, используются отходы производства и переработки сырья для изготовления минеральной ваты, образующиеся на разных технологических переделах [10], либо непосредственное использование утеплителя как процесс рециклинга ваты [11]. Частными случаями для производства бесклинкерного вяжущего являются стеклобой [12] и фибра из стекловолокна [13].

Однако в отличие от других отходов минераловатного производства для пыле-уноса отсутствуют экономически эффективные технологии переработки или повторного использования, которые могли бы значительно сократить его накопления. Возможно, это связано с тем, что предлагаемые методы учитывают пыле-унос как дополнительный компонент, объем переработки которого не превышает 5–10% [6].

В представленной работе приведены результаты исследований применения пыле-уноса из системы газоочистки вагранки минераловатного производства в качестве основного сырья для производства бесклинкерного щелочеактивированного вяжущего. Для достижения поставленной цели решались следующие задачи: изучение структуры пыле-уноса; оценка физико-механических свойств вяжущего; изучение структуры и продуктов новообразований цементной матрицы.

Материалы и методы

В исследовании применялись следующие типы вяжущих с особенностями их затворения: В1 – эталонный состав – портландцемент марки ЦЕМ I 42.5Н; В2 – пыле-унос после просева через сито 0,16 мм, затворение раствором щелочи; В3 – пыле-унос после просева через сито 0,16 мм и механической активации в течение 60 с, затворение раствором щелочи; В4 – пыле-унос после просева через сито 0,16 мм и механической активации в течение 120 с; В5 – пыле-унос после просева через сито 0,16 мм и механической активации в течении 240 с, затворение раствором щелочи; В6 – пыле-унос после просева через сито 0,16 мм и механической активации в течение 120 с, затворение водой.

Исследование физико-механических характеристик вяжущего осуществлялось на образцах из цементно-песчаного раствора состава 1:3.

Расход компонентов для цементно-песчаного раствора приведен в табл. 1.

¹ Проект ОВОС <https://ecoportal.kz/Public/PubHearings/PublicHearingDetail?hearingId=3783> (дата обращения 16.07.2023).

Таблица 1
Table 1

Расход сырья на приготовление опытных образцов цементно-песчаного раствора
Consumption of raw materials for the preparation of prototypes of cement-sand mortar

Тип вяжущего	Состав*	Вяжущее, г		Вода, г	Щелочь в сухом состоянии, г	В/Вж	Песок, г
		ПЦ	Пыле-унос		Едкий натр		
В1	В1а, В1б	450	–	189	–	0,42	1350
В2	В2а, В2б	–	450	214	75	0,41	1350
В3	В3а, В3б	–	450	214	75	0,41	1350
В4	В4а, В4б	–	450	214	75	0,41	1350
В5	В5а, В5б	–	450	214	75	0,41	1350
В6	В6б	–	450	189	–	0,42	1350

Примечание. * Образцы с номерами составов В1а, В2а, В3а, В4а, В5а выдерживались в камере естественного твердения в течение 28 сут; образцы с номерами составов В1б, В2б, В3б, В4б, В5б, В6б подвергались температурно-влажностной обработке.

Образцы подвергались температурно-влажностной обработке по одноступенчатому режиму 3+6+3=12 ч. Максимальная температура выдержки 90°C.

Эталонный тип вяжущего В1 представляет собой клинкерный цемент – портландцемент марки ЦЕМ I 42.5Н производства ООО «Магнитогорский цементно-огнеупорный завод» (г. Магнитогорск, РФ).

Для бесклинкерных вяжущих типов В2–В6 в качестве вяжущего принят пыле-унос из системы газоочистки вагранки минераловатного производства ООО «Агидель» (г. Благовещенск, Респ. Башкортостан, РФ).

Пыле-унос представляет собой смесь серого цвета, включающую тонкодисперсные фракции и крупные включения до 10 мм. В качестве основных компонентов для производства минеральной ваты применяются горные породы базальтовой группы Абзаковского месторождения, а также кокс литейный, частично доменный шлак, порфирит и прочие добавки.

Для затворения вяжущих типов В1, В6 применялась питьевая вода, для составов В2–В5 – щелочной активатор в виде водного раствора натра едкого с молярной концентрацией 8,3 М.

Для приготовления водного раствора натра едкого применялся натр едкий технический чешуированный производства АО «Башкирская содовая компания «Каустик» (г. Стерлитамак, Респ. Башкортостан, РФ). Растворение щелочи осуществлялось в питьевой воде. Концентрация раствора контролировалась по плотности раствора с помощью ареометра «АОН-1». Плотность водного раствора едкого натра составила 1,284 г/см³, что соответствует молярной концентрации 8,3 М.

В качестве мелкого заполнителя применялся полифракционный кварцевый песок, составленный

из карьерного песка (месторождение возле п. Кабаково, Респ. Башкортостан, РФ) в соответствии с гранулометрическим составом, приведенным в ГОСТ 30744–2001 «Цементы. Методы испытаний с использованием полифракционного песка». Истинная плотность песка – 2,97 г/см³. Содержание пылевидных и глинистых частиц – $P_{отм}=2,3<3\%$.

Исследование структуры пыле-уноса включало в себя определение гранулометрического состава, оценку тонкости помола, истинной и насыпной плотности, определение химического и минерального состава пыли.

Механическая активация пыле-уноса выполнялась с помощью лабораторной шаровой мельницы с наполнением из стальных шаров. Тонкость помола определяли методом газопроницаемости Козени и Кармана с помощью прибора ПСХ-12. В качестве основных параметров были приняты удельная поверхность (м²/кг) и среднемассовый размер частиц (мкм). Истинную плотность пыле-уноса определяли по ГОСТ 30744–2001 «Цементы. Методы испытаний с использованием полифракционного песка» с помощью прибора «Ле-Шателье» с применением в качестве жидкости обезвоженного керосина.

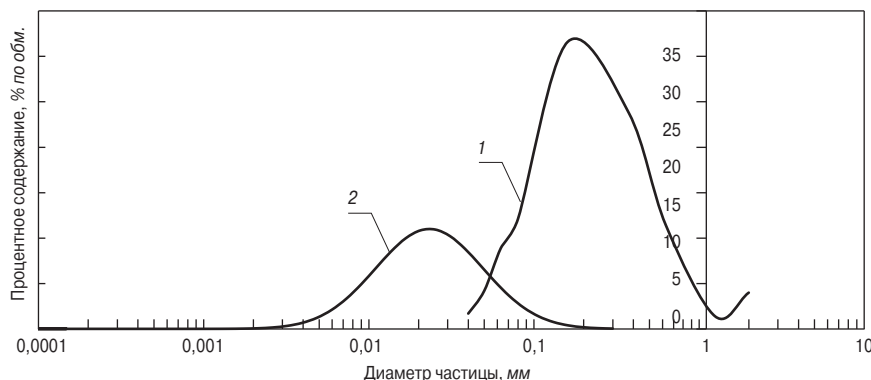


Рис. 1. Распределение частных остатков для пыле-уноса: 1 – пыле-унос без просева; 2 – пыле-унос после просева через сито 0,16 мм и механической активации в течение 120 с
Fig. 1. Distribution of private residues for dust removal: 1 – dust entrainment without sieving; 2 – dust entrainment after sifting through a 0.16 mm sieve and mechanical activation for 120 s

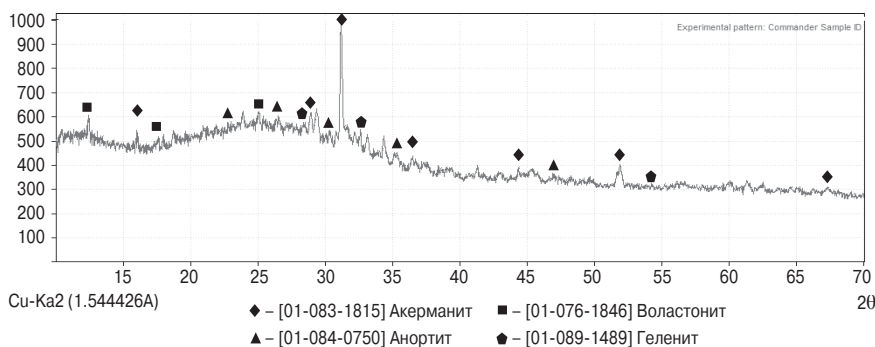


Рис. 2. Дифрактограмма пыле-уноса
Fig. 2. Diffraction pattern of dust entrainment

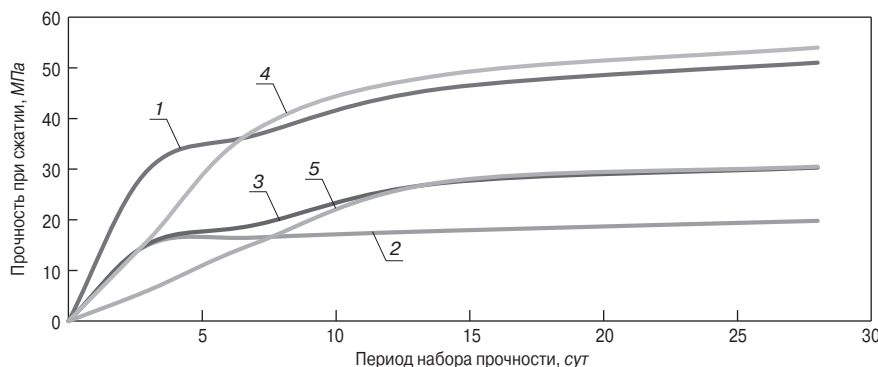


Рис. 3. Кинетика набора прочности разных типов вяжущих: 1 – В1а; 2 – В2а; 3 – В3а; 4 – В4а; 5 – В5а
Fig. 3. Kinetics of strength gain of different types of binders: 1 – В1а; 2 – В2а; 3 – В3а; 4 – В4а; 5 – В5а

Таблица 2
Table 2

**Тонкость помола пыле-уноса
в зависимости от продолжительности механической активации
Grinding fineness of dust entrainment depending
on the duration of mechanical activation**

Размер ячейки сита для просеивания сырья, мм	Время механической активации, с	Удельная поверхность, м ² /кг	Средний размер частиц по массе, мкм
0,16	0	429	5,5
	60	605	3,9
	120	733	3,2
	240	771	3,1

Рентгенофазовый анализ заключался в проведении качественной оценки минералогического состава пыле-уноса. Съемка проводилась с помощью дифрактометра «D2 Phaser» в диапазоне углов 10–70° со скоростью 0,02°. Расшифровка дифрактограмм проводилась с помощью программы «Match!» и базы

данных «IDDC PDF+». Степень кристалличности пыле-уноса определяли в программе «TOPAS. Bruker». Химический состав пыле-уноса был выполнен с помощью энергодисперсионного рентгенофлуоресцентного спектрометра «EDX-7000».

В исследовании применялись контрольные образцы размером 40×40×160 мм по ГОСТ 30744–2001 «Цементы. Методы испытаний с использованием полифракционного песка». Технологический режим приготовления растворов для вяжущих типов В2–В5 был принят на основе рекомендаций для шлакощелочных цементов, приведенных в работе [14].

Оценка физико-механических свойств образцов осуществлялась по критериям прочности при изгибе и сжатии. Определение прочности при сжатии образцов нормального твердения проводилась на 3-и, 7-е и 28-е сут неразрушающим методом контроля с помощью прибора «ОНИКС». Определение прочности при изгибе и сжатии разрушающим методом выполнялось с помощью гидравлического пресса «ПГМ-500МГ4» в периоды твердения: для образцов нормального твердения – 28 сут; для образцов, подвергнутых тепловлажностной обработке, время испытания принято 2 ч после выемки из камеры.

Оценка структуры цементной матрицы полученных образцов оценивалась в соответствии с ГОСТ 12730.4–2020 «Бетоны. Методы определения параметров пористости» по показателям: средняя плотность (кг/м³); истинная плотность (г/см³); водопоглощение по массе (%); относительная плотность; пористость материала. Изучение продуктов новообразований цементной матрицы осуществлялось для состава В4 с помощью рентгенофазового анализа.

Таблица 3
Table 3

**Химический состав пыле-уноса
Chemical composition of dust entrainment**

Fe ₂ O ₃ +FeO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	MgO	TiO ₂	ZnO	SO ₃	Na ₂ O+K ₂ O	ППП
7,38	3,56	53,18	14,82	9,9	0,18	1,39	1,64	7,65	25,76

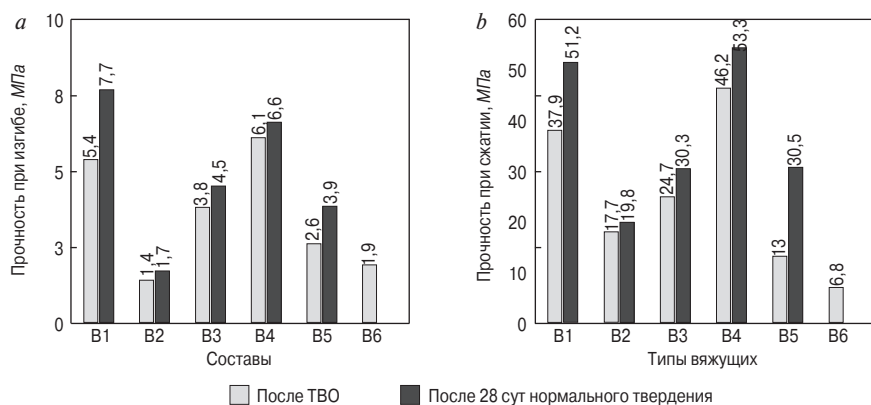


Рис. 4. Результаты испытаний образцов: а – прочность стержней при изгибе; б – прочность при сжатии половинок стержня

Fig. 4. Sample test results: a – bending strength of rods; b – compressive strength of the rod halves

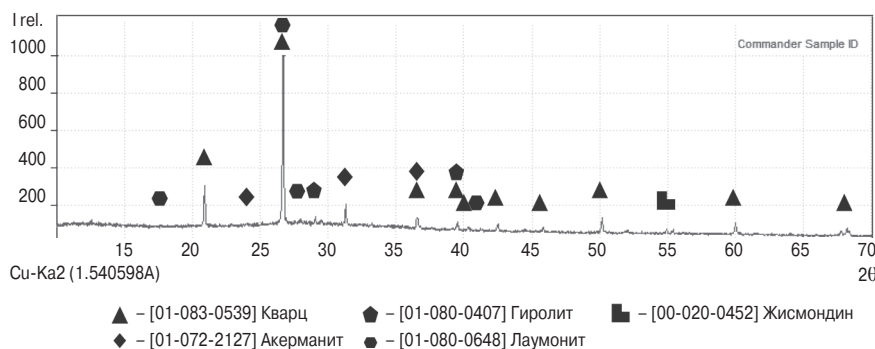


Рис. 5. Качественный рентгенофазовый анализ образца состава В46

Fig. 5. Qualitative X-ray phase analysis of a sample of composition B46

Результаты исследований

Результаты определения гранулометрических составов для пыле-уноса в естественном состоянии, а также после просева через сито 0,16 мм и механической активации в течение 120 с приведены на рис. 1.

В пыле-уносе, находящемся в естественном состоянии, присутствует незначительное количество крупных включений размером более 2,5 мм, которые удалялись из навески перед исследованием. Наибольшее количество остатка пыле-уноса в промежутке 0,09–0,375 мм. Из полученных результатов видно, что требуется помол сырья. Помол осуществлялся в два этапа. На первом этапе осуществлялся просев пыле-уноса через сито с ячейкой 0,16 мм. На втором этапе проводилась механическая активация просеянного сырья для увеличения тонкости помола.

Для определения оптимального периода механической активации было выбрано время 60, 120 и 240 с. Результаты изменения параметров тонкости помола приведены в табл. 2.

Результаты рентгенофлуоресцентного анализа химического состава пыле-уноса приведены в табл. 3. Из данных табл. 3 видно, что основным оксидом является SiO₂, содержание которого составляет 53,18 мас. %. Кроме того, пыле-унос содержит CaO 14,82 мас. % и Al₂O₃ – 3,56 мас. %. Модуль основности M_K=0,44 показывает, что химический состав пы-

ле-уноса относится к низкоосновным соединениям.

Дифрактограмма пыле-уноса с результатами качественного рентгенофазового анализа приведена на рис. 2.

На дифрактограмме отчетливо выражены два гало в промежутке двойных углов 10–16° (частично) и 17–36°. Это свидетельствует о наличии аморфной фазы. Кроме того, отмечается присутствие пиков кристаллических фаз, которые подвергнуты, видимо, частичному расплаву, что подтверждается результатами плавления базальтов [15].

По результатам качественного рентгенофазового анализа дифрактограммы пыле-уноса (рис. 2) было установлено присутствие акерманита Ca₂MgSi₂O₇, геленита Ca₂Al₂SiO₇, вызванное в результате действия алюмосиликатных расплавов на минералы габробоазальтовой группы плагиоклазов в виде анортита CaAl₂Si₂O₈. Возможно присутствие воластонита-2М Ca₃(Si₃O₉).

Степень кристалличности пыле-уноса: кристаллические фазы составляют 36,96 об. %; аморфные фазы – 63,04 об. %. Как видно, структура пыле-уноса включает в себя стеклообразные элементы, способствующие дополнительной реакционной способности при щелочной активации водным раствором едкого натра.

Кинетика набора прочности разных типов вяжущих В1а–В5а в условиях естественного твердения приведена на рис. 3.

Набор прочности исследуемых составов в целом соответствует эталонному составу В1а. Однако для состава В1а характерен быстрый набор прочности в первые двое суток. В свою очередь, низкий набор прочности у бесклинкерных вяжущих в начальном периоде, очевидно, вызван необходимостью твердения на открытом воздухе в первые трое суток. При использовании пыле-уноса без механической активации отмечается существенное снижение прочности из-за малой интенсивности гидратационных процессов, формирующих цементную матрицу. Наибольшую прочность показал состав В4а с характерной механической активацией 120 с.

Результаты испытания на прочность при изгибе и сжатии рассматриваемых составов приведены на рис. 4.

Наилучше результаты показал состав В4 при нормальном условии твердения: прочность при сжатии 54,3 МПа, при изгибе – 6,6 МПа. Наименьшую прочность при изгибе и сжатии в тех же условиях тверде-

ния показали составы В2 и В6. При этом состав В6 показал наименьшую прочность при сжатии 6,8 МПа, при изгибе – 1,9 МПа. Наиболее близкие значения к эталонному составу В1 показал состав В4. Разница прочности в 28 сут твердения между эталонным составом В1 и составом В4 составила при изгибе 65%, при сжатии – 33%.

При рассмотрении влияния условий твердения результаты исследования показали, что разница прочности при изгибе и сжатии в условиях температурно-влажностной обработки для составов В3, В4, В5 в среднем составила 90%.

Наибольшую разницу значений, в зависимости от условий твердения, показал состав В2 – разница прочности при изгибе составила 81%.

Полученные результаты исследования физико-механических свойств сопоставимы с результатами испытания на основе шлакощелочных вяжущих, приведенными в работе [16].

Исследования структуры образцов на основе пыле-уноса проводились на составе В4б и показали следующие результаты: средняя плотность 2121 кг/м³; истинная плотность 2,82 кг/м³; водопоглощение по массе 8,1%, относительная плотность 0,75; пористость материала 25%. Пористая структура образца неравномерная, что характерно для образцов, подверженных ТВО.

Результаты качественного рентгенофазового анализа образца состава В4б приведены на рис. 5.

На дифрактограмме присутствуют ярко выраженные пики кварца SiO₂. Отмечается наличие акерманита Ca₂MgSi₂O₇ как непрогидратированного минерала пыле-уноса. Конечными продуктами цементной матрицы на основе пыле-уноса и ее щелочной активации являются характерные для шлакощелочных вяжущих низкоосновные гидросиликаты кальция типа кальциевого цеолита жисмондин Ca₂Al₄Si₄O₁₆·9(H₂O), а также гидроалюмосиликаты типа гиролит NaCa₁₆Si₂₃AlO₆₀(OH)₈·14H₂O как продукты гидратации при температурно-влажностной обработке. Возможно также присутствие в составе лаумонита Ca(Si₄Al₂)O₁₂·4H₂O.

Рассматривая минералогический состав продуктов твердения в целом, можно сделать вывод, что основными минералами цементной матрицы являются цеолиты. Этот вывод согласуется с результатами, приведенными в работе [17].

Выводы

На основании полученных результатов можно сделать вывод, что пыле-унос из системы газоочистки вагранки минераловатного производства пригоден в качестве сырья для производства бесклинкерного вяжущего, затворяемого водным раствором едкого натра. Однако для использования пыле-уноса необходимы мероприятия по увеличению удельной поверхности с помощью механической активации сырья.

Наилучший состав вяжущего с удельной поверхностью 733 м²/кг и концентрацией активатора 8,3 М показал прочность при сжатии 54,3 МПа.

Основными минералами, образующимися при гидратации пыле-уноса с водным составом едкого натра, являются минералы группы цеолитов.

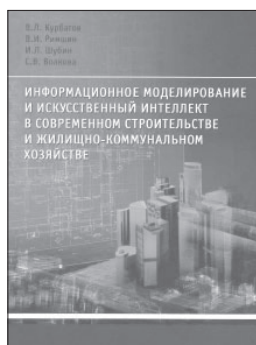
Список литературы / References

1. Клаус-Дитер Х. Утилизация минеральной ваты – продуманное средство, сочетающее увеличение прибыли и охрану окружающей среды // *Базальтовые технологии*. 2014. № 1. С. 65–72.
1. Klaus-Diter Kh. Recycling of mineral wool – a well-thought-out tool that combines increased profits and environmental protection. *Bazal'tovye tekhnologii*. 2014. No. 1, pp. 65–72. (In Russian).
2. Grass K., Bartashov V., Sucker J. Recycling of mineral wool waste. <https://www.ibe.at/wp-content/uploads/2021/03/Recycling-of-mineral-wool-waste-1.htm> (дата обращения 03.08.2022).
3. Зайцева Л.Р., Луцык Е.В., Латыпова Т.В., Латыпов В.М., Федоров П.А., Попов В.П. Влияние вида заполнителя из отходов производства на коррозионную стойкость бетона // *Строительные материалы*. 2021. № 11. С. 23–29. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-797-11-23-29>
3. Zaitseva L.R., Lutsyk E.V., Latypova T.V., Latypov V.M., Fedorov P.A., Popov V.P. Influence of the type of filler from production waste on the corrosion resistance of concrete. *Stroitel'nye Materialy [Construction Materials]*. 2021. No. 11, pp. 23–29. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-797-11-23-29>
4. Kubiliute R., Kaminskas R., Kazlauskaitė A. Mineral wool production waste as an additive for Portland cement. *Cement and Concrete Composites*. 2018. Vol. 88. pp. 130–138. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.02.003>
5. Nagrockiene D. The effect of waste from mineral wool manufacturing on the properties of concrete. *Ceramics – Silikatų*. 2021, pp. 1–8. DOI: <https://doi.org/10.13168/cs.2021.0013>
6. Stonys R., Kuznetsov D., Krasnikovs A., Skamat J., Baltakys K., Antonovic V., Cernasejus O. Reuse of ultrafine mineral wool production waste in the manufacture of refractory concrete. *Journal of Environmental Management*. 2016. Vol. 176, pp. 149–156. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.03.045>
7. Абдрахимов В.З. Использование отходов минеральной ваты в производстве керамических стеновых материалов // *Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура*. 2019. Т. 10. № 3. С. 53–60. DOI: <https://doi.org/10.15593/2224-9826/2019.3.06>
7. Abdrakhimov V.Z. The use of waste mineral wool in the production of ceramic wall materials. *Vestnik of PNRPU. Construction and Architecture*. 2019.

- Vol. 10. No. 3, pp. 53–60. DOI: 10.15593/2224-9826/2019.3.06
8. Саламанова М.Ш., Муртазаев С.-А.Ю. Цементы щелочной активации: возможность снижения энергоемкости получения строительных композитов // *Строительные материалы*. 2019. № 7. С. 32–40. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-772-7-32-40>
 8. Salamanova M.Sh., Murtazaev S.-A.Yu. Cements of alkaline activation the possibility of reducing the energy intensity of building composites. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2019. No. 7, pp. 32–40. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-772-7-32-40>
 9. Fedorov P, Sinitsin D. Alkali-activated binder based on cupola dust of mineral wool production with mechanical activation. *Buildings*. 2022. No. 12 (10). 1565. <https://doi.org/10.3390/buildings12101565>
 10. Ерофеев В.Т., Родин А.И., Якунин В.В., Богатов А.Д., Бочкин В.С., Чегодайкин А.М. Шлакощелочные вяжущие из отходов производства минеральной ваты // *Инженерно-строительный журнал*. 2018. № 6 (82). С. 219–227. DOI: <https://doi.org/10.18720/MCE.82.20>
 10. Erofeev V.T., Rodin A.I., Yakunin V.V., Bogatov A.D., Bochkin V.S., Chegodaykin A.M. Alkali-activated slag binders from rock-wool production wastes. *Magazine of Civil Engineering*. 2018. No. 6 (82), pp. 219–227. DOI: 10.18720/MCE.82.20
 11. Kinnunen P., Yliniemi J., Talling B., Illikainen M. Rockwool waste in fly ash geopolymers composites. *Journal of Material Cycles and Waste Management*. 2017. Vol. 19. No. 3, pp. 1220–1227. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10163-016-0514-z>
 12. Liu G., Florea M.V.A., Brouwers H.J.H. Waste glass as binder in alkali activated slag–fly ash mortars. *Materials and Structures*. 2019. Vol. 52. No. 5. 101. DOI: <https://doi.org/10.1617/s11527-019-1404-3>
 13. Dong M., Elchalakani M., Karrech A., Pham T.M., Yang B. Glass fibre-reinforced polymer circular alkali-activated fly ash/slag concrete members under combined loading. *Engineering Structures*. 2019. Vol. 199. 109598. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.109598>
 14. Глуховский В.Д., Пахомов В.А. Шлакощелочные цементы и бетоны. Киев: Будівельник, 1978. 184 с.
 14. Glukhovskiy V.D., Pakhomov V.A. Shlakoshchelochnyye tsementy i betony [Slag-alkaline cements and concretes]. Kyiv: Budivel'nik. 1978. 184 p.
 15. Chen X., Zhang Y., Hui D., Chen M., Wu Z. Study of melting properties of basalt based on their mineral components. *Composites Part B: Engineering*. 2017. Vol. 116, pp. 53–60. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.02.014>
 16. Петровская А.А., Каптюшина А.Г. Исследование свойств шлакощелочных вяжущих и бетонов на их основе // *Строительные материалы*. 2021. № 10. С. 21–24. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-796-10-21-24>
 16. Petrovskaya A.A., Kaptyushina A.G. Research in the properties of slag-alkaline binders and concretes based on them. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2021. No. 10, pp. 21–24. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-796-10-21-24>
 17. Davidovits J. Geopolymer chemistry and applications. Saint-Quentin, France: Institute Geopolymer. 2011. 614 p.

СПЕЦИАЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

Информационное моделирование и искусственный интеллект в современном строительстве и жилищно-коммунальном хозяйстве



Авторы: В.Л. Курбатов, В.И. Римшин, И.Л. Шубин, С.В. Волкова.

Под общ. ред. членов-корреспондентов Российской академии архитектуры и строительных наук, заслуженных строителей Российской Федерации И.Л. Шубина, В.И. Римшина

Издательство АСВ. Москва. 2023. 420 с.

Изложены принципы информационного моделирования в строительстве. Освещены современные технологии информационного моделирования, описана уже действующая и дополнительно необходимая нормативная правовая база, определяющая порядок разработки и применения информационной модели на территории Российской Федерации. Рассмотрены основные этапы и состав мероприятий при разработке проектной документации с применением информационного моделирования.

Предназначено для бакалавров, магистров и преподавателей вузов, обучающихся по Федеральному государственному образовательному стандарту высшего профессионального образования, а также для работников предприятий строительства и жилищно-коммунального комплекса.

Рекомендовано Российской академией архитектуры и строительных наук в качестве учебного пособия для студентов образовательных организаций высшего образования, обучающихся по направлениям подготовки 08.03.01 «Строительство» (уровень бакалавриата) и 08.04.01 «Строительство» (магистратуры).

УДК 666.29

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-818-10-85-90>

А.П. ПУСТОВГАР^{1,2}, канд. техн. наук (PustovgarAP@mgsu.ru);
 А.Ю. АБРАМОВА¹, магистр, заведующая лабораторией (AbramovaAYU@mgsu.ru),
 Н.П. АНДРЕЕВА¹, канд. хим. наук (AndreevaNP@mgsu.ru)

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

² Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук (101000, г. Москва, Малый Харитоньевский пер., 4)

Исследование эффективности применения и долговечности золь-силикатных фасадных красок

Приведено сравнение свойств фасадных лакокрасочных покрытий, применяемых в настоящее время при строительных и ремонтных работах. Особое внимание уделено силикатным лакокрасочным материалам, которые являются на сегодняшний день наиболее перспективными за счет того, что их покрытия обладают высокой паропроницаемостью и возможностью отвода излишней влажности из минеральной подложки, определяя тем самым такие эксплуатационные свойства фасадных материалов, как пониженная загрязняемость, влаго- и водостойкость, химстойкость, биостойкость и др. Применение в качестве связующего смеси жидкого стекла и кизельзоля придает золь-силикатным краскам дополнительно высокие функциональные свойства, связанные с эластичностью и трещиностойкостью. В работе приведены результаты исследования стойкости покрытий золь-силикатных лакокрасочных материалов к воздействию климатических факторов в лабораторных условиях по методике, разработанной на основе длительных наблюдений процессов старения лакокрасочных покрытий в различных климатических зонах в естественных условиях и отработки режимов лабораторных испытаний с учетом процессов деструкции лакокрасочных покрытий при комплексном воздействии климатических факторов. Проведена оценка сохраняемости защитных, декоративных и адгезионных свойств покрытий золь-силикатных красок различных цветов в процессе испытаний. Определен предполагаемый срок службы исследованных покрытий в рассмотренных климатических условиях.

Ключевые слова: золь-силикатные краски, лакокрасочные материалы, фасады, кизельзоль, жидкое стекло.

Для цитирования: Пустовгар А.П., Абрамова А.Ю., Андреева Н.П. Исследование эффективности применения и долговечности золь-силикатных фасадных красок // *Строительные материалы*. 2023. № 10. С. 85–90.
 DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-818-10-85-90>

A.P. PUSTOVGAR^{1,2}, Candidate of Sciences (Engineering) (PustovgarAP@mgsu.ru);

A.Y. ABRAMOVA¹, Master, Head of laboratory (AbramovaAYU@mgsu.ru), N.P. ANDREEVA¹, Candidate of Sciences (Chemistry) (AndreevaNP@mgsu.ru)

¹ National Research Moscow State University of Civil Engineering (26, Yaroslavskoe Highway, Moscow, 129337, Russian Federation)

² Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences (IMASH RAN) (4, Maly Kharitonyevskiy Lane, 101990, Moscow, Russian Federation)

Research of the Effectiveness and Durability of Sol-Silicate Facade Paints

The article provides a comparison of the properties of facade paint and varnish coatings currently used in construction and repair works. Particular attention is paid to silicate paints and varnishes, which are the most promising today according to the fact that their coatings have high vapor permeability and the ability to remove excess moisture from the mineral substrate, thereby determining such performance properties of facade paints and varnishes as reduced contamination, moisture and water resistance, chemical resistance, biostability, etc. The use of a mixture of liquid glass and diatomaceous earth as a binder gives sol-silicate paints additionally high functional properties associated with elasticity and crack resistance. The article presents the results of a study of the resistance of sol-silicate paint and varnish materials coatings to the effects of climatic factors in laboratory conditions using a method developed on the basis of long-term observations of the paint and varnish coatings aging processes in various climatic zones under natural conditions and development of laboratory test regimes taking into account the processes of destruction of paint and varnish coatings during complex impact of climatic factors. The retention of protective, decorative and adhesive properties of sol-silicate paint coatings of various colors was assessed during testing. The expected service life of the studied coatings in the considered climatic conditions was determined.

Keywords: sol-silicate paints, paint and varnish materials, facades, diatomaceous earth, liquid glass.

For citation: Pustovgar A.P., Abramova A.Y., Andreeva N.P. Research of the effectiveness and durability of sol-silicate facade paints. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2023. No. 10, pp. 85–90. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-818-10-85-90>

Мировой рынок силикатных покрытий, применяемых в строительной отрасли, занимает порядка 25% от общего объема используемых силикатных лакокрасочных материалов (далее – ЛКМ). Ожидается, что рынок строительных силикатных красок будет расти значительными темпами, в основном за счет роста жилищного строительства [1], поскольку данные покрытия являются стабильными и долговечными, с высокой цветостойкостью, разнообразной цветовой палитрой и соответствуют экологическим требованиям по ограничению выбросов летучих органических соединений.

Вместе с тем окраска фасадов зданий – процесс трудоемкий и затратный, особенно в случае проведения реставрационных работ, где после очистки зданий от существующего внешнего слоя и подготовки поверхности требуется нанести новое атмосферостойкое покрытие с высоким сроком службы, защищая стены от воздействия агрессивных факторов и сохраняя эстетичный внешний вид. Для этого требуются высокие адгезионные свойства покрытия к подложке; покрытие должно быть дышащим, т. е. обладать высокой паропроницаемостью, влагостойко-

стью, и отличаться повышенной стойкостью к воздействию солнечного излучения, перепада температуры и других внешних климатических и эксплуатационных факторов.

Требования к используемым в строительстве ЛКМ и их покрытиям регламентируются нормативными документами ГОСТ 33290–2015 «Материалы лакокрасочные, применяемые в строительстве. Общие технические условия», в которых указывается, что срок службы покрытия водно-дисперсионной краски для наружных работ должен быть не менее 10 лет.

При проведении фасадных работ очень популярны акриловые водно-дисперсионные краски. С одной стороны, такие материалы просты в нанесении и занимают среднюю ценовую нишу, с другой – их покрытие обладает недостаточной паропроницаемостью, что препятствует диффузии влаги из минерального основания, снижает защитные свойства и биостойкость покрытия и приводит к вспучиванию внешнего слоя, образованию плесени и грибов. Для фасадных материалов важным свойством является эластичность покрытия, которая у акриловых материалов связана с термопластичностью, что приводит к размягчению при повышении температуры окружающей среды и недостаточной стойкости к загрязнениям (рис. 1), снижает срок службы покрытия, который может составлять для этих материалов 5–10 лет при профессиональном окрашивании, а в реальности не более 5 лет.

Применение недорогих поливинилацетатных красок, обладающих недостаточной влагостойкостью, приводит к необходимости частого окрашивания поверхности и является не только ресурсоемким процессом, но и причиной новых финансовых затрат.

Покрытия бутадиев-стирольных красок обладают низкой стойкостью к ультрафиолетовому излуче-

нию, в связи с чем цвет фасада быстро выгорает и не соответствует начальным характеристикам.

При фасадных работах, особенно реставрационных, применяют известковые краски [2], но у них ограниченная цветовая палитра, в основном белые и пастельные тона; требуется высокое мастерство для соблюдения технологии нанесения и необходим демонтаж старого покрытия. Срок службы таких покрытий составляет 3–4 года.

Обзор силикатных красок

Дисперсионные силикатные краски на основе жидкого стекла, а также содержащие до 10% акриловой смолы, хорошо себя зарекомендовали при окрашивании фасадов зданий. Применение жидкого стекла в качестве связующего для производства лакокрасочных материалов основано на его способности при отверждении химическими реагентами (отвердителями-силикатизаторами) образовывать прочное водостойкое покрытие, обладающее необходимыми техническими свойствами (атмосферостойкостью, химической стойкостью). Эффективность применения жидкого стекла обусловлена также низкой стоимостью исходных материалов, их негорючестью, нетоксичностью, наличием реальной промышленной базы (большим объемом промышленного производства) [3–5]. Для изготовления силикатных красок в основном принято использовать жидкое стекло калия, которое придает покрытию атмосферостойкость, прочность и долговечность. Силикатные краски на основе жидкого стекла натрия – более дешевый вариант силикатной краски, но такие покрытия обладают более низкими эксплуатационными характеристиками и небольшой сопротивляемостью к воздействию атмосферных факторов (<http://lkmпром.ru/analitika/primenenie-lakokrasochnoy-produktsii-v-promyshlenn/>). Можно добавлять в основу при производстве такие составляющие, как жидкое стекло лития и цезия, но эти компоненты очень дорогие. При этом краска с такими составляющими будет иметь высшее качество. Соединение жидкого калийного стекла и этилсиликата, а также включение в состав кремния, цинка, алюминия и минеральных пигментов придают покрытию силикатных красок следующие характеристики:

- гидрофобность и паропроницаемость – способность противостоять негативному воздействию влаги за счет микропористости покрытия;
- светостойкость – устойчивость к влиянию солнечных лучей;
- морозостойкость – способность сохранять свои качества в условиях перепадов температуры;
- долговечность – сохраняемость свойств покрытия на протяжении длительного периода;
- стойкость к влажному истиранию – возможность удаления загрязнений с покрытия, не повреждая его и не изменяя цвета и свойства;
- биологическая стойкость – способность защищать поверхности от заселения жуков, плесени и грибка за счет антистатических свойств;



Рис. 1. Сравнение эксплуатационных свойств дисперсионных фасадных красок и золь-силикатных красок (<https://www.keim.com/ru-ru/produkcija/fasadnye-kraski/soldalit/>)

Fig. 1. The comparison of performance properties of dispersion facade and sol-silicate paints (<https://www.keim.com/ru-ru/produkcija/fasadnye-kraski/soldalit/>)

- негорючесть — отсутствие процесса горения в воздушной среде;
- удобство при эксплуатации — легкое очищение от пыли и смога.

Кроме того, покрытия силикатных красок отличаются хорошей адгезией ко всем типами минеральных строительных материалов, включая:

- бетон любого типа;
- цементную, известковую штукатурку;
- силикатный и керамический кирпич;
- асфальт (дорожная разметка).

Среди недостатков покрытий силикатных красок необходимо отметить недостаточную эластичность, что приводит к трещинообразованию и сокращает срок службы покрытия; кроме того, сложность демонтажа при ремонтных работах вносит ограничения на применение силикатных красок в строительной отрасли.

Силикатно-силиконовые краски — достаточно новый вид силикатных лакокрасочных материалов, который можно отнести к водно-дисперсионным, содержащим в составе силиконовую смолу, что способствует улучшению циркуляции воздуха, паропроницаемости с одновременным повышением водостойкости, защищающей от осадков. Подходят для окраски минеральных и некоторого ряда органических оснований и ранее окрашенных поверхностей. Кроме того, благодаря эластичным свойствам силиконовой смолы краска помогает скрыть мелкие дефекты основания (небольшие трещины, неровности) без каких-либо дополнительных усилий и повышает трещиностойкость покрытия. После высыхания слой силиконовой краски образует глубокоматовое покрытие с бархатистой на ощупь фактурой. По малярным свойствам материал имеет умеренно вязкую консистенцию, легко наносится любым инструментом, не образует потеков и пятен, но требует определенного мастерства при нанесении, чтобы получить однородное, без разводов покрытие.

Стоимость силикатно-силиконовых красок по сравнению с другими материалами выше, но этот недостаток компенсируется длительным сроком службы не менее 15 лет без необходимости в ремонте в течение срока эксплуатации.

Золь-силикатные краски относятся к еще более универсальным фасадным материалам, изготавливаемым на базе полисиликатных растворов из жидкого стекла, обычно калиевого, и кизельзоля. Такая комбинация вяжущих позволяет наносить силикатные краски не только на минеральные, но и непосредственно на многочисленные органические основания без использования дополнительных адгезионных мостов сцепления и предварительной очистки от ранее окрашенных слоев ЛКП, что является значительным удобством при проведении ремонтных работ.

Стоимость золь-силикатных красок высокая, поэтому застройщики редко применяют данные материалы, ссылаясь на экономическую составляющую при строительстве, но здесь не учитывается необходимость дальнейших расходов при ремонте фасадов минимум

через 5–7 лет в случае применения более дешевых материалов. Использование их в качестве финишного покрытия при отделке новых бетонных оснований в целом оправдывает себя долгосрочным сохранением внешнего вида и защиты фасадов. В составе золь-силикатных материалов отсутствуют растворители и нефтяные фракции, следовательно, они относятся к нетоксичным, экологически чистым материалам.

Среди хорошо известных золь-силикатных красок можно выделить Histolith Sol-Silikat (Германия), краска KEIM Soldalit (Германия) (<https://www.alligator.spb.ru/catalog/materialy-tm-kayman/zol-silikatnaya-kraska-tm-kayman/>; <https://www.caparol.ru/produkty/materialy-dlja-restavracii-pamjatnikov-arkhitektury/histolith/histolith-silikatnaja-programma/histolithsol-silikat>). Российские производители разработали альтернативы зарубежным золь-силикатным краскам. Хорошим примером может служить краска «Прочнинь» (<https://fridlender.ru/products/solsilicate/zol-silikatnaya-kraska-prochnin/>).

Исследования золь-силикатных красок, приведенные в работах [6–10], показали преимущества изученных и разработанных составов и их стойкость при перепадах температуры, ориентировочно 40 циклов замораживания-оттаивания. Необходимо отметить, что испытание по оценке стойкости фасадного покрытия при переходе температуры через нулевую отметку [7] является важным фактором при эксплуатации в условиях умеренно холодного климата, но не воспроизводит процессы деструкции покрытия в атмосферных условиях и не дает возможности прогнозирования его сроков службы.

Требования к долговечности фасадных покрытий определяются месторасположением зданий и сооружений. Для городских условий такого мегаполиса, как Москва, межремонтный срок для фасадов зданий установлен в 10 лет, но для зданий, расположенных в центре города или на основных магистралях, межремонтный срок составляет 5 лет (норматив города Москвы «Содержание и ремонт фасадов зданий и сооружений» ЖНМ–2007/03. Приложение к постановлению Правительства Москвы от 31 июля 2007 г. № 651-ПП. <https://www.mos.ru/authority/documents/doc/14592220/>). Тем не менее деструкция фасадных покрытий зачастую начинается уже через год после проведения ремонтных работ, что связано с разными факторами. Первое — это неправильный подбор материалов; второе — нарушение технологии и условий нанесения ЛКМ, в том числе отсутствие предварительной подготовки поверхности. Однако даже полное соблюдение технологии не всегда гарантирует заявленную долговечность покрытия, так как при прогнозировании сроков службы не все эксплуатационные факторы могут быть учтены, например повышенная загрязненность атмосферы — пыль, SO₂, хлориды, повышенная влажность или другие факторы [11]. Внеплановые ремонтные работы кроме расходов на материалы и трудозатраты являются дополнительной проблемой загрязнения окружающей среды.

В то же время определение сроков службы лакокрасочного покрытия является важной составляющей при оценке возможности применения покрытия в соответствующих условиях эксплуатации и климатического воздействия.

Материалы и методы исследования

В работе проведены исследования стойкости фасадных лакокрасочных материалов по методике оценки изменения свойств покрытий в процессе комплексного воздействия климатических факторов с учетом планируемых климатических условий эксплуатации в лабораторных условиях по ГОСТ 9.401–2018 «Единая система защиты от коррозии и старения. Покрытия лакокрасочные. Общие требования и методы ускоренных испытаний на стойкость к воздействию климатических факторов».

Для предварительной оценки стойкости фасадных покрытий могут применяться испытания по оценке морозостойкости покрытия или его светостойкости. Наиболее достоверными испытаниями при определении сроков службы лакокрасочных покрытий (далее – ЛКП) и при исследовании процессов старения являются испытания в естественных условиях в соответствии с ГОСТ 6992–68 «Единая система защиты от коррозии и старения. Покрытия лакокрасочные. Метод испытаний на стойкость в атмосферных условиях» в климатических зонах, соответствующих планируемым условиям эксплуатации. Но исследования в натуральных условиях являются длительными. В основном натурные испытания продолжительностью 3–5 лет используются для понимания начальных процессов старения материалов в соответствующих естественных условиях и/или сравнения стойкости материалов к разрушению при синергетическом воздействии климатических факторов в естественных условиях.

Применение лабораторных методов ускоренного климатического воздействия позволяет сократить продолжительность исследования и определить предполагаемый срок службы ЛКП в условиях, имитирующих заданные климатические условия. Испытания лакокрасочных покрытий в соответствии с ГОСТ 9.401–2018 дают возможность оценить стойкость защитных и декоративных свойств покрытия в соответствии с условиями эксплуатации и рассчитать предварительную долговечность покрытия.

В лабораторных условиях ИЦ НИИ СМиТ НИУ МГСУ проведены ускоренные климатические испытания покрытий золь-силикатных красок различных цветов.

Образцы лакокрасочных материалов были нанесены на минеральную подложку из бетона, применяемого для возведения современных зданий. Образцы бетона предварительно покрывались рекомендованным производителем золь-силикатным грунтом и затем окрашивались золь-силикатными красками (ТУ 20.59.59-064-05751640–2018) следующих цветов:

- RAL 9016 (транспортный белый);

- RAL 030 60 20 (красная пустыня);
- FR BK 02 000 (черный).

Перед нанесением покрытия бетонные пластины 70×150×25 мм выдерживали в течение 28 сут после их изготовления до набора марочной прочности 30 МПа, поверхностная влажность пластин не превышала 8%. Непосредственно перед нанесением лакокрасочных покрытий поверхности бетонных пластин очищались от пыли, грязи, следов опалубочной смазки и прочих отделяющихся веществ. На предварительно загрунтованную поверхность бетонных образцов наносили два слоя краски с помощью валика, межслойная сушка составляла 2 ч. Толщина высушенного покрытия, измеренная с помощью ультразвукового толщиномера PosiTector 200 (модификация PosiTector 200 Advanced), составляла 170±20 мкм.

Стойкость золь-силикатного фасадного покрытия к воздействию климатических факторов определяли в лабораторных условиях с помощью климатических камер, имитирующих атмосферное воздействие умеренно холодного климата открытой атмосферы (УХЛ1), условно чистой атмосферы (метод 3 ГОСТ 9.401–2018). Циклическое воздействие климатических факторов включало воздействие солнечного излучения, повышенной влажности и температуры, а также пониженной температуры и ее переходы через нулевую отметку.

Оценка изменения стойкости декоративных и защитных свойств покрытий в процессе испытаний проводилась по ГОСТ 9.407–2015 «Единая система защиты от коррозии и старения. Покрытия лакокрасочные. Метод оценки внешнего вида». Адгезия покрытия к подложке определялась методом решетчатого надреза по ГОСТ 31149–2014 (ISO 2409:2013) «Материалы лакокрасочные. Определение адгезии методом решетчатого надреза».

Изменение цвета регулярно оценивалось при помощи спектрофотометрических измерений в соответствии с ГОСТ Р 52490–2005 (ИСО 7724-3:1984) «Материалы лакокрасочные. Колориметрия. Часть 3. Расчет цветовых различий», с использованием спектроколориметра SP62, X-Rite Inc.

С помощью фотоэлектрического блескомера REFO-3 (Dr. Bruno Lange GmbH & Co. KG) проводили контроль изменения блеска покрытий по ГОСТ 31975–2017 (ISO 2813:2014) «Материалы лакокрасочные. Метод определения блеска лакокрасочных покрытий под углом 20; 60 и 85°».

Перед испытаниями образцы с покрытием выдерживали в течение 7 сут в нормальных условиях и далее проводили испытания в климатической камере тепла–холода–влажности–ультрафиолета SC 600 MHG 56615033 (Vötsch Industrietechnik GmbH & ATLAS Material Testing Solution) по следующему режиму:

- 2 ч в камере влаги при температуре 40±2°C и относительной влажности воздуха (97±3)%;
- 2 ч в камере влаги при выключенном обогреве;
- 6 ч в камере холода при температуре минус 30±3°C;

- 5 ч в испытательной камере солнечной радиации (аппарате искусственной светопогоды), работающей по режиму 3–17 (температура в камере 60°C; орошение дистиллированной водой в течение 3 мин каждые 17 мин; интегральная поверхностная плотность потока излучения – 1120 ± 140 Вт/м² при поверхностной плотности потока излучения в ультрафиолетовой области спектра от 290 до 400 нм – 35 ± 5 Вт/м²;
- 3 ч в камере холода при температуре минус 60 ± 3 °C;
- 6 ч на воздухе при температуре $21,5 \pm 0,5$ °C и относительной влажности воздуха 55 ± 5 %.

Результаты

На протяжении всего периода лабораторных климатических испытаний (160 циклов) для всех испытанных покрытий изменений защитных свойств (растрескивание, образование пузырей, отслаивание и т. д.) не наблюдалось.

В число оцениваемых декоративных свойств были включены: оценка изменения блеска матового покрытия (угол измерения 85°); определение цветового различия (ΔE); меление покрытия и грязеудержание. Оценивались результаты испытаний после 89, 134 и 160 циклов.

Для исследуемых ЛКП на протяжении всего периода испытаний наблюдалось отсутствие грязеудержания и присутствовало незначительное меление, не усиливающееся на протяжении всего периода климатического воздействия.

Блеск матового покрытия практически для всех образцов оставался без изменений, т. е. процесс деградации пленки связующего не наблюдался.

Степень изменения цветовых характеристик определялась цветом покрытия (рис. 2). В большей степени изменение цвета наблюдается на черных образцах; цветовое различие составляло 3,8 усл. ед., что характеризуется как умеренные изменения в соответствии с ГОСТ 9.407–2015.

Определение адгезионных свойств покрытий и оценка их изменений в период испытаний и после 160 циклов показало, что межслойная адгезия испытанных покрытий и их адгезия к бетонной подложке составила не более 1 балла.

Результаты сканирующей электронной микроскопии (прибор FEI Quanta 200) показали отсутствие признаков разрушения на поверхности покрытия (микротрещин) после ускоренных климатических испытаний в течение 160 циклов.

В соответствии с полученными результатами и на основании расчетов предполагаемого срока службы по ГОСТ 9.401–2018 можно прогнозировать долговечность испытанного фасадного золь-силикатного покрытия в условиях умеренно холодного климата (тип атмосферы I) не менее 16 лет, без необходимости проведения демонтажа и ремонтных/реставрационных работ, с учетом соблюдения технологии нанесения.

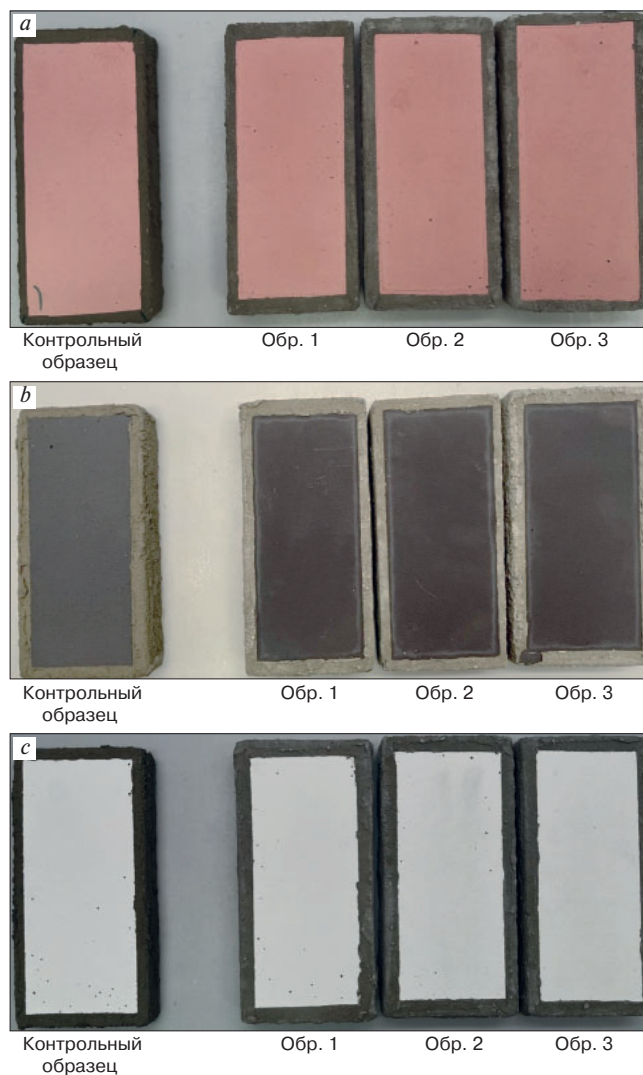


Рис. 2. Внешний вид образцов золь-силикатной краски после ускоренных климатических испытаний (160 циклов): а – RAL 030 60 20; б – FR BK 02 000; с – RAL 9016

Fig. 2. Samples of Sol-silicate paint after accelerated climatic tests (160 cycles): a – RAL 030 60 20; b – FR BK 02 000; c – RAL 9016

Выводы

Современная экономика заставляет учитывать расходы, связанные с трудозатратами при проведении ремонтных и реставрационных работ, а также экологические требования к снижению загрязняющих веществ при использовании строительных материалов, в том числе лакокрасочных, не содержащих растворители или другие летучие органические соединения, но в то же время долговечных. Результаты испытаний подтверждают, что золь-силикатные краски являются универсальными материалами, отвечающими современным требованиям. Применение данных достаточно дорогостоящих материалов при соблюдении технологии и условий нанесения компенсирует понесенные затраты за счет долговечности.

Применение золь-силикатных красок позволяет сохранить внешний вид фасадов зданий продолжительное время без необходимости проводить реставрационные работы.

Список литературы

1. Обзор рынка силикатных покрытий. Рост, тенденции, влияние COVID-19 и прогнозы (2023–2028 гг.). Mordor Intelligence. India. <https://www.mordorintelligence.com/ru/industry-reports/silicate-coatings-market> (дата обращения 27.07.2023).
2. Валетова В.В. Актуальность использования традиционных художественных материалов в монументальной живописи. *Актуальные проблемы монументального искусства: Сборник научных трудов*. СПб., 2020. С. 218–223.
3. Аскадский А.А., Афанасьев Е.С., Петунова М.Д., Мацевич Т.А., Сафонова Е.С., Пустовгар А.П., Бруяко М.Г. Органоминеральные композитные материалы на основе натриевого жидкого стекла, 2,4-толуилендиизоцианата, эпоксидного олигомера и полиизоцианата // *Доклады Академии наук*. 2018. Т. 481. № 1. С. 47–52. DOI: 10.31857/S086956520000050-8
4. Пустовгар А.П., Бруяко М.Г., Петунова М.Д., Афанасьев Е.С., Езерницкая М.Г., Старожицкий М.В., Пиминова К.С., Мацевич Т.А., Аскадский А.А. Гибридные материалы на основе Na-жидкого стекла, 2,4-толуилендиизоцианата, эпоксидного олигомера и полиизоцианата // *Высокомолекулярные соединения. Сер. А*. 2018. Т. 60. № 6. С. 495–512. DOI: 10.1134/S230811201806007X
5. Бруяко М.Г., Пустовгар А.П., Сафонова Е.С., Петунова М.Д., Афанасьев Е.С., Коврига О.В., Аскадский А.А. Органоминеральные композитные материалы на основе жидкого стекла, полиизоцианурата и эпоксидного олигомера // *Пластические массы*. 2017. № 9–10. С. 3–7.
6. Пислегина А.В., Яковлев Г.И., Пустовгар А.П., Мостафа К. Модифицированное фасадное покрытие на основе жидкого стекла. Сборник трудов II Международной конференции «Нанотехнологии для экологичного и долговечного строительства»: Египет, Каир. 14–17 марта 2010. С. 39–45.
7. Логанина В.И., Мажитов Е.Б., Лашина И.В. Оценка эксплуатационных свойств покрытий на основе золь-силикатной краски. // *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова*. 2018. № 12. С. 6–11. DOI: 10.12737/article_5c1c994bc1ecd0.55450446
8. Логанина В.И., Мажитов Е.Б. Оценка стойкости покрытий на основе золь-силикатной краски // *Региональная архитектура и строительство*. 2020. № 2. С. 33–40.
9. Логанина В.И., Кислицына С.Н., Мажитов Е.Б. Длительная прочность покрытий на основе золь-силикатной краски // *Вестник МГСУ*. 2018. Т. 13. Вып. 7 (118). С. 877–884. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.7.877-884
10. Alonso-Villar E.M., Rivas T., Pozo-Antonio J.S. Sol-silicate versus organic paints: durability after outdoor and ultraviolet radiation exposures. *Progress in Organic Coatings*. 2022. Vol. 168. 106843. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2022.106843>
11. Кавер Н.С. Экологическая оценка и повышение надежности лакокрасочных покрытий фасадов в го-

родских условиях (на примере г. Москвы): Дис. ... канд. техн. наук. М., 2004. 192 с.

References

1. Overview silicate coatings market. Growth, trends, impact of COVID-19 and forecast (2023–2028). <https://www.mordorintelligence.com/ru/industry-reports/silicate-coatings-market> (Date of access: 23.07.2023). (In Russian).
2. Valetova V.V. The relevance of the use of traditional artistic materials in monumental painting. *Actual problems of monumental art: collection of scientific papers*. St. Petersburg. 2020, pp. 218–223. (In Russian).
3. Askadskii A.A., Afanasyev E.S., Petunova M.D., Matseevich T.A., Safonova E.S., Pustovgar A.P., Bruyako M.G. Organomineral composite materials based on Na-liquid glass, 2,4-toluene diisocyanate, epoxy oligomer and polyisocyanate. *Doklady of the Academy of Sciences*. 2018. Vol. 481. No. 1, pp. 47–52. DOI: 10.31857/S086956520000050-8 (In Russian).
4. Pustovgar A.P., Bruyako M.G., Petunova M.D., Afanasyev E.S., Ezernitskaya M.G., Starozhitsky M.V., Piminova K.S., Matseevich T.A., Askadskii A.A. Hybrid materials based on Na-liquid glass, 2,4-toluene diisocyanate, epoxy oligomer and polyisocyanate. *Vysokomolekulyarnye soedineniya. Seriya A*. 2018. Vol. 60. No. 6, pp. 495–512. (In Russian). DOI: 10.1134/S230811201806007X
5. Bruyako M.G., Pustovgar A.P., Safonova E.S., Petunova M.D., Afanasyev E.S., Kovriga O.V., Askadskii A.A. Organomineral composite materials based on liquid glass, polyisocyanurate and epoxy oligomer. *Plasticheskie massy*. 2017. No. 9–10, pp. 3–7. (In Russian).
6. Pislegina A.V., Yakovlev G.I., Pustovgar A.P., Mostafa K. Modified facade coating based on liquid glass. Proceedings of the II International Conference “Nanotechnology for environmentally friendly and durable construction”. Cairo, Egypt. 2010, pp. 39–45. (In Russian).
7. Loganina V.I., Mazhitov E.B., Lashina I.V. Evaluation of operational properties of coatings based on sol silicate paint. *Vestnik of the Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov*. 2018. No. 12, pp. 6–11. (In Russian). DOI: 10.12737/article_5c1c994bc1ecd0.55450446
8. Loganina V.I., Mazhitov E.B. Assessment of the durability of coatings based on sol-silicate paint. *Regional'naya arkhitektura i stroitel'stvo*. 2020. No. 2, pp. 33–40. (In Russian).
9. Loganina V.I., Kislytsyna S.N., Mazhitov E.B. Long-term strength of coatings based on sol-silicate paint. *Vestnik of MUCE*. 2018. Vol. 13. Iss. 7 (118), pp. 877–884. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.7.877-884 (In Russian).
10. Alonso-Villar E.M., Rivas T., Pozo-Antonio J.S. Sol-silicate versus organic paints: durability after outdoor and ultraviolet radiation exposures. *Progress in Organic Coatings*. 2022. Vol. 168. 106843. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2022.106843>
11. Cover N.S. Ecological assessment and improvement of reliability of paint and varnish coatings of facades in urban conditions (on the example of Moscow). Cand. Diss. (Engineering). Moscow. 2004. 192 p. (In Russian).

УДК 630*842.3

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-818-10-91-98>И.В. СТЕПИНА, канд. техн. наук (sudeykina@mail.ru),
Ю.Г. ЖЕГЛОВА, канд. техн. наук (uliagermanovna@yandex.ru)

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (129337, Москва, Ярославское ш., 26)

Влияние температуры на степень модифицирования древесины кремнийорганическими соединениями

Поиск оптимальных параметров модифицирования древесных материалов кремнийорганическими соединениями является весьма актуальной задачей. В работе авторы исследовали влияние температуры на эффективность этого процесса путем определения процентного содержания кремния в составе подложки после модифицирования нативной и фосфорилированной древесины различными классами кремнийорганических соединений и установления соответствующих зависимостей. В качестве модификаторов исследовали 10%-е растворы кремнийорганических соединений (КОС): полиэтилгидридсилоксан (ПЭГС), тетраэтоксисилан (ТЭС), полиметилсиликонат натрия (ПМСН). В качестве подложки использовали опилки заболони сосны и фосфорилированные опилки заболони сосны. В результате проведенного однофакторного дисперсионного анализа было установлено влияние температуры обработки КОС на содержание кремния в древесине в мас. % при фиксированном времени модифицирования. Из трех изученных кремнийорганических модификаторов поверхности только ПЭГС обнаруживает устойчивую взаимосвязь между температурой модифицирования нативной и фосфорилированной древесины и степенью модифицирования подложки, выраженной в процентном содержании кремния в составе древесного композита после длительной экстракции. ТЭС, по всей видимости, не вступает в химическое взаимодействие ни с нативной ни с фосфорилированной древесиной в связи с отсутствием в его составе функциональных групп (температура в этом случае влияния не оказывает). При использовании в качестве модификатора нативной и фосфорилированной древесины ПМСН не удалось установить взаимосвязь между температурой модифицирования и содержанием кремния в модифицированной подложке.

Ключевые слова: древесина, фосфорорганические соединения, кремнийорганические соединения, степень модифицирования, дисперсионный анализ.

Для цитирования: Степина И.В., Жеглова Ю.Г. Влияние температуры на степень модифицирования древесины кремнийорганическими соединениями // *Строительные материалы*. 2023. № 10. С. 91–98. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-818-10-91-98>

I.V. STEPINA, Candidate of Sciences (Engineering) (sudeykina@mail.ru);

Yu.G. ZHEGLOVA, Candidate of Sciences (Engineering) (uliagermanovna@yandex.ru)

National Research Moscow State University of Civil Engineering (26, Yaroslavl Highway, Moscow, 129337, Russian Federation)

Influence of Temperature on the Degree of Modification of Wood with Organosilicon Compounds

The search for optimal parameters for modifying wood materials with organosilicon compounds is a very urgent task. In the work, the authors investigated the effect of temperature on the efficiency of this process by determining the percentage of silicon in the substrate after modifying native and phosphorylated wood with various classes of organosilicon compounds and establishing the corresponding dependencies. 10% solutions of organosilicon compounds (CBS) were studied as modifiers: polyethylhydridsiloxane (PEGS), tetraethoxysilane (TES), sodium polymethylsilicate (PMSN). Sawdust of sapwood pine and phosphorylated sawdust of sapwood pine were used as a substrate. As a result of the conducted one-factor analysis of variance, the influence of the CBS treatment temperature on the silicon content in wood in wt. % at a fixed modification time. Of the three studied organosilicon surface modifiers, only PEGS shows a stable relationship between the temperature of modification of native and phosphorylated wood and the degree of modification of the substrate, expressed as the percentage of silicon in the wood composite after long-term extraction. TES apparently does not enter into a chemical interaction with either native or phosphorylated wood due to the absence of functional groups in its composition (temperature in this case has no effect). When using native and phosphorylated PMSN wood as a modifier, it was not possible to establish a relationship between the modification temperature and the silicon content in the modified substrate.

Keywords: wood, organophosphorus compounds, organosilicon compounds, degree of modification, analysis of variance.

For citation: Stepina I.V., Zhiglova Yu.G. Influence of temperature on the degree of modification of wood with organosilicon compounds. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2023. No. 10, pp. 91–98. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-818-10-91-98>

Кремнийорганические соединения (КОС) при нанесении на поверхность древесины обеспечивают гидрофобность подложки [1, 2]. Некоторые кремнийорганические соединения доказали свою эффективность в стабилизации размеров обводненной древесины и могут служить потенциальными многоцелевыми средствами консервации [3]. Чтобы оценить, могут ли эти химические вещества также придать устойчивость к гниению и нитевидным грибам, в работе [4] деградировавшую древесину шотландской сосны пропитали тремя различными кремнийорганическими соединениями: метилтриметоксисилан – MTMS, (3-меркаптопропил) триметоксисилан – МРТМС и Бис(диэтиламино)-3-пропоксипропанол)-1,1,3,3-тетраметилдисилоксан – DEAPTMS. После чего были измерены влажность и долговечность обработанной древесины. Все три органосилоксана снижали гигроскопичность обработанной сосны и обеспечивали различную степень защиты от грибков бурой и белой гнили. Однако только DEAPTMS полностью подавил рост нитевидных грибов после четырех недель инкубации. Результаты

ническими соединениями: метилтриметоксисилан – MTMS, (3-меркаптопропил) триметоксисилан – МРТМС и Бис(диэтиламино)-3-пропоксипропанол)-1,1,3,3-тетраметилдисилоксан – DEAPTMS. После чего были измерены влажность и долговечность обработанной древесины. Все три органосилоксана снижали гигроскопичность обработанной сосны и обеспечивали различную степень защиты от грибков бурой и белой гнили. Однако только DEAPTMS полностью подавил рост нитевидных грибов после четырех недель инкубации. Результаты

показывают, что протестированные органосилоканы являются подходящими многоцелевыми средствами для консервации деградировавших деревянных объектов, таких как обводненная археологическая древесина, поскольку они могут как укреплять, так и защищать деградировавшую древесину от дальнейшей биодеструкции.

В работе [5] было изучено влияние льняного масла, модифицированного кремнийорганическими соединениями, на полезные свойства древесины. Силилирование льняного масла кремнийорганическим соединением, содержащим винильную группу (винилтриметоксисилан), позволило синтезировать продукты, характеризующиеся высокой стабильностью при хранении. Пропитка древесины полученными продуктами способствовала повышению устойчивости защищенной древесины к воздействию воды по сравнению с незащищенной древесиной или древесиной, защищенной полимеризованным маслом, которая не подвергалась реакции силилирования. Обработанная древесина характеризовалась более низкой скоростью поглощения воды как в жидкой, так и в парообразной форме, содержащейся во влажном воздухе. Это свойство сразу же привело к увеличению устойчивости древесины, подверженной воздействию базидиомицота. Потеря массы древесины сосны (*Pinus sylvestris* L.), подвергшейся воздействию кониофоры колодезной (*Coniophora puteana*), составила приблизительно 3%. Этот параметр не улучшился, когда древесина была подвергнута процессу промывки (потеря массы около 3,6%). Таким образом, полученные продукты демонстрируют наибольший потенциал для использования в приготовлении средств защиты древесины.

Авторами [6] изучен механизм реакции и воздействия этилортосиликата и метилтриэтоксисилана на разрушающиеся компоненты древесины, отобранные из деревни Шуйюй исторического племени в Пекине. Результаты показали, что кремнийорганический слой был создан на стенках клеток древесины в результате реакции конденсации, в которой между алкоксигруппами образовались связи Si—O—Si, а между целлюлозными волокнами и кремнийорганическими соединениями — связи Si—O—C. Кремнийорганический слой способствовал дальнейшему улучшению физико-механических характеристик, таких как гидрофобность, механические свойства, термическая стабильность обработанных деревянных компонентов, за исключением небольшого отклонения цвета. В целом матрица из этилортосиликата и метилтриэтоксисилана является надежным агентом для удержания разложившейся части деревянных компонентов, что позволило достичь удовлетворительного улучшения характеристик.

В статье [7] представлены характеристики композитов дерево/полипропилен, в которых древесина была обработана экстрактом прополиса (ЕЕР) и инновационными прополисно-силановыми составами. Особый интерес к прополису для пропитки древеси-

ны обусловлен его антимикробными свойствами. Один прополисно-силановый состав (ЕЕР-ТЕОС/VTMOS) состоял из ЕЕР, тетраэтилортосиликата (ТЕОС) и винилтриметоксисилана (VTMOS), а другой (ЕЕР-ТЕОС/ОТЕОС) содержал ЕЕР, тетраэтилортосиликат (ТЕОС) и октилтриэтоксисилан (ОТЕОС). Древесные наполнители были охарактеризованы с помощью инфракрасной спектроскопии с преобразованием Фурье, атомной абсорбционной спектроскопии и рентгеновской дифракции, а композиты исследованы с помощью дифференциальной сканирующей калориметрии, рентгеновской дифракции и оптической микроскопии. Древесина, обработанная ЭЭП и прополисно-силановыми составами, показала устойчивость к плесени, включая *Aspergillus niger*, *Chaetomium globosum* и *Trichoderma viride*. Химические анализы подтвердили присутствие силанов и компонентов прополиса в структуре древесины. Кроме того, обработка древесины прополисно-силановыми составами вызвала значительные изменения в способности древесины к нуклеации в полипропиленовой матрице, что подтверждается увеличением температуры кристаллизации и конверсии кристаллов, а также уменьшением времени полураспада параметров кристаллизации по сравнению с необработанной полимерной матрицей. Во всех композитах наблюдалось образование транскристаллического слоя, причем наибольшая скорость была зарегистрирована для композита с наполнителем, обработанным ЕЕР-ТЕОС/ОТЕОС. Кроме того, пропитка древесины прополисно-силановыми составами привела к значительному улучшению прочностных характеристик полученных композитов. Была обнаружена зависимость между изменениями в полиморфных структурах полипропиленовой матрицы и прочностными свойствами композиционных материалов.

Крупным молекулам КОС трудно прочно закрепиться на поверхности древесины, поскольку они обладают низкой реакционной способностью. Для решения этой проблемы используют разные подходы. Например, осуществляют предварительную обработку поверхности подложки другими, более реакционноспособными соединениями — фосфорорганическими, которые способны выполнять роль проводника КОС в структуру древесины [8, 9]. Или используют повышение температуры для увеличения степени модифицирования. Так, в работе [10] заболонь черной сосны была термически модифицирована при 180 и 200°C (3, 5 и 7 ч), после чего проводилась дополнительная химическая обработка кремнийсодержащими системами (N-2-аминоэтил-3-аминопропилтриметоксисилан) в попытке повысить гидрофобность и долговечность древесины. Результаты показали высокую реакционную способность между термически модифицированной древесиной и кремнийорганическими соединениями. Присутствие полос, представляющих колебания Si—O—CH₃ группы в ИК-спектрах модифицирован-

ной древесины и после экстракции, подтверждает стабильный характер образовавшихся связей между гидроксильными группами древесины и метокси-группами кремнийорганических соединений органосиланов. Алкидная смола вызвала более высокую концентрацию кремния в древесной массе, которая увеличивается по мере повышения температуры обработки. Кремнийорганические соединения вызвали гораздо более высокую устойчивость к вымыванию водой, что свидетельствует о постоянном связывании силанов с древесной массой. В исследовании [11] древесина черной сосны и тополя была подвергнута термической модификации в различных условиях, затем некоторые термомодифицированные образцы черной сосны были подвергнуты поверхностной модификации растворами органосилана, а биологическая устойчивость различных материалов была исследована с помощью лабораторных тестов на агаровом блоке против действия базидиомицетов и микрогрибов. Термомодифицированные образцы сосны были подвергнуты воздействию грибов бурой гнили кониофоры колодезной (*Coniophora puteana*) и *Oligorus placenta*, в то время как древесина тополя была подвергнута воздействию грибов белой гнили траметес разноцветный (*Trametes versicolor*) и *O. placenta*. Что касается биологической стойкости термохимически обработанной органосиланами древесины сосны, то она была проверена на воздействие *S. puteana*. Кроме того, обе термообработанные породы древесины, а также термохимически обработанная древесина сосны были подвергнуты воздействию смеси микрогрибов, чтобы эффективность обработки визуально оценивалась по росту грибов на поверхности образца. Термическая обработка, по-видимому, увеличивает биологическую стойкость черной сосны против *S. puteana* на 9,65–36,73% по сравнению с немодифицированной древесиной. Наиболее значительное увеличение биологической стойкости среди всех категорий термически обработанной древесины было зарегистрировано для *O. placenta*, при этом потери массы на 28,75–68,46% меньше в обработанных образцах сосны и на 31,98–64,72% в термически обработанном тополе соответственно по сравнению с немодифицированной древесиной. Устойчивость обработанного тополя к *T. versicolor* также была повышена (13,25–46,08%) по сравнению с контрольным. Термическая модификация положительно повлияла на биологическую устойчивость обоих видов, хотя и не смогла эффективно защитить древесину сосны и тополя от воздействия микрогрибов. Комбинация термической обработки и обработки органосиланами показала значительное улучшение прочности древесины сосны по сравнению с контрольным образцом (на 45,68–87,83% меньше потери массы против *S. puteana*), а также против действия микрогрибов, причем присутствие бензина положительно повлияло на эффективность растворов силанов и их защитное действие.

Таким образом, поиск оптимальных параметров модифицирования древесных материалов кремнийорганическими соединениями является весьма актуальной задачей. В своей работе авторы исследовали влияние температуры на эффективность этого процесса путем определения процентного содержания кремния в составе подложки после модифицирования нативной и фосфорилированной древесины различными классами кремнийорганических соединений и установления соответствующих зависимостей.

Материалы и методы

В качестве объектов модифицирования использовались опилки заболони сосны. Модифицирование осуществлялось в мягких условиях путем погружения в разбавленные растворы ФОС: диметилфосфит (ДМФ), трихлорэтилфосфит (ТИТ), трикрезилфосфат (ТКФ) и в разбавленные растворы КОС: полиэтилгидридсилоксан (ПЭГС), тетраэтоксисилан (ТЭС), полиметилсиликонат натрия (ПМСН). Кроме того, осуществлялось последовательное модифицирование сначала растворами ФОС, затем КОС в различных сочетаниях. В качестве органического растворителя для КОС использовался гексан марки «ХЧ», для ФОС – CCl_4 ; ДМФ и ПМСН растворялись в воде. Концентрация растворов ФОС и КОС составляла 10 мас. %; время модифицирования – 3 ч; температура модифицирования варьировалась и составляла 20, 40 и 60°C. После каждого этапа модифицирования проводилась экстракция образцов в течение трех часов соответствующим растворителем для удаления избытка непрореагировавшего модификатора. Интервал межслойной выдержки при последовательном модифицировании ФОС, затем КОС и время высушивания образцов составляли 24 ч. Содержание кремния в образцах определялось в соответствии с ГОСТ 20841.2–75 «Продукты кремнийорганические. Методы определения содержания кремния».

Анализ экспериментальных данных проводился методами однофакторного дисперсионного анализа, определялось влияние условий обработки КОС (температуры модифицирования) на содержание кремния в древесине в мас. %.

При построении модели однофакторного дисперсионного анализа результатом эксперимента является некоторая случайная величина X , называемая также результативным признаком. На значения случайной величины X влияет фактор A , состоящий из нескольких уровней (групп) $A_j, j=1, \dots, k$.

Обозначим через x_{ij} значение i -го наблюдения ($i=1, \dots, n$) в j -м уровне фактора A . Модель однофакторного дисперсионного анализа представим в виде:

$$x_{ij} = a + m_j + \varepsilon_{ij}, \quad (1)$$

где a – генеральное среднее всех мыслимых результатов наблюдений, т. е. $M(X)$; m_j – эффект влияния на X , вызванный j -м уровнем фактора A , или, иначе, отклонение математического ожидания a_j результатив-

ного признака при j -м уровне фактора от общего математического ожидания a , т. е. $m_j = a_j - a$; ε_{ij} — случайный остаток, отражающий влияние на величину x_{ij} всех других неконтролируемых факторов [12].

Выборочное среднее, соответствующее j -му уровню фактора A (групповое среднее), вычисляется по формуле:

$$\bar{x}_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_{ij}. \quad (2)$$

Среднее арифметическое всех величин, или общее среднее:

$$\bar{x} = \frac{1}{nk} \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^n x_{ij} = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k \bar{x}_j. \quad (3)$$

Общая сумма квадратов — сумма квадратов отклонений наблюдаемых значений x_{ij} от общего среднего:

$$Q = \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^n (x_{ij} - \bar{x})^2 = \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^n x_{ij}^2 - nk\bar{x}^2. \quad (4)$$

Факторная сумма квадратов (обусловленная влиянием фактора A) — сумма квадратов отклонений групповых средних от общего среднего:

$$Q_f = n \sum_{j=1}^k (\bar{x}_j - \bar{x})^2 = n \sum_{j=1}^k \bar{x}_j^2 - nk\bar{x}^2. \quad (5)$$

Остаточная сумма квадратов характеризует рассеяние внутри группы:

$$Q_o = \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^n (x_{ij} - \bar{x}_j)^2. \quad (6)$$

Тогда справедливо тождество:

$$\sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^n (x_{ij} - \bar{x})^2 = n \sum_{j=1}^k (\bar{x}_j - \bar{x})^2 + \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^n (x_{ij} - \bar{x}_j)^2, \quad (7)$$

или

$$Q = Q_f + Q_o. \quad (8)$$

Таким образом, полная сумма квадратов отклонений от общего среднего Q разбивается на две компоненты: Q_f — сумма квадратов между группами; Q_o — сумма квадратов внутри групп.

Соответствующие числа степеней свободы рассчитываются следующим образом:

$$v = nk - 1; \quad v_f = k - 1; \quad v_o = k(n - 1), \quad (9)$$

а дисперсии:

$$\bar{S}^2 = \frac{Q}{v}; \quad \bar{S}_f^2 = \frac{Q_f}{v_f}; \quad \bar{S}_o^2 = \frac{Q_o}{v_o}. \quad (10)$$

Заметим, что величина $\bar{S}^2 = \frac{Q}{v}$, являющаяся несмещенной оценкой для σ^2 , всегда будет иметь распределение χ^2 с v степенями свободы и по ней можно построить доверительный интервал для σ^2 [12].

Если нулевая гипотеза о равенстве средних справедлива, то эти дисперсии являются несмещенными оценками дисперсий генеральной совокупности. Значительное превышение дисперсии \bar{S}_f^2 над дисперсией \bar{S}_o^2 можно объяснить различием в средних группах. Поэтому для проверки нулевой гипотезы используется отношение этих средних F -статистика, носящее название дисперсионного отношения:



Рис. 1. Критическая область дисперсионного анализа при проверке гипотезы H_0 [13]

Fig. 1. Critical area of the analysis of variance when testing hypothesis H_0 [13]

$$F = \frac{\bar{S}_f^2}{\bar{S}_o^2} = \frac{\frac{Q_f}{k-1}}{\frac{Q_o}{k(n-1)}}, \quad (11)$$

которая имеет распределение Фишера с числами степеней свободы $(k - 1)$ и $k(n - 1)$. Нулевая гипотеза не противоречит результатам наблюдений на заданном уровне значимости α , если:

$$F < F_u(k-1, k(n-1)); \quad (12)$$

в этом случае считается, что фактор A не оказывает существенного влияния на показатель X .

При заданном уровне значимости α нулевая гипотеза отклоняется, если вычисленная F -статистика больше верхнего критического значения F_u . Таким образом, как показано на рис. 1 [13], решающее правило формулируется следующим образом: нулевая гипотеза H_0 отклоняется, если $F > F_u$, в этом случае считается, что фактор A оказывает существенное влияние на показатель X [13].

Если нулевая гипотеза H_0 является истинной, то вычисленная F -статистика близка к единице, поскольку ее числитель и знаменатель являются оценками одной и той же величины — дисперсии σ^2 , присущей анализируемым данным. Если нулевая гипотеза H_0 является ложной (и между математическими ожиданиями разных групп существует значительная разница), то вычисленная F -статистика будет намного больше единицы, поскольку ее числитель \bar{S}_f^2 , помимо естественной изменчивости данных, оценивает эффект условий эксперимента или разности между группами, в то время как знаменатель \bar{S}_o^2 оценивает лишь естественную изменчивость данных [13].

Результаты и обсуждение

В табл. 1 представлены результаты элементного анализа на кремний образцов модифицированной древесины.

Проведем анализ полученных экспериментальных данных табл. 1 методами однофакторного дисперсионного анализа как наиболее результативного метода, предназначенного для оценки влияния различных факторов на результат эксперимента.

Таблица 1
Table 1Содержание кремния в модифицированной древесине [14]
Silicon content in the modified wood [14]

№ п/п	Условия обработки ФОС	Температура модифицирования, °С											
		20	40	60	20	40	60	20	40	60			
		КОС			ПМСН			ТЭС			ПЭГС		
Время модифицирования 1 ч													
1	-----	1,8	2,5	3,5	0,45	0,63	0,8	0,04	0,14	0,22			
2	ДМФ	3,3	4,5	5,7	0,81	0,98	1,2	0,1	0,24	0,38			
3	ТИТ	1,6	1,7	1,9	0,66	0,79	0,9	0,15	0,29	0,43			
4	ТКФ	1	1,2	1,3	0,45	0,5	0,59	0,08	0,17	0,27			
Время модифицирования 2 ч													
1	-----	2,5	3,5	4,3	0,86	1	1,2	0,1	0,2	0,29			
2	ДМФ	4,7	5,9	7	1,15	1,37	1,56	0,2	0,35	0,49			
3	ТИТ	2,4	2,6	2,8	0,78	0,92	1,07	0,26	0,41	0,55			
4	ТКФ	1,3	1,4	1,5	0,6	0,69	0,77	0,16	0,27	0,38			
Время модифицирования 3 ч													
1	-----	2,8	3,7	4,5	1,2	1,35	1,5	0,15	0,25	0,35			
2	ДМФ	5,1	6,4	7,6	1,5	1,7	1,9	0,3	0,45	0,6			
3	ТИТ	2,8	3	3,3	1,07	1,15	1,32	0,35	0,51	0,65			
4	ТКФ	1,3	1,5	1,7	0,63	0,77	0,88	0,25	0,37	0,47			
Время модифицирования 4 ч													
1	-----	2,9	3,8	4,7	1,23	1,38	1,53	0,16	0,25	0,36			
2	ДМФ	5,2	6,5	7,8	1,53	1,73	1,93	0,31	0,46	0,6			
3	ТИТ	2,9	3,1	3,5	1,13	1,24	1,33	0,37	0,53	0,68			
4	ТКФ	1,5	1,6	1,8	0,65	0,78	0,89	0,27	0,38	0,49			

Таблица 2
Table 2Результаты однофакторного дисперсионного анализа для условия обработки ПМСН
Results of one-factor analysis of variance for the sodium polymethylsiliconate (SPMS) treatment condition

Время	Источник дисперсии	Сумма квадратов	Число степеней свободы	Дисперсия	Статистика Фишера, F	P-значение	F_U
1 ч	Между группами	2,765	2	1,3825	0,598341	0,570199	4,256495
	Внутри групп	20,795	9	2,310556			
	Общая	23,56	11				
2 ч	Между группами	2,765	2	1,3825	0,369022	0,701404	4,256495
	Внутри групп	33,7175	9	3,746389			
	Общая	36,4825	11				
3 ч	Между группами	3,251667	2	1,625833	0,378321	0,695408	4,256495
	Внутри групп	38,6775	9	4,2975			
	Общая	41,92917	11				
4 ч	Между группами	3,515	2	1,7575	0,40696	0,67733	4,256495
	Внутри групп	38,8675	9	4,318611			
	Общая	42,3825	11				

Для каждого условия обработки КОС будем проверять нулевую гипотезу $H_0: m_1=m_2=\dots=m_k$ об отсутствии ее влияния на результативный признак X (содержания кремния в % в целлюлозе) фактора A (температура), имеющего k уровней $A_j, j=1, \dots, k$.

Основная идея дисперсионного анализа состоит в том, чтобы сопоставить дисперсию за счет воздействия фактора A с дисперсией, обусловленной случайными причинами. Если различие между ними несущественно, то влияние фактора A на признак X

Таблица 3
Table 3

Результаты однофакторного дисперсионного анализа для условия обработки ТЭС
Results of single-factor analysis of variance for the tetraethoxysilane treatment condition

Время	Источник дисперсии	Сумма квадратов	Число степеней свободы	Дисперсия	Статистика Фишера, F	P-значение	F_U
1 ч	Между группами	0,15695	2	0,078475	1,704126	0,235718	4,256495
	Внутри групп	0,41445	9	0,04605			
	Общая	0,5714	11				
2 ч	Между группами	0,18305	2	0,091525	1,14697	0,359987	4,256495
	Внутри групп	0,718175	9	0,079797			
	Общая	0,901225	11				
3 ч	Между группами	0,18015	2	0,090075	0,586903	0,575991	4,256495
	Внутри групп	1,381275	9	0,153475			
	Общая	1,561425	11				
4 ч	Между группами	0,162517	2	0,081258	0,513004	0,615198	4,256495
	Внутри групп	1,425575	9	0,158397			
	Общая	1,588092	11				

Таблица 4
Table 4

Результаты однофакторного дисперсионного анализа для условия обработки ПЭГС
Results of single-factor analysis of variance for the polyethylhydridesiloxane treatment condition

Время	Источник дисперсии	Сумма квадратов	Число степеней свободы	Дисперсия	Статистика Фишера, F	P-значение	F_U
1 ч	Между группами	0,108117	2	0,054058	10,09912	0,005012	4,256495
	Внутри групп	0,048175	9	0,005353			
	Общая	0,156292	11				
2 ч	Между группами	0,12255	2	0,061275	6,985117	0,014752	4,256495
	Внутри групп	0,07895	9	0,008772			
	Общая	0,2015	11				
3 ч	Между группами	0,130117	2	0,065058	5,11599	0,032808	4,256495
	Внутри групп	0,11445	9	0,012717			
	Общая	0,244567	11				
4 ч	Между группами	0,13005	2	0,065025	4,694946	0,040131	4,256495
	Внутри групп	0,12465	9	0,01385			
	Общая	0,2547	11				

незначительно. Если же различие между факторной и остаточной дисперсиями значимо, то это говорит о влиянии фактора A на рассматриваемый признак X .

Предполагается, что случайная величина X имеет нормальное распределение с математическим ожиданием m_j , зависящим от уровня фактора A_j , и постоянной дисперсией σ^2 . В качестве исходных данных используются выборочные значения величины X , полученные экспериментальным путем для каждого фактора A (времени/температуры). Число элементов выборки на каждом уровне равно n , тогда общее число наблюдений – nk .

Определим зависимости содержания кремния в % от условий обработки КОС при фиксированном времени. В каждой из групп для одного условия обработки КОС возьмем четыре значения содержания кремния в % (табл. 1).

Результаты расчета, проведенного методами однофакторного дисперсионного анализа, для каждого типа условия обработки КОС занесем в табл. 2–4:

Из табл. 2 следует сделать вывод, что F -статистика много меньше рассчитанного значения, следовательно, нулевая гипотеза не противоречит результатам наблюдений на заданном уровне значимости $\alpha=5\%$. Из этого следует, что при использовании в качестве модификатора ПМСН температура не оказывает существенного влияния на содержание кремния в древесине вне зависимости от химического состава подложки (использования или нет предварительного фосфорилирования).

Данные табл. 3 подтверждают, что при фиксированном времени модифицирования от 1 до 4 ч условия обработки ТЭС также не оказывают существенного влияния на содержания кремния в древесине,

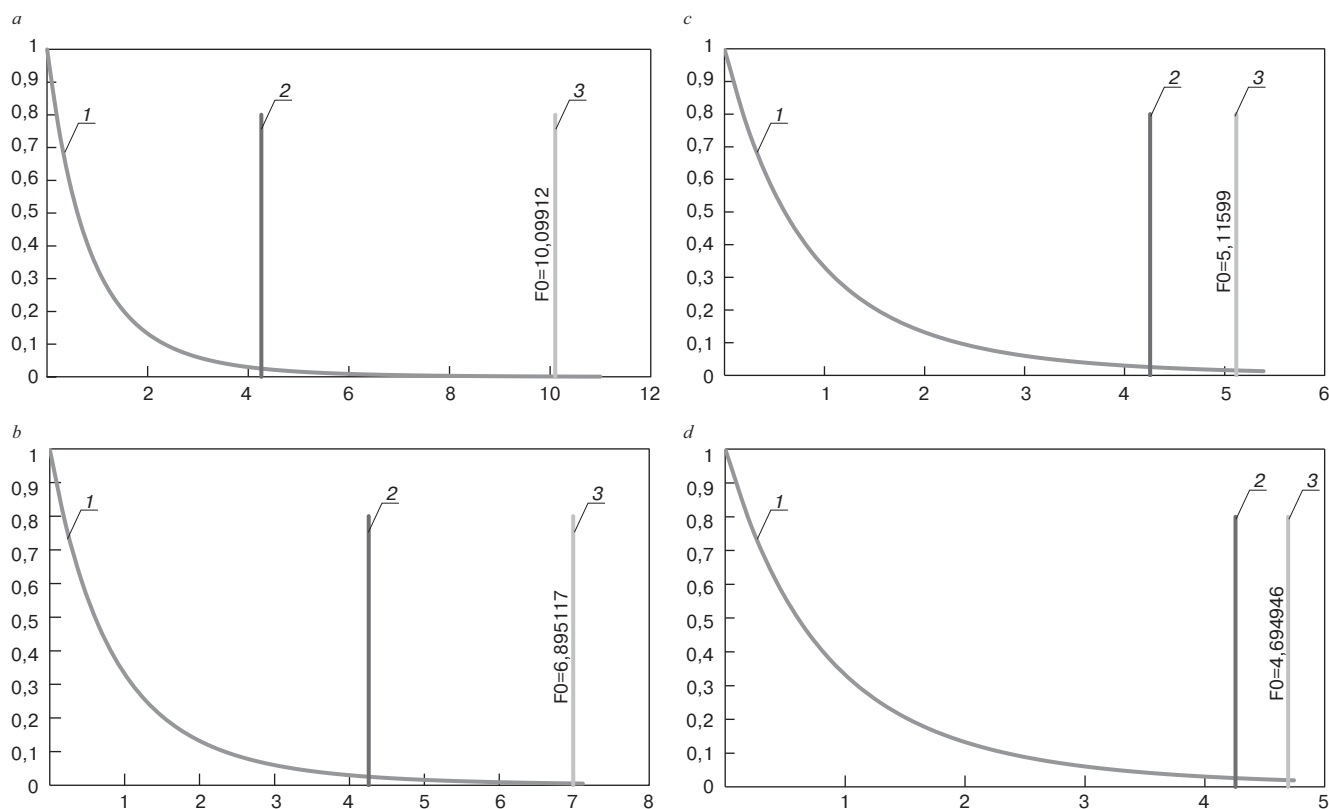


Рис. 2. Распределение Фишера для условий обработки ПЭГС: *a* – время 1 ч; *b* – время 2 ч; *c* – время 3 ч; *d* – время 4 ч; 1 – плотность вероятности F -распределения; 2 – критическое значение при $\alpha=0,05$; 3 – тестовая статистика

Fig. 2. Fisher distribution for polyethylhydridesiloxane treatment conditions: *a* – time 1 h; *b* – time 2 h; *c* – time 3 h; *d* – time 4 h; 1 – probability density of F -distribution; 2 – critical value at $\alpha=0.05$; 3 – test statistics

так как F -статистика оказалась ниже F_U . Можно сделать предположение, что это обусловлено отсутствием функциональных групп в молекулах ТЭС и, как следствие, низкой реакционной способностью этого модификатора [15, 16]. Причем предварительное фосфорилирование не способствует решению этой проблемы.

Из данных табл. 4 видно, что при фиксированном времени модифицирования 1, 2, 3 и 4 ч F -статистика $> F_U$, а вероятность того, что при истинной нулевой гипотезе F -статистика не меньше рассчитанного значения, изменяется от 0,5 до 4% и не превышает уровень значимости $\alpha=5\%$, поэтому можно сделать вывод, что условия обработки ПЭГС оказывают существенное влияние на содержание кремния в древесине при температуре от 20 до 60°C. Это условие выполняется для всех типов используемых подложек: немодифицированная древесина; предварительно фосфорилированная ДМФ, ТИТ и ТКФ древесина. Графики распределения Фишера представлены на рис. 2. Таким образом, меняя температуру модифицирования, можно регулировать химический состав модифицированной древесины, не повышая концентрацию дорогостоящего модификатора.

Заключение

В результате проведенного однофакторного дисперсионного анализа было установлено влияние температуры обработки КОС на содержание крем-

ния в древесине в мас. % при фиксированном времени модифицирования. Из трех изученных кремний-органических модификаторов поверхности только ПЭГС обнаруживает устойчивую взаимосвязь между температурой модифицирования нативной и фосфорилированной древесины и степенью модифицирования подложки, выраженной в процентном содержании кремния в составе древесного композита после длительной экстракции. Характер зависимости планируется установить при последующих исследованиях, что позволит выяснить механизм реакций силилирования нативной и фосфорилированной древесины при использовании в качестве модификатора ПЭГС.

Тетраэтоксисилан (ТЭС) не вступает в химическое взаимодействие ни с нативной, ни с фосфорилированной древесиной, вероятно, в связи с отсутствием в его составе функциональных групп (температура в этом случае влияния не оказывает). Взаимодействие ТЭС с древесным композитом осуществляется за счет физических сил адсорбции, причем предварительное фосфорилирование существенного влияния на этот процесс не оказывает.

При использовании в качестве модификатора нативной и фосфорилированной древесины ПМСН не удалось установить взаимосвязи между температурой модифицирования и содержанием кремния в модифицированной подложке. Вероятно, это обусловлено одновременным протеканием разных ти-

пов химических взаимодействий с компонентами подложки, механизм которых различен. В этом случае нужно проводить дополнительные исследования по изучению реакций с отдельными компонентами лигноуглеводного комплекса клеточных стенок древесины.

Список литературы / References

1. Машкин Н.А., Ершова С.Г., Крутасов Б.В., Маньшин А.Г. Защитная обработка строительных материалов кремнийорганическими гидрофобизаторами: Монография. Новосибирск: НГАСУ, 2013. 204 с.
1. Mashkin N.A., Ershova S.G., Krutasov B.V., Man'shin A.G. Zashchitnaya obrabotka stroitel'nykh materialov kremniorganicheskimi gidrofobizatorami. Monografiya [Protective treatment of building materials with organosilicon hydrophobisers]. Novosibirsk: NGASU. 2013. 204 p.
2. Васильев В.В., Быстрова В.В., Розенкова И.В. Исследование свойств кремнийорганических гидрофобизаторов для древесных плит // *Известия высших учебных заведений. Лесной журнал*. 2012. № 6. С. 119–126.
2. Vasilyev V.V., Bystrova V.V., Rozenkova I.V. Investigation of the properties of organosilicon hydrophobisers for wood boards. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenij. Lesnoj zhurnal*. 2009. No. 6, pp. 119–126. (In Russian).
3. Zarah Walsh-Korb, Luc Avérous, Recent developments in the conservation of materials properties of historical wood. *Progress in Materials Science*. 2019. Vol. 102, pp. 167–221. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2018.12.001>
4. Broda M., Plaza N.Z. Durability of model degraded wood treated with organosilicon compounds against fungal decay. *International Biodeterioration & Biodegradation*. 2023. Vol. 178. 105562. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2022.105562>
5. Perdoch W. et al. The impact of vinylotrimethoxysilane-modified linseed oil on selected properties of impregnated wood. *Forests*. 2022. Vol. 13. No. 8. 1265. DOI: <https://doi.org/10.3390/f13081265>
6. Zhou K. et al. Mechanism and effect of alkoxysilanes on the restoration of decayed wood used in historic buildings. *Journal of Cultural Heritage*. 2020. Vol. 43, pp. 64–72. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.culher.2019.11.012>
7. Odalanowska M. et al. Propolis and organosilanes as innovative hybrid modifiers in wood-based polymer composites. *Materials*. 2021. Vol. 14. No. 2, p. 464. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma14020464>
8. Pokrovskaya E. Research of bioproof materials at superficial modification of wood. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. Vol. 471. No. 3. 032047. DOI: [10.1088/1757-899X/471/3/032047](https://doi.org/10.1088/1757-899X/471/3/032047)
9. Кобелев А.А. Разработка комплексного огнебиовлагозащитного состава на основе соединений, обеспечивающих поверхностную модификацию древесины. М.: Академия ГПС МЧС России, 2012. 128 с.
9. Kobelev A.A. Razrabotka kompleksnogo ognebiologozashchitnogo sostava na osnove soyedineniy, obespechivayushchikh poverkhnostnuyu modifikatsiyu drevesiny [Development of a complex fire and moisture protective composition based on compounds that provide surface modification of wood]. Moscow: Academy of State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia. 2012. 128 p.
10. Kamperidou V. et al. Impact of thermal modification combined with silicon compounds treatment on wood structure. *Wood Res*. 2022. Vol. 67, pp. 773–784. DOI: doi.org/10.37763/wr.1336-4561/67.5.773784
11. Kamperidou V. The biological durability of thermal- and chemically-modified black pine and poplar wood against basidiomycetes and mold action. *Forests*. 2019. Vol. 10. No. 12. 1111. DOI: <https://doi.org/10.3390/f10121111>
12. Корниенко В.С. Математическая статистика. Решение задач по теме «Однофакторный дисперсионный анализ». Волгоград: Волгогр. гос. с.-х. акад., 2010. 20 с.
12. Kornienko V.S. Matematicheskaya statistika. Resheniye zadach po teme «Odnofaktornyy disperсионный анализ» [Math statistics. Solving problems on the topic “One-factor analysis of variance”]. Volgograd: Volgograd state agricultural academy. 2010. 20 p.
13. Левин Д.М., Стефан Д.К., Тимоти С., Беренсон М.Л. Статистика для менеджеров с использованием Microsoft Excel. М.: Вильямс, 2004.
13. Levin D.M., Stephan D.C., Timothy S., Berenson M.L. Statistika dlya menedzherov s ispol'zovaniyem Microsoft Excel [Statistics for managers using Microsoft Excel]. Moscow: Williams. 2004.
14. Котенева И.В. Боразотные модификаторы поверхности для защиты древесины строительных конструкций: Монография. М.: МГСУ, 2011. 191 с.
14. Koteneva I.V. Borazotnyye modifikatory poverkhnosti dlya zashchity drevesiny stroitel'nykh konstruksiy: monografiya [Borazote surface modifiers for protecting wood of building structures: monograph]. Moscow: MUSE. 2011. 191 p.
15. Khodaei M., Shadmani S. Superhydrophobicity on aluminum through reactive-etching and TEOS/GPTMS/nano-Al₂O₃ silane-based nanocomposite coating. *Surface and Coatings Technology*. 2019. Vol. 374, pp. 1078–1090. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.06.074>
16. Jin L. et al. Structural engineering in the self-assembly of amphiphilic block copolymers with reactive additives: micelles, vesicles, and beyond. *Langmuir*. 2021. Vol. 37. No. 32, pp. 9865–9872. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.1c01554>

УДК 624.011.17

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-818-10-99-108>

А.Р. ТУСНИН, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой металлических и деревянных конструкций, директор ИПГС (Tusninar@mgsu.ru),
 Н.В. ЛИНЬКОВ, канд. техн. наук, доцент кафедры металлических и деревянных конструкций (LinkovNV@mgsu.ru), А.А. КЛЮКИН, инженер, старший преподаватель кафедры металлических и деревянных конструкций (KlyukinAA@mgsu.ru)

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (129337, г. Москва, Ярославское ш., 26)

Исследование несущей способности и деформативности соединений деревянных конструкций с применением композиционных материалов

Одним из актуальных направлений в исследовании деревянных конструкций является определение прочностных характеристик узлов и соединений деревянных элементов с применением композиционных материалов. Данные материалы позволяют решать задачи проектирования деревянных конструкций без применения сплачивания, наращивания и армирования отдельных элементов. Композиционные материалы не приводят к существенному увеличению габаритов узлов и не наносят ущерба внешнему виду конструкций. Использование новых высокопрочных материалов значительно увеличивает срок службы конструкции и повышает надежность. Объектом исследования являются соединения элементов деревянных конструкций композиционными материалами на основе стеклоткани. Проведенное исследование направлено на получение экспериментальных данных для определения характеристик КМ-соединений деревянных элементов составного сечения. В рамках исследования рассматривалось несколько серий симметричных двухсрезных образцов с разной толщиной композиционного материала. Соединение композиционным материалом выполнялось послойным формированием на деревянной конструкции. Представлены результаты исследований прочности и деформативности разработанного соединения. Установлены прочностные характеристики в виде сопротивления срезу композиционного материала по шву сплачивания в соединении, сопротивления отрыву композиционного материала от основания, скалыванию композиционного материала. Установлены характеристики деформативности КМ-соединений при кратковременных машинных испытаниях линейно возрастающей нагрузкой в образцах. Проведенное исследование показало соответствие прочностных характеристик испытываемых соединений расчетной несущей способности.

Ключевые слова: композиционный материал, эпоксидная матрица, стеклоткань, усиление деревянных конструкций, расчетная несущая способность.

Работа выполнена при поддержке гранта НИУ МГСУ. Приказ 453/130 от 15.05.2023 «О реализации проектов, поддержанных по результатам конкурса 2023 года на проведение фундаментальных и прикладных научных исследований (НИР) научными коллективами НИУ МГСУ».

Для цитирования: Туснин А.Р., Линьков Н.В., Ключкин А.А. Исследование несущей способности и деформативности соединений деревянных конструкций с применением композиционных материалов // *Строительные материалы*. 2023. № 10. С. 99–108.

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-818-10-99-108>

A.R. TUSNIN, Doctor of Sciences (Engineering), Professor, Head of the Department of Metal and Wooden Structures (Tusninar@mgsu.ru),
 N.V. LINKOV, Candidate of Sciences (Engineering), Associate Professor of the Department of Metal and Wooden Structures (LinkovNV@mgsu.ru),
 A.A. KLYUKIN, Engineer, Senior Lecturer at the Department of Metal and Wooden Structures (KlyukinAA@mgsu.ru)
 National Research Moscow State University of Civil Engineering (26, Yaroslavl Highway, Moscow, 129337, Russian Federation)

Investigation of the Bearing Capacity and Deformability of Promising Joints of Wooden Structures Using Composite Materials

One of the actual directions in the study of wooden structures is the determination of the strength characteristics of the nodes and joints of wooden elements using composite materials. These materials allow us to solve the problems of designing wooden structures without the use of rallying, building and reinforcing individual elements. Composite materials do not lead to a significant increase in the dimensions of the nodes and do not damage the appearance of the structures. The use of new high-strength materials significantly increases the service life of the structure and increases reliability. The object of the study is the connection of elements of wooden structures with composite materials based on fiberglass. The type of joints of wooden elements with a composite material based on fiberglass is proposed. The conducted research is aimed at obtaining experimental data to determine the characteristics of CM-joints of composite wooden elements. As part of the study, several series of symmetrical, two-cut samples with different thickness of composite material were considered. The composite material connection was performed by layer-by-layer formation on a wooden structure. The article presents the results of studies of the strength and deformability of the developed compound. Strength characteristics are established, in the form of resistance to the cut of the composite material along the seam of bonding in the joint, resistance to the separation of the composite material from the base, chipping of the composite material. The characteristics of deformability of KM-joints during short-term machine tests with linearly increasing load in samples are established. **Conclusions.** The conducted research has shown that the strength characteristics of the tested compounds correspond to the calculated load-bearing capacity.

Keywords: composite material, epoxy matrix, fiberglass, reinforcement of wooden structures, calculated bearing capacity.

The work was supported by a grant from NRU MGSU. Order 453/130 dated May 15, 2023 “On the implementation of projects supported by the results of the 2023 competition for fundamental and applied scientific research (R&D) by the research teams of NRU MSUCI”.

For citation: Tusnina A.R., Linkov N.V., Klyukin A.A. Investigation of the bearing capacity and deformability of promising joints of wooden structures using composite materials. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2023. No. 10, pp. 99–108. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-818-10-99-108>

Строительство является крупным потребителем деловой древесины. Древесина — естественный полимер и строительный материал, обладающий уникальными свойствами, которые обеспечивают для деревянных конструкций эффективное применение в несущих и ограждающих частях зданий и сооружений. Сбережение лесных ресурсов требует рационально использовать древесину при изготовлении новых деревянных конструкций. Существующие размеры природных лесоматериалов не позволяют решать задачи разработки деревянных конструкций без применения соединений для сплачивания, сращивания и армирования отдельных деревянных элементов.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью разработки и изучения эффективных соединений деревянных элементов с применением современных композиционных материалов на основе стеклоткани для конструкций из дерева и пластмасс, получения достоверных данных для их расчета и конструирования.

Применение современных композиционных полимерных материалов с известными свойствами делает такую техническую задачу практически решаемой с наименьшими экономическими затратами. Новые высокопрочные материалы — композиционные материалы — без ущерба для внешнего вида и габаритов деревянной конструкции значительно повышают срок ее службы и надежность [1].

В работах [2, 3] определяются механические свойства перекрестных деревянных конструкций, армированных базальтовым волокном. Также обосновывается возможность повышения несущей способности клееных деревянных конструкций армированием полимерными стержнями или сетками. Определяется модуль упругости клееной древесины при изгибе с учетом армирующего слоя. В работе [4] проведены обширные исследования, показывающие потенциал и возможности поперечного армирования деревянных элементов в областях приложения нагрузки и в зонах предполагаемых разрушений.

Результаты исследований [5, 6] показывают, что жесткость при изгибе и несущая способность могут быть увеличены за счет усиления клееных балок ламелями из стеклопластика в растянутой зоне поперечных сечений. При усилении растянутой зоны изгибаемой балки более выражено увеличение несущей способности по критерию прочности, чем по прогибам при работе на изгиб. Расчеты на изгиб по теории композитов показали хорошую сходимость со значениями, полученными в ходе испытаний. Увеличение как несущей способности, так и жесткости при изгибе зависит от количества арматуры в общем поперечном сечении, свойств материала — пластин из стеклопластика и древесины, а также от положения пластин из стеклопластика в поперечном сечении.

В работах [7–9] исследован способ упрочнения опорных зон балок полимерным композитом на основе стекловолокна и эпоксидной матрицы с включением в его состав углеродных нанотрубок. Рассмотрены

вопросы преднапряжения клееных деревянных конструкций и восстановления поврежденных.

В [10] описано проведение работ по усилению деревянных несущих конструкций дворца Мансфельд в Германии. Применение деревополимербетонных композитных конструкций явилось эффективным решением для увеличения несущей способности и жесткости деревянных балок, работающих при изгибе.

В работе [11] рассмотрен процесс усиления балок перекрытия в здании гольф-клуба в г. София, Болгария.

В Италии в 2005 г. было выпущено руководство CNR-DT 201/2005 по проектированию и монтажу систем с внешним усилением существующих деревянных конструкций полимерными композитами, где даны рекомендации по применению композитных материалов, предварительной оценке состояния конструкции и целесообразности применения композитов [12].

В работе [13] описан процесс ремонта опорных зон балочных конструкций замка Клайн в Великобритании путем устройства «деревянного протеза» на клееных композитных ламелях и композитной арматуре.

Российскими инженерами был разработан проект усиления углепластиком (композитным материалом на основе высокопрочных углеродных волокон) деревянных балок покрытия, поврежденных в результате нарушения условий складирования и хранения клееных деревянных конструкций.

В работе [14, 15] изучались вопросы влияния влажности и температуры на адгезию сопряжения древесины и композитного материала.

Кроме научных литературных источников рассмотрены нормативно-технические документы: Eurocode 5: Design of timber structures — Part 1–1: General — Common rules and rules for buildings; Eurocode 5: Design of timber structures — Part 1–2: General — Structural fire design; Eurocode 5: Design of timber structures — Part 2: Bridges; DIN EN 408-2012 «Timber structures — Structural timber and glued laminated timber — Determination of some physical and mechanical properties» (Германия); ACI 440R-96 State-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Plastic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures, Reported by ACI Committee; СП 64.13330.2017 «Деревянные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-25–80».

Рассмотренные научные и нормативные источники позволяют сделать вывод о необходимости применения эффективных соединений деревянных конструкций, создаваемых на основе современных композиционных материалов, физико-механические свойства которых наилучшим образом соответствуют свойствам естественного анизотропного полимера — конструкционной древесины.

Материалы и методы

Цель проведения испытаний — получение экспериментальных данных для определения прочностных

и деформационных характеристик КМ-соединений деревянных элементов на образцах для расчета КМ-соединений при разработке деревянных элементов составного сечения при усилении существующих деревянных конструкций.

Прочность и деформативность соединений деревянных элементов определяют работу конструкций под нагрузкой. Для определения основных характеристик соединений – максимальной несущей способности соединения (разрушающего усилия) N_{max} , верхней границы области упругой работы соединения N_{I-II} , деформаций соединения на характерных уровнях нагружения – проведены испытания образцов исследуемых соединений деревянных элементов композиционным материалом на основе стеклоткани.

Образцы для испытаний КМ-соединений симметричные, двухсрезные, предназначенные для проведения испытаний по сжатой схеме.

В настоящей работе рассмотрен один вариант вида соединения деревянных элементов композиционным материалом (КМ) послойного формирования непосредственно на деревянной конструкции и три типа композиционного материала.

КМ-обклейка – соединение деревянных элементов внешней обклейкой композиционным материалом, который в процессе изготовления формируется на открытых боковых поверхностях соединяемых элементов. Рассматривались КМ-соединения на основе трех типов композиционного материала, каждый из которых имел три варианта толщины обклейки: два слоя – 0,6 мм; четыре слоя – 1,1 мм; шесть слоев – 1,6 мм.

На рис. 1 представлен общий вид соединения деревянных элементов композиционным материалом на основе эпоксидной матрицы и стеклоткани внешней обклейкой боковых поверхностей соединяемых элементов.

Для применения в деревянных конструкциях соединений КМ-обклейка рассмотрено три типа композиционных материалов.

Тип 1 – соединение деревянных элементов композиционным материалом на основе эпоксидной смолы КДА-М с отвердителем Этал-45 (матрица) и армирующей компоненты в виде стеклоткани Т13 (обозначение состава композиционного материала КДА+Т13).

Тип 2 – соединение деревянных элементов композиционным материалом на основе полиэфирной смолы PolyTay 303ТАЕ с отвердителем Бутанокс М50 (матрица) и армирующей компоненты в виде стеклоткани Т13 (обозначение состава композиционного материала ПЭФ+Т13).

Тип 3 – соединение деревянных элементов композиционным материалом на основе эпоксидной смолы КДА-М с отвердителем Этал-45 (матрица) и армирующей компоненты в виде стеклопластика РСТ (обозначение состава композиционного материала КДА+РСТ).

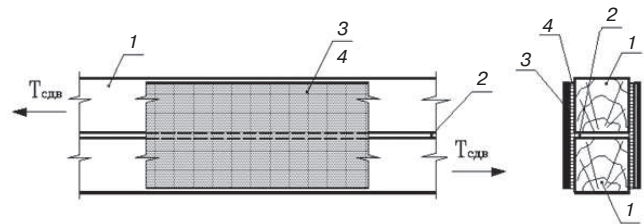


Рис. 1. Соединение деревянных элементов композиционным материалом на основе эпоксидной матрицы и стеклоткани внешней обклейкой боковых поверхностей соединяемых элементов – КМ-обклейка: 1 – соединяемые деревянные элементы; 2 – шов сплавления; 3 – композиционный материал, сформированный на конструкции; 4 – клеевой шов, создающий адгезионные связи на границе раздела КМ – древесина

Fig. 1. Connecting wooden elements with a composite material (CM) based on an epoxy matrix and fiberglass with external gluing of the side surfaces of the joined elements – CM-gluing: 1 – wooden elements to be joined; 2 – welding seam; 3 – composite material formed on the structure; 4 – adhesive seam, creating adhesive bonds at the CM-wood interface

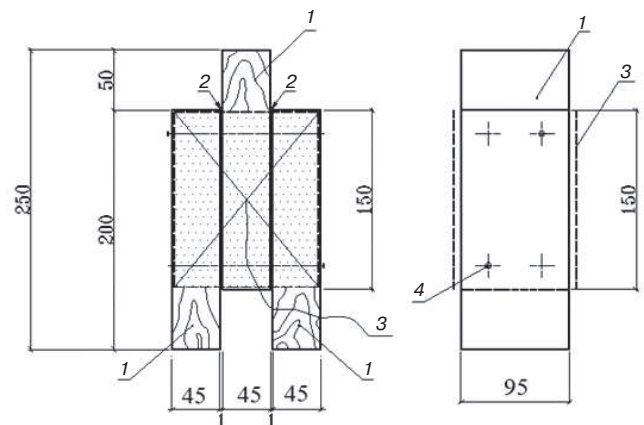


Рис. 2. Образцы соединения КМ-обклейка: 1 – деревянные элементы 45×95×200 мм; 2 – шов сплавления t=1 мм; 3 – зона обклейки в соединении; 4 – временные связи, удаляются после полимеризации эпоксидной матрицы

Fig. 2. Samples of the CM-gluing connection: 1 – wooden elements 45×95×200 mm; 2 – welding seam t=1 mm; 3 – gluing zone in the joint; 4 – temporary bonds, removed after polymerization of the epoxy matrix

Каждый тип соединения исследовали при толщине композиционного материала в два слоя (серия 1), четыре слоя (серия 2) и шесть слоев (серия 3). На каждый тип композиционного материала для каждой толщины КМ-обклейки было испытано по три образца, каждая серия включала девять образцов – всего 27 образцов соединений КМ-обклейка для трех типов и трех типоразмеров толщины композиционного материала. Каждый тип соединений выполнен в виде симметричных двухсрезных образцов одинаковых размеров с двухсторонней КМ-обклейкой.

На рис. 2 показана конструкция образцов соединений КМ-обклейка с учетом фактических размеров деревянных элементов. Общий вид изготовленных образцов представлен на рис. 3.

Деревянные элементы КМ-соединений изготавливаются из древесины сосны и ели 1-го и 2-го сортов. Качество древесины, ее прочность и размеры деревянных элементов из пиломатериалов хвойных пород, используемых в несущих деревянных конструкциях на КМ-соединениях, должны соответствовать требованиям российских стандартов.

Таблица 1
Table 1

Состав полимерных матриц для создания КМ-соединений
Composition of polymer matrices for creating CM compounds

№	Компонента	ГОСТ, ТУ	Массовая часть	Температура полимеризации	Технологическая жизнеспособность (t=25°C), мин
1	Смола КДА-М	ТУ 2225-042-17411121-2008	100	от 5 до 35°C	60
	Отвердитель Этал-45	ТУ 2257-045-18826195-01	50		
2	Смола ЭД-20	ГОСТ 10587-84	100	Не ниже 18°C до 35°C	30
	Отвердитель ПЭПА	ТУ 6-02-594-80	10-15		
	Пластификатор ДБФ	ГОСТ 8728-88	5-10		
3	Полиэфирная смола PolyTay 303ТАЕ	ГОСТ 27952-2017	100	20°C	120
	Отвердитель Бутанокс-М50		2,5		



Рис. 3. Общий вид образцов соединения КМ-обклейка тип 1, 2 и 3 с обклейкой в 2, 4 и 6 слоев
Fig. 3. General view of samples of CM-gluing connections types 1, 2 and 3 with gluing in 2, 4 and 6 layers

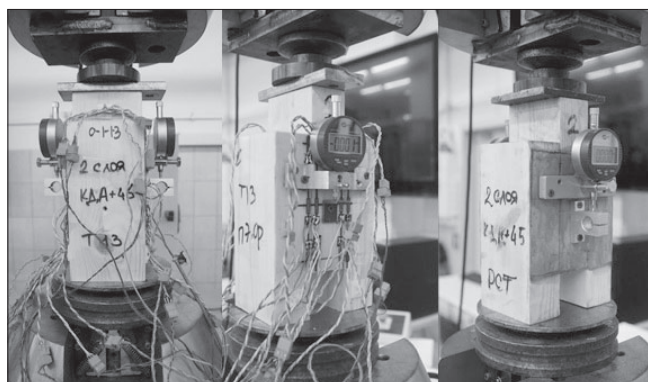


Рис. 4. Вид образцов двухслойных соединений КМ-обклейка в процессе испытаний. Серия 1
Fig. 4. View of samples of 2-layer CM-gluing joints during testing. Episode 1

Влажность древесины элементов, предназначенных для нанесения композиционного материала, должна составлять $12 \pm 3\%$.

Композиционный материал формируется непосредственно на конструкции или на отдельных элементах на основе эпоксидной или полиэфирной матрицы, армированной стеклотканью Т13. Состав по-

Таблица 2
Table 2

Ведомость образцов соединения КМ-обклейка – 1-я серия
List of samples of KM-gluing connection – 1 series

Серия	№ п/п	Марка образца	Тип соединения	Количество слоев	Состав КМ
1 – образцы 2 слоя КМ	1	О-1-1-1	1	2 слоя	КДА/Этал-45 + Т13
	2	О-1-1-2	1		КДА/Этал-45 + Т13
	3	О-1-1-3	1		КДА/Этал-45 + Т13
	4	О-2-1-1	2	2 слоя	ПЭф / Б-М50 + Т13
	5	О-2-1-2	2		ПЭф / Б-М50 + Т13
	6	О-2-1-3	2		ПЭф / Б-М50 + Т13
	7	О-3-1-1	3	2 слоя	КДА/Этал-45 + РСТ
	8	О-3-1-2	3		КДА/Этал-45 + РСТ
	9	О-3-1-3	3		КДА/Этал-45 + РСТ

лимерных матриц на основе эпоксидных смол и полиэфирной смолы представлен в табл. 1.

В качестве армирующей компоненты принята стеклоткань Т13 по ГОСТ 19170-2001. Стеклоткань Т13 полотняного переплетения, для которой нить вырабатывается из алюмоборосиликатного стекла типа «Е», толщина ткани $0,27 \pm 0,04$ мм.

Устройство соединений деревянных элементов КМ-обклейка включает следующие этапы работ: подготовку поверхности деревянных элементов под нанесение композиционного материала; подготовку необходимого количества пропитанной связующим стеклоткани; нанесение на контактные поверхности деревянных элементов праймерного слоя на основе полимерной матрицы; нанесение на контактные поверхности деревянных элементов проектного количества слоев стеклоткани, пропитанной связующим.

Ведомость образцов одного из вариантов соединения КМ-обклейка представлена в табл. 2. Общий вид образцов в процессе испытаний показан на рис. 4.

Результаты исследования

Испытания 1-й серии образцов на стадии, предшествующей разрушению, сопровождались интен-

Таблица 3
Table 3Результаты испытаний 1-й серии образцов соединения КМ-обклейка
Test results of the 1st series of samples of the KM-gluing connection

Тип соед.	Марка образца	t_{max} , с	$t=t_{max}/38,2$, с	Lgt, с	Коэффициенты надежности		N_{max} , кН	N_{I-II} , кН
					γV по формуле (1)	по N_{I-II} [16]		
1	O-1-1-1	740	19,372	1,287	2,94		36	18
	O-1-1-2	644	16,859	1,227	2,95		33	21
	O-1-1-3	837	21,911	1,341	2,93		36,4	21
	Среднее	740			2,937		1,3	35,13
2	O-2-1-1	393	10,288	1,012	2,99		24,1	6
	O-2-1-2	397	10,393	1,017	2,99		24	9
	O-2-1-3	393	10,288	1,012	2,99		24	12
	Среднее	394			2,989		1,3	24,03
3	O-3-1-1	1185	31,021	1,492	2,9		47,8	27
	O-3-1-2	555	14,529	1,162	2,96		30	15
	O-3-1-3	763	19,974	1,3	2,93		36,1	18
	Среднее	834			2,931		1,3	37,97

Таблица 4
Table 4Результаты испытаний 2-й серии образцов соединения КМ-обклейка
Test results of the 2nd series of samples of the KM-gluing connection

Тип соед.	Марка образца	t_{max} , с	$t=t_{max}/38,2$, с	Lgt, с	Коэффициенты надежности		N_{max} , кН	N_{I-II} , кН
					γV по формуле (1)	по N_{I-II} [16]		
1	O-1-2-1	845	22,12	1,345	2,93		39	30
	O-1-2-2	844	22,094	1,344	2,93		38,9	24
	O-1-2-3	846	22,147	1,345	2,93		39	24
	Среднее	845			2,926		1,3	38,97
2	O-2-2-1	840	21,99	1,342	2,93		38,2	12
	O-2-2-2	843	22,068	1,344	2,93		38,9	9
	O-2-2-3	850	22,251	1,347	2,93		38,9	15
	Среднее	844			2,926		1,3	38,67
3	O-3-2-1	1854	48,521	1,686	2,86		45	36
	O-3-2-2	643	16,832	1,226	2,95		33	18
	O-3-2-3	956	25,026	1,398	2,92		42	30
	Среднее	1151			2,908		1,3	40

сивным ростом деформаций по сравнению со всеми предыдущими уровнями нагружения. При этом мгновенного и хрупкого разрушения, характерного для соединений деревянных элементов с применением клея, при испытаниях двухслойных соединений КМ-обклейка всех типов не наблюдалось. Разрушение происходило в результате совместного проявления двух факторов: в результате нарушения адгезионных связей между композиционным материалом и боковой поверхностью соединяемых деревянных элементов, что проявлялось в постепенном отрыве композиционного материала от основы, и в результате среза композиционного материала по швам образца. Разрушений деревянных элементов в составе образцов при разрушении соединений КМ-обклейка

не происходило. Результаты испытаний 1 серии образцов представлены в табл. 3.

Разрушение 2-й серии образцов происходило в результате проявления двух факторов: нарушения адгезионных связей между композиционным материалом и боковой поверхностью соединяемых деревянных элементов, что проявлялось в отрыве композиционного материала без его разрушения от основы, а также разрушения соединения «по древесине» в результате скалывания древесины вдоль волокон на отдельных участках композиционного материала. Результаты испытаний 2-й серии образцов представлены в табл. 4.

Разрушение 3-й серии образцов происходило в результате проявления двух факторов: нарушения

Таблица 5
Table 5

Результаты испытаний 3-й серии образцов соединения КМ-обклейка
Test results of the 3rd series of samples of the CM-gluing connection

Тип соед.	Марка образца	t_{max} , с	$t=t_{max}/38,2$, с	Lgt, с	Коэффициенты надежности		N_{max} , кН	N_{I-II} , кН
					γV по формуле (1)	по N_{I-II} [16]		
1	О-1-3-1	1591	41,649	1,620	2,87	1,3	57	36
	О-1-3-2	1310	34,293	1,535	2,89		49,6	33
	О-1-3-3	1184	30,995	1,491	2,9		46,3	30
	Среднее	1362			2,887		50,97	33
2	О-2-3-1	949	24,843	1,395	2,92	1,3	41,4	18
	О-2-3-2	943	24,686	1,392	2,92		39	15
	О-2-3-3	1085	28,403	1,453	2,91		45	12
	Среднее	992			2,913		41,8	15
3	О-3-3-1	1200	31,414	1,497	2,9	1,3	48	36
	О-3-3-2	1062	27,801	1,444	2,91		43,4	30
	О-3-3-3	751	19,66	1,294	2,94		36	30
	Среднее	1004			2,913		42,47	32

Таблица 6
Table 6

Характеристики прочности и деформативности соединений КМ-обклейка
Characteristics of strength and deformability of KM-adhesive joints

Тип КМ-обклейки	Количество слоев в КМ-обклейке	D_{II}/N_{II} на уровне РНС* образца, мм/кН	Сопротивление соединения КМ-обклейка сдвигу		
			По площади среза КМ, $R_{срКМ}$, МПа	Погонное, ТКМ, Н/мм	Отрыв КМ, $R_{отрКМ}$, МПа
Тип 1 КДА+Т13	2	0,00199	33,23	19,9	0,886
	4	0,00191	20,18	22,2	0,987
	6	0,00178	18,4	29,4	1,308
Тип 2 ПЭФ+Т13	2	0,00362	19,23	11,5	0,513
	4	0,00254	13,99	15,4	0,684
	6	0,00313	12,02	19,2	0,855
Тип 3 КДА+РСТ	2	0,00295	36,02	21,6	0,96
	4	0,00240	20,87	23	1,02
	6	0,00162	15,2	24,3	1,081

адгезионных связей между композиционным материалом и боковой поверхностью соединяемых деревянных элементов, что проявлялось в отрыве композиционного материала без его разрушения от основы, а также разрушения соединения «по древесине» в результате скалывания древесины вдоль волокон на отдельных участках композиционного материала. Результаты испытаний 3-й серии образцов представлены в табл. 5.

Все типы соединений КМ-обклейка по характеру работы, согласно определению [16], относятся к соединениям первой группы – с линейной зависимостью разности полных деформаций ΔD_{II} от усилия в пределах упругой работы соединения. За разрушающее усилие принимали уровень нагружения, при котором образец оказывался не способен к восприятию дальнейшего роста нагрузки. Разрушающую нагрузку фиксировали по остановке или падению показаний

силоизмерителя при непрерывном росте деформаций образца.

Оценку несущей способности и деформативности соединений по результатам испытаний проводили по методике [16]. По испытаниям определяли следующие прочностные и деформационные характеристики образцов соединений: разрушающую нагрузку N_{max} (кН); деформации полные D_{II} (мм); остаточные D_0 (мм); упругие D_y (мм) и разности полных деформаций ΔD_{II} (мм) образцов соединений на каждой ступени нагружения; по графику « $N-\Delta D_{II}$ » определяли нагрузку N_{I-II} (кН), соответствующую верхней границе области упругой работы образцов соединений; нагрузку N_d (кН), соответствующую расчетной несущей способности соединения. По общей продолжительности испытания t_1 (с) определяли так называемый требуемый коэффициент надежности γV к величине разрушающего усилия N_{max} . Поскольку

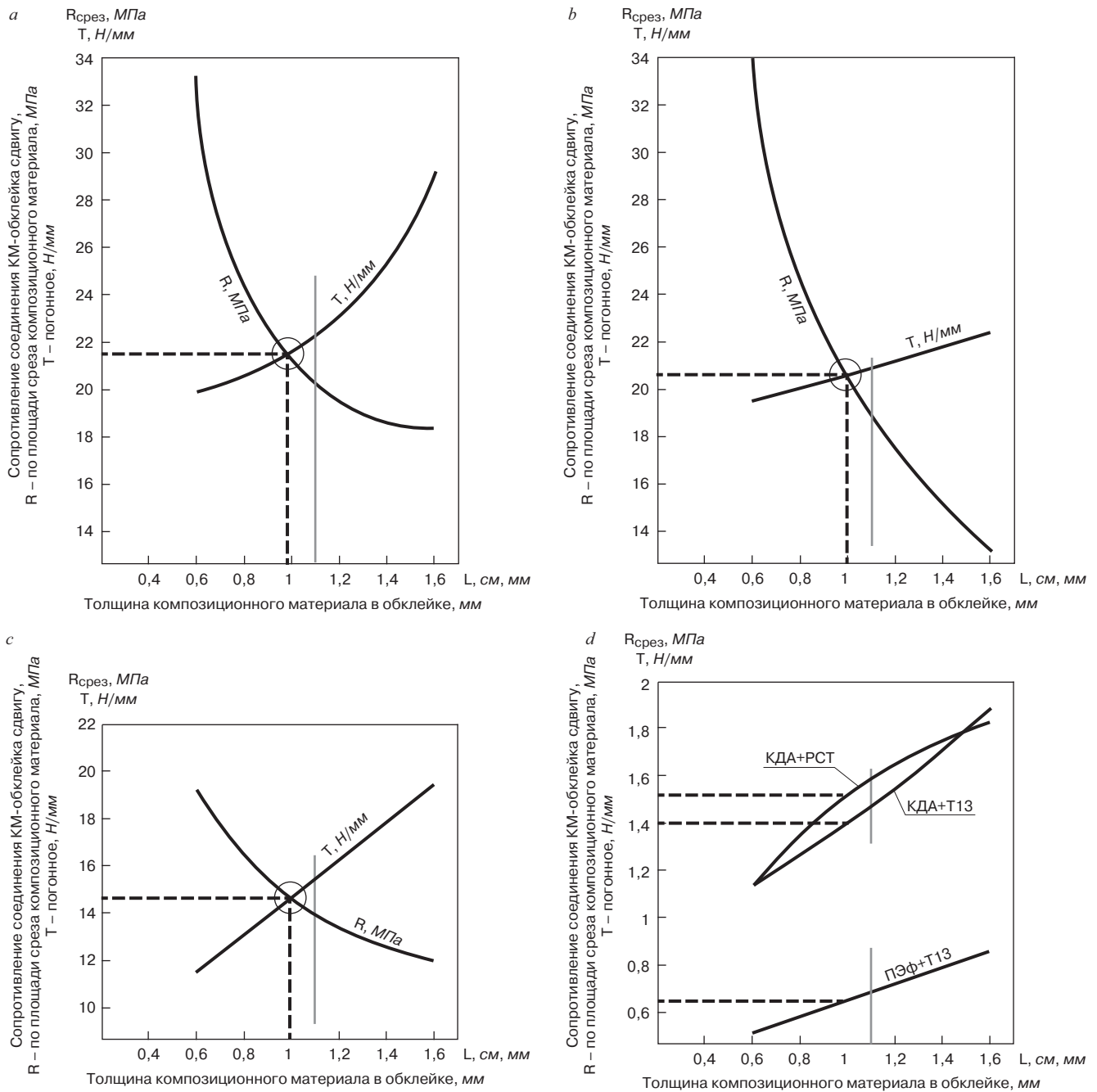


Рис. 5. Сопротивление сдвигу соединения КМ-обклейка в зависимости от толщины композиционного материала: *a* – КМ-соединение тип 1 (КДА+Т13); *b* – КМ-соединение тип 2 (ПЭф+Т13); *c* – КМ-соединение тип 3 (КДА+РСТ); *d* – сопротивление отрыву КМ от основания
Fig. 5. Shear resistance of the CM-bonding connection depending on the thickness of the composite material: *a* – CM-joint type 1 (KDA+T13); *b* – CM connection type 2 (PEf+T13); *c* – CM connection type 3 (KDA+PCT); *d* – resistance to separation of the CM from the base

разрушение образцов всех типов соединения КМ-обклейка носило признаки хрупкого разрушения, для оценки несущей способности соединений принимали коэффициент надежности, требуемый при хрупком разрушении:

$$\gamma V = 1,64 \cdot (1,94 - 0,116 \cdot \lg t), \quad (1)$$

где $t = t_{max}/38,2$ – время, приведенное к неизменному действию усилия Nt на образец. Тогда, используя методику ЦНИИСК [16], из эксперимента получали два значения, характеризующих расчетную несущую способность $N_{II} = R_{exp}$ образца соединения:

– по разрушающему усилию:

$$R_{exp.v} \leq N_{max}/\gamma V; \quad (2)$$

– по усилию, соответствующему верхней границе области упругой работы соединения:

$$R_{exp.v-II} \leq N_{I-II}/1,3. \quad (3)$$

Из двух полученных значений в качестве расчетной несущей способности образца соединения принимали наименьшее: $N_{II} = \min\{R_{exp.v}, R_{expI-II}\}$.

Для сравнительной оценки деформативности соединений определяли по интерполяции деформации

Таблица 7
Table 7

Расчетное сопротивление отрыву композиционного материала от деревянного элемента $R_{отрКМ}$
Calculated resistance to separation of the composite material from the wooden element $R_{sepКМ}$

Тип КМ	Толщина КМ	$R_{отрКМ}$, МПа
КДА-М+Т13 КДА-М+РСТ	до 1 мм	0,9
	от 1 мм до 1,6 мм	1
	более 1,6 мм	1,1
ПЭф+Т13	до 1 мм	0,5
	от 1 мм до 1,6 мм	0,68
	более 1,6 мм	0,85

полные $D_{II}N_{II}$ (мм) образцов на промежуточных уровнях нагружения, соответствующих расчетной несущей способности N_{II} образцов соединения, полные деформации D_{II-II} при нагрузке N_{I-II} , а также интенсивность роста деформаций в пределах расчетной несущей способности соединений $D_{II}N_{II}/N_{II}$ и в пределах верхней границы области упругой работы соединения — D_{II-II}/N_{I-II} (мм/кН).

Сопротивление соединений КМ-обклейка сдвигу оценивали по критериям напряженно-деформированного состояния при работе соединений под нагрузкой: по площади среза композиционного материала, по длине шва как погонное сопротивление сдвигу:

— как погонную несущую способность соединения — на 1 см (мм) длины шва:

$$TKM = N_{II}/n_{cp}L_{шва}, \quad (4)$$

где N_{II} — усилие, соответствующее расчетной несущей способности образца (кН (Н)); $n_{cp}=4$ — количество срезов КМ; $L_{шва}$ — длина шва в образце (см (мм));

— как сопротивление соединения сдвигающему усилию по отрыву композиционного материала от основания:

$$R_{отрКМ} = N_{II}/[n_{пл}(L_{шва} \cdot b)], \quad (5)$$

где $n_{пл}=2$ — количество плоскостей отрыва КМ;

— как сопротивление соединения сдвигающему усилию по срезу КМ:

$$R_{срКМ} = N_{II}/[n_{ср}(L_{шва} \cdot t_{КМ})], \quad (6)$$

где $(L_{шва} \cdot t_{КМ})$ — рабочая площадь поперечного сечения КМ на 1 срез в образце; b — ширина деревянного элемента.

Сводные результаты испытаний образцов всех типов соединений КМ-обклейка представлены в табл. 6.

Из данных табл. 6 видно, что с увеличением толщины композиционного материала происходит снижение сопротивления соединения КМ-обклейка сдвигу по критерию среза композиционного мате-

риала и увеличение сопротивления соединения КМ-обклейка сдвигу по критериям погонной несущей способности соединения на единицу длины шва и по отрыву композиционного материала от поверхности соединяемых деревянных элементов. Это объясняется тем, что разрушение соединений носит смешанный характер и преобладание того или иного фактора в работе соединения зависит от толщины композиционного материала. Очевидно, что увеличение толщины и соответственно несущей способности на срез композиционного материала приводят к усложнению характера работы и характера разрушения соединения, когда разрушение адгезионных связей между композиционным материалом и контактной поверхностью соединяемых деревянных элементов проявляется раньше, чем наступает разрушение композиционного материала обклейки.

Зависимости несущей способности соединений КМ-обклейка от толщины композиционного материала на образцах соединений 1, 2 и 3-го типов представлены на графиках рис. 5.

Данные рис. 5 показывают, что эффективная толщина композиционного материала для всех типов соединений КМ-обклейка составляет $t_{КМ} \approx 1$ мм, чему по результатам испытаний образцов соединений соответствует:

— расчетное сопротивление срезу композиционного материала для соединений тип 1 $R_{срКМ1}=21,5$ МПа, для соединений тип 2 $R_{срКМ2}=14,6$ МПа, для соединений тип 3 $R_{срКМ3}=22,6$ МПа;

— расчетное сопротивление отрыву композиционного материала от основания для соединений тип 1 $R_{отрКМ1}=1,4$ МПа, для соединений тип 2 $R_{отрКМ2}=0,65$ МПа, для соединений тип 3 $R_{отрКМ3}=1,5$ МПа.

С увеличением толщины композиционного материала меняется характер разрушения образцов, и в работе соединения КМ-обклейка начинает проявляться не только срез композиционного материала, но и отрыв обклейки от поверхности соединяемых деревянных элементов. В этом случае несущая способность соединения зависит от ширины площадок обклейки на соединяемых деревянных элементах, которые составляют в испытанных образцах $b_{обкл}=45$ мм. При эффективной толщине композиционного материала в соединении КМ-обклейка $t_{КМ}=1$ мм получаем соотношение между шириной обклеиваемых поверхностей $b_{обкл}$ деревянных элементов и толщиной композиционного материала $t_{КМ}/b_{обкл}=1/45$. Принимаем для соединения КМ-обклейка соотношение между шириной обклеиваемых поверхностей $b_{обкл}$ деревянных элементов и требуемой толщиной композиционного материала $t_{КМ}=1/45b_{обкл}$.

Соединения КМ-обклейка тип 1 и тип 3, выполненные на основе эпоксидной смолы КДА-М с отвердителем Этал-45, армирующей компоненты в виде стеклоткани Т13 (тип 1) и рулонного стеклопла-

стика РСТ (тип 3), обладают близкими по величине прочностными и деформационными характеристиками, которые предлагается объединить.

Обсуждение

В настоящей работе рассмотрен способ соединений деревянных элементов композиционными материалами на основе стеклоткани – КМ-обклейка. Для каждого вида соединения определяли прочностные характеристики в зависимости от напряженного состояния и от типа композиционного материала, примененного в соединении, а также деформационные характеристики, обуславливающие деформативность в пределах расчетной несущей способности и упругой работы соединений.

Основными нормируемыми характеристиками прочности соединения КМ-обклейка являются расчетные сопротивления соединений, которые определялись на основании оценки несущей способности соединений по методике [16] исходя из результатов испытаний по расчетной несущей способности образцов.

Для соединений КМ-обклейка установлены прочностные и деформационные характеристики, соответствующие расчетной несущей способности соединений:

1. Расчетное сопротивление срезу композиционного материала:

– для соединений тип 1 (КДА-М+Т13) и тип 3 (КДА-М+РСТ) – $R_{срКМ}=20$ МПа;

– для соединений тип 2 (ПЭФ+Т13) – $R_{срКМ}=14$ МПа.

2. Расчетное сопротивление отрыву композиционного материала от основания:

– для соединений тип 1 (КДА-М+Т13) и тип 3 (КДА-М+РСТ):

– для толщины композиционного материала до 1 мм $R_{отрКМ}=0,9$ МПа;

– для толщины КМ от 1 до 1,6 мм $R_{отрКМ}=1$ МПа;

– для толщины КМ более 1,6 мм $R_{отрКМ}=1,1$ МПа;

– для соединений тип 2 (ПЭФ+Т13):

– для толщины КМ до 1 мм $R_{отрКМ}=0,5$ МПа;

– для толщины КМ от 1 до 1,6 мм $R_{отрКМ}=0,68$ МПа;

– для толщины КМ более 1,6 мм $R_{отрКМ}=0,85$ МПа.

3. Деформативность соединений на уровне расчетной несущей способности:

– для соединений тип 1 и тип 3 $D_{п}/N_d=0,0021$ мм/кН;

– для соединений тип 2 $D_{п}/N_d=0,0031$ мм/кН.

На основании проведенных испытаний и обработки экспериментальных результатов установлены расчетные сопротивления соединения КМ-обклейка основным видам напряженного состояния, на которые работает соединение при восприятии сдвигающего усилия, в том числе расчетное сопротивление срезу композиционного материала по шву сплачивания и отрыву композиционного материала от поверхности деревянного элемента.

Расчетное сопротивление срезу композиционного материала $R_{срКМ}$:

– для соединений КМ-обклейка на основе эпоксидной матрицы и стеклоткани Т13 или стеклопластика РСТ $R_{срКМ}=20$ МПа;

– для соединений КМ-обклейка на основе полиэфирной матрицы и стеклоткани Т13 $R_{срКМ}=14$ МПа.

Расчетное сопротивление отрыву композиционного материала от деревянного элемента $R_{отрКМ}$ представлено в табл. 7.

Расчетную несущую способность соединения КМ-обклейка следует определять на срез композиционного материала по шву сплачивания и на отрыв композиционного материала от поверхности деревянных элементов по формулам:

А) из условия среза композиционного материала:

$$T_{срезКМ} = R_{срез} \cdot L_{КМ} \cdot t_{КМ} \cdot n_{ср}, \quad (7)$$

где $R_{срез}=R_{срКМ}/(\gamma m \cdot \gamma mn)$ – расчетное сопротивление КМ-соединения; $R_{срКМ}$ – расчетное сопротивление срезу композиционного материала; $\gamma m=1,2$ – коэффициент надежности по композиционному материалу в соединении КМ-обклейка; $\gamma mn=1,4$ – коэффициент надежности по способу изготовления соединения для ручного формования композиционного материала и эпоксидной матрицы холодного отверждения в условиях стройплощадки, $\gamma mn=1,1$ – в условиях организованного производства, $L_{КМ}=L_0-2 \times 50$ мм – расчетная длина КМ-обклейки; $t_{КМ}$ – толщина КМ-обклейки; $n_{ср}$ – количество расчетных срезов соединения КМ-обклейка на расчетном участке.

Расчетную длину КМ-обклейки принимать на 2×50 мм меньше фактической длины обклейки L_0 на расчетном шве: $L_{КМ}=L_0-2 \times 50$ мм участка и повреждения деревянной конструкции. Длину КМ-обклейки L_0 при разработке нового деревянного элемента составного сечения следует назначать не менее $1/4$ пролета создаваемого элемента.

Толщину композиционного материала $t_{КМ}$ в соединении КМ-обклейка следует назначать не менее:

$$t_{КМ} = 0,025 \cdot h_1 \cdot (h_{\min}/h_1) \text{ (мм)},$$

где h_1 – ширина обклеиваемой поверхности одной ветви составного деревянного элемента, мм; h_{\min} – наименьшая высота поперечного сечения одной ветви составного деревянного элемента, мм;

Б) из условия отрыва композиционного материала от поверхности деревянных элементов:

$$T_{отрКМ} = R_{отр} \cdot L_{КМ} \cdot h_1 \cdot n_{пл}, \quad (8)$$

где $R_{отр}=R_{отрКМ}/(\gamma m \cdot \gamma mn)$ – расчетное сопротивление КМ-соединения отрыву от поверхности деревянного элемента; $n_{пл}=2$ – количество плоскостей отрыва КМ от деревянного элемента на расчетном участке. Расчетную длину КМ-обклейки следует принимать на 2×50 мм меньше фактической длины обклейки L_0 на расчетном шве.

Выводы

На основе методики оценки несущей способности соединений деревянных конструкций [16] и проведенной обработки результатов испытаний образцов установлены прочностные характеристики, соответствующие расчетной несущей способности соединений КМ-обклейка.

Полные деформации на уровне расчетной несущей способности соединения КМ-обклейка составили $D_{п}=0,024-0,038$ мм, чему соответствует интенсивности роста деформаций в среднем $D_{п}/N_d=0,0019-0,0023$ мм/кН для соединений тип 1 и тип 3 и 0,0031 для соединений тип 2.

Определено рекомендуемое соотношение между шириной обклеиваемых поверхностей $b_{обкл}$ деревянных элементов и толщиной композиционного материала в КМ-обклейке $t_{КМ}=1/45b_{обкл}$.

Для обеспечения работы соединения КМ-обклейка из условия среза композиционного материала минимальная толщина слоя КМ в рабочем соединении должна составлять не менее $t_{КМ}=1$ мм.

Список литературы / References

1. Rutman U.L., Meleshko V.A. The generalization of the flexibility method for elastoplastic computation of rod systems. *Materials Physics and Mechanics*. 2017. Vol. 31, pp. 67–70.
2. Kozinets K.G., Kärki T., Varabanshchikov Yu.G., Lahtela V., Zotov D.K. Mechanical properties of sustainable wooden structures reinforced with basalt fiber reinforced polymer. *Magazine of Civil Engineering*. 2020. Vol. 100 (8). DOI: 10.18720/MCE.100.12
3. Togay A., Döngel N., Söğütü C., Ergin E., Uzel M., and Güneş, S. «Determination of the modulus of elasticity of wooden construction elements reinforced with fiberglass wire mesh and aluminum wire mesh. *BioResources*. 2017. Vol. 12. Iss. 2, pp. 2466–2478. DOI: 10.15376/biores.12.2.2466-2478
4. Trummer A., Luggin W.F. Holz+ hochfeste Fasern. Leistungssteigerung durch Bewehrung // *Holz + pro-Holz Austria*. 2005. No. 11. P. 24.
5. Blaß H.J., Romani M. Biegezugverstärkung von BS-Holz mit CFK- und AFK-Lamellen. *Bautechnik*. 2002. Vol. 79, No. 4, pp. 216–224.
6. Blaß H.J., Romani M. Tragfähigkeitsuntersuchungen an Verbundträgern aus BS-Holz und Faserverbundkunststoff-Lamellen. *Holz als Roh- und Werkstoff*. (2001). 2001. Vol. 59. No. 5, pp. 364–373. <https://doi.org/10.1007/s001070100225>
7. Lisatnikov M.S., Glebova T.O., Ageev S.P., Ivaniuk A.M. Strength of wood reinforced with a polymer composite for crumpling across the fibers. URL: libgen.org/ggfwzs.net/book/84486144/7c11d1. *International Conference on Materials Physics, Building Structures and Technologies in Construction, Industrial and Production Engineering (MPCPE 2020)*. 27–28 April 2020. Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs. IOP Conference Series Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 896. DOI 10.1088/1757-899X/896/1/012062
8. Zachary Christian, Kavan Shebli. Feasibility of strengthening glulam beams with prestressed basalt fibre reinforced polymers. Department of Civil and Environmental Engineering Division of Structural Engineering Steel and Timber Structures Chalmers University of Technology SE-412 96 Göteborg Sweden. <https://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/162909.pdf>
9. Стоянов В.О. Прочность и деформативность изгибаемых деревянных элементов, усиленных полимерными композитами: Дис. ... канд. техн. наук. М., 2018. 186 с.
9. Stoyanov V.O. Strength and deformability of bent wooden elements reinforced with polymer composites. Diss... Candidate of Science (Engineering). Moscow. 2018. 186 p.
10. Schober Kay-Uwe. Hochleistungskunststoffe für die tragwerksverstärkung von holzkonstruktionen im bestand. *Bausubstanz*. 2010. Vol. 4, pp. 38–43. DOI: 10.51202/2190-4278-2010-4-38
11. Geshanov I., Kachlakev D. Composite reinforce concrete-timber floor system externally strengthened with CFRP composites. *13th International Conference SFR*. Edinburg, Scotland. 2010, pp. 151–153.
12. Ascione L., Bonamini G., Benedetti A., Borri A. Guidelines for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening existing structures: timber structures. Italy. 2005. 58 p. DOI: 10.13140/RG.2.2.24325.58089
13. Franke S., Franke B., Harte A.M. Failure modes and reinforcement techniques for timber beams – State of the art. *Construction and Building Materials*. 2015. Vol. 97, pp. 2–13. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.06.021>
14. Ao Zhou, Lik-ho Tam, Zechuan Yu, Denvid Lau. Effect of moisture on the mechanical properties of CFRP–wood composite: An experimental and atomistic investigation. *Composites Part B: Engineering*. 2015. Vol. 71, pp. 63–73. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2014.10.051>
15. Lik-ho Tam, Ao Zhou, Zechuan Yu, Qiwen Qiu, Denvid Lau. Understanding the effect of temperature on the interfacial behavior of CFRP-wood composite via molecular dynamics simulations. *Composites Part B: Engineering*. 2017. Vol. 109, pp. 227–237. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.10.030>
16. Иванов Ю.М. Рекомендации по испытанию соединений деревянных конструкций / ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко. М.: Стройиздат, 1981. 40 с.
16. Ivanov Yu.M. Rekomendatsii po ispytaniyu soedinenii derevyannykh konstruktсии [Recommendations for testing connections of wooden structures / TsNIISK named after V.A. Kucherenko]. Moscow: Stroyizdat. 1981. 40 p.

УДК 691.316

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-818-10-109-115>

Г.В. КУЗНЕЦОВА, старший преподаватель (Kuznetzowa.gal@yandex.ru),
 Н.Н. МОРОЗОВА, канд. техн. наук (ninamor@mail.ru),
 Д.А. ИШМУХАМЕТОВ, А.Р. МУХАРЛЯМОВА, студенты

Казанский государственный архитектурно-строительный университет (420043, г. Казань, ул. Зеленая, 1)

Схемы укладки силикатных изделий на вагонетку с учетом упаковки и энергоэффективность автоклавной тепловой обработки

Современные рыночные условия диктуют требования не только к качеству продукции, но и к качеству упаковки. При обновлении формовочного оборудования заводов силикатного кирпича путем замены на современные гидравлические прессы требуется и новый подход к организации упаковки изделий и, как следствие, изменение схемы укладки изделий на запарочную вагонетку. Увеличение массы изделий – переход на выпуск блоков и перегородок, повышение качества внешнего вида изделий – требует автоматизации как перекладки изделий, так и упаковки. Компактность упаковки позволяет обеспечить сохранность товара при транспортировке. Приведен сравнительный анализ работы гидравлических прессов различных фирм по времени формования запарочной вагонетки. Рассмотрены существующие схемы укладки изделий на запарочную вагонетку с ручной перекладкой изделий у прессы и при упаковке, а также схемы, исключающие ручной труд. Приведены результаты расчетов энергоэффективности автоклавной обработки разработанных схем укладки изделий по сравнению с существующими. Установлено, что удельный расход пара на 1 тыс. шт. изделий со схемами укладки изделий на запарочные вагонетки, исключая ручной труд, возрастает на 2–4% для всех изделий, а общий расход тепла на цикл запарки сокращается для схем укладки изделий на запарочные вагонетки, исключая ручной труд, для одинарного кирпича на 9,3%, для утолщенного кирпича – от 14 до 24%, для камня пустотелого – на 17% и для блоков – на 29%.

Ключевые слова: силикатный кирпич, пресс гидравлический, кладка, схема, вагонетка, упаковка, автоклав, теплоноситель, пар.

Для цитирования: Кузнецова Г.В., Морозова Н.Н., Ишмухаметов Д.А., Мухарлямова А.Р. Схемы укладки силикатных изделий на вагонетку с учетом упаковки и энергоэффективность автоклавной тепловой обработки // *Строительные материалы*. 2023. № 10. С. 109–115. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-818-10-109-115>

G.V. KUZNETSOVA, Senior Lecturer (Kuznetzowa.gal@yandex.ru), N.N. MOROZOVA, Candidate of Sciences (Engineering) (ninamor@mail.ru), D.A. ISHMUKHMETOV, A.R. MUHARLJAMOVA, Students
 Kazan State University of Architecture and Engineering (1, Zelenaya Street, Kazan, 420043, Republic of Tatarstan, Russian Federation)

Laydown Diagrams of Silicate Products on the Trolley, Taking into Account the Packaging and Energy Efficiency of Autoclave Heat Treatment

Currently, there are great opportunities to re-equip the technology of enterprises. Modern market conditions dictate their requirements not only to the quality of products, but also to the quality of packaging. When updating the press equipment to modern hydraulic presses, an updated approach to the organization of packaging of products is also required and, as a result, a change in the scheme of laying products on a steam trolley. An increase in the mass of products – the transition to the production of blocks and partitions, an increase in the quality of the appearance of products raises the question of abandoning manual labor at the press when rearranging products and when packing. The compactness of the packaging makes it possible to ensure the safety of the goods during storage and transportation. A comparative analysis of the operation of hydraulic presses of various companies by the time of forming the steam trolley is given. The existing schemes of laying products on a steaming trolley with manual rearrangement of products at the press and during packaging, as well as new proposed schemes excluding manual labor, are considered. The results of calculations on the energy efficiency of autoclave treatment of the developed schemes for laying products with existing ones are presented. It is established that the specific steam consumption per one thousand pieces of products with schemes for laying products on steam trolleys excluding manual labor increases by 2–4% for all products, and the total heat consumption for the steam cycle is reduced for schemes for laying products on steam trolleys excluding manual labor for single bricks by 9.3%, for thickened bricks from 14 up to 24%, for hollow stone by 17% and for blocks by 29%.

Keywords: sand-lime brick, hydraulic press, masonry, diagram, trolley, packaging, autoclave, coolant, steam.

For citation: Kuznetsova G.V., Morozova N.N., Ishmukhmetov D.A., Muharlamova A.R. Laydown diagrams of silicate products on the trolley, taking into account the packaging and energy efficiency of autoclave heat treatment. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2023. No. 10, pp. 109–115. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-818-10-109-115>

В структуре потребления мелкоштучных стеновых материалов прессованные изделия автоклавного твердения занимают третье место. В видовой структуре производства строительного кирпича в 2021 г. доля керамического кирпича составила 71%, доля силикатного кирпича – 29% [1, 2].

Техническое перевооружение заводов силикатного кирпича позволило существенно расширить ассортимент выпускаемой продукции и повысить ее качество [3]. В основном на российских силикатных заво-

дах установлено российское, немецкое и китайское прессовое оборудование, позволяющее получать изделия с высоким качеством лицевых поверхностей, для сохранения которых в процессе укладки на запарочные вагонетки, а затем при доставке потребителю необходимо минимизировать ручной труд и автоматизировать упаковку изделий на паллеты [4].

Следовательно, при обновлении прессового оборудования требуется обновление упаковки изделий и, как следствие, схемы укладки изделий на запароч-

ную вагонетку. Увеличение массы мелкоштучных изделий (переход на выпуск блоков и перегородок) и повышение требований к их внешнему виду требуют отказа от ручного труда у прессы и при упаковке. Правильная укладка изделий позволяет обеспечить сохранность товара при хранении на складе и транспортировке.

Традиционная укладка силикатного кирпича – прямоугольник и полукруглость на жесткую основу, в качестве которой используется деревянный поддон. Для создания жесткости упаковки изделий применяют увязку металлической лентой или стрейч-пленкой. Однако сегодня все чаще используют более современные упаковочные материалы. Основными поставщиками упаковочного оборудования также являются немецкие и китайские компании [5]. Автоматизированные линии упаковки позволяют отказаться от мостовых кранов на складе готовой продукции и заменить их на погрузчики.

Современные линии упаковки готовой продукции требуют разработки новых схем укладки кирпича-сырца на запарочные вагонетки. **Целью данной работы является оптимизация схем укладки силикатных изделий на запарочную вагонетку и оценка их влияния на энергоёмкость автоклавной обработки.**

Для достижения поставленной цели:

- разработаны варианты компактных схем укладки сырца силикатного кирпича и блоков среднего формата на запарочные вагонетки, обеспечивающие простоту перестановки изделий на конвейерную линию упаковки и отсутствие ручного труда;
- произведен расчет затрат энергоресурсов на цикл автоклавной обработки для существующих и разработанных схем укладок;
- выполнен сравнительный анализ энергозатрат на автоклавирование.

Результаты и обсуждение

Как указано выше, техническое перевооружение заводов силикатного кирпича идет по пути замены устаревших револьверных прессов на гидравлические прессы российских, немецких и китайских компаний с двухсторонним и двух- и четырехтактным формованием. При высоте изделий до 140 мм применяются прессы одностороннего прессования, а для изделий большей высоты – двухстороннего. Широко используются прессы с многогнездовыми формами, так как они позволяют значительно удлинить цикл формования, особенно процесс уплотнения с длительной выдержкой сырца под давлением. Регулирование процесса прессования за счет корректировки параметров уплотнения гарантирует высокое качество производимых изделий. Работа гидравлических прессов в отличие от револьверных организуется без накопительного конвейера и перекладки сырца, что способствует его сохранности. Высокая производительность гидравлических прессов и возможность их быстрой переналадки на изготовление изделий другого формата, а также его многогнездо-

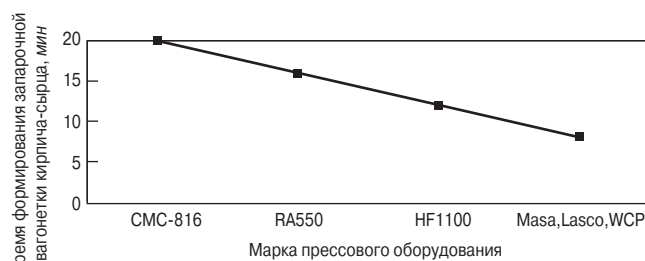


Рис. 1. Время формирования запарочной вагонетки кирпича-сырца на прессах разных фирм

Fig. 1. The formation time of the raw brick steaming trolley on presses of different firms

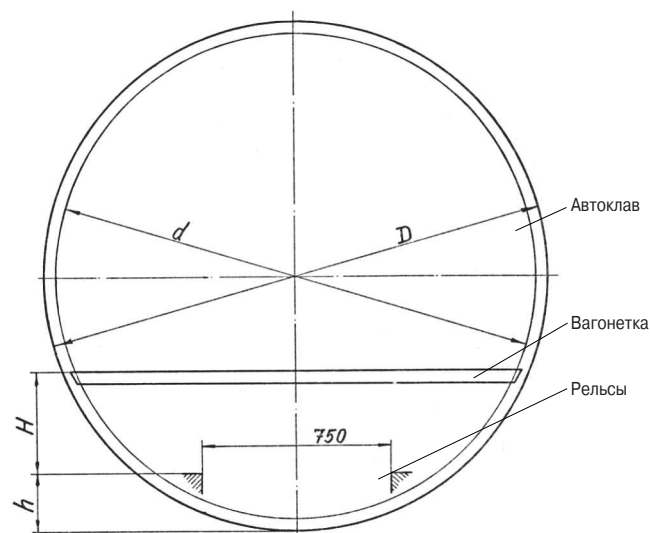


Рис. 2. Схема расположения вагонетки и рельсов в автоклаве

Fig. 2. Layout of the trolley and rails in the autoclave

Таблица 1
Table 1

Базовые размеры автоклавов заводов силикатного кирпича, мм
Basic dimensions of autoclaves of silicate brick plants, mm

Условное обозначение	Существующие		Принятые в расчетах	
	на отечественных заводах	на заводах поставки ПНР (Польша) 1970-х гг.	на отечественных заводах	на заводах поставки ПНР (Польша) 1970-х гг.
h	170–260	230–295	226	279
H	360–450	390–530	400	450
D	2000	1968	2000	1968
d	1900	1868	1900	1868

вые формы сократили время съема и укладки изделий на запарочные вагонетки с 20 до 12 мин, а в некоторых случаях до 8 мин.

На производстве выполнен хронометраж формования и укладки кирпича-сырца на запарочную вагонетку на прессах марок CMC-816, RA550, HF1100 и прессах немецких фирм типа Masa, Lasco, WCB для мелкого формата. Данные представлены на рис. 1.

Как видно из представленных результатов (рис. 1), скорость формирования запарочной вагонетки кир-

Таблица 2
Table 2

Количества изделий на вагонетке с учетом максимального использования габаритов автоклава
The number of products on the trolley, taking into account the maximum use of the dimensions of the autoclave

Кирпич, шт. усл. кирпича	Утолщенный		Камень пустотелый, шт. усл. кирпича	Блоки, шт. усл. кирпича, размером, мм		
	на ребро	на постель		250×250×188	250×250×250	300×250×250
936	934	891	850	795	851	681
	842					

Таблица 3
Table 3

Количество изделий на вагонетках с учетом упаковок
Number of products on trolleys, including packaging

Кирпич, шт. усл. кирпича	Утолщенный		Камень пустотелый, шт. усл. кирпича	Блоки, шт. усл. кирпича, размером, мм		
	на ребро	на постель		250×250×188	250×250×250	300×250×250
728	810	756	801	720	756	605
	680					

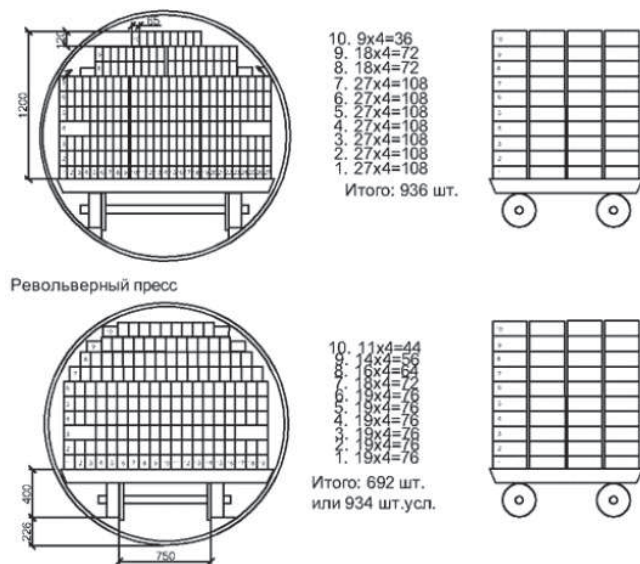


Рис. 3. Варианты укладки одинарного и утолщенного кирпича на вагонетку с револьверного пресса

Fig. 3. Options for laying single and thickened bricks on a trolley from a revolver press

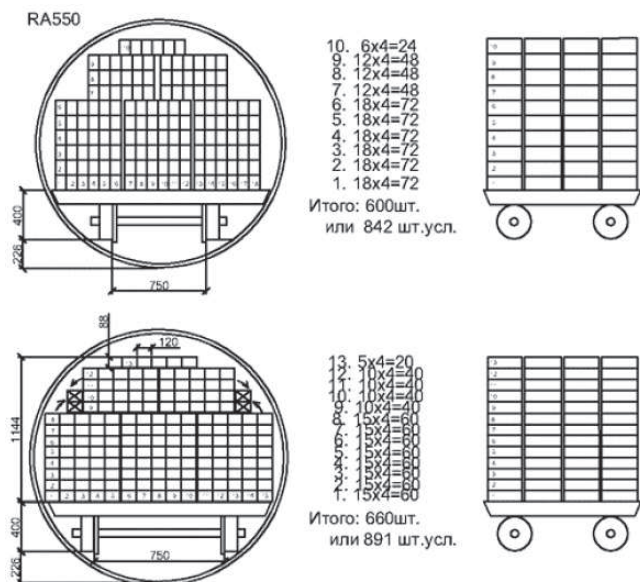


Рис. 4. Варианты укладки одинарного и утолщенного кирпича на вагонетку с пресса марки RA550

Fig. 4. Options for laying single and thickened bricks on a trolley from the RA550 brand press

пичом-сырцом на современных импортных гидравлических прессах возрастает почти в два раза. Современные гидравлические прессы имеют ограждения или комплектуются датчиком движения в зоне съема кирпича-сырца со стола пресса и переноса его на запарочную вагонетку, которые автоматически останавливаются при попытке человека войти в зону переноса кирпича-сырца на вагонетку. Ручная перекладка кирпича или изменение схемы укладки вручную у пресса становится невозможной.

Схема формирования укладки изделий на запарочную вагонетку зависит от геометрических размеров автоклава. На заводах силикатного кирпича широко распространены польские автоклавы, которые были

поставлены в Россию еще в 1970-х гг. Схема расположения вагонетки и рельсов в таком автоклаве представлена на рис. 2, а условные обозначения в табл. 1.

При использовании револьверных прессов задача заключалась в максимальном размещении сырца на вагонетке с учетом габаритов автоклава. При этом использовался ручной труд. Автомат-укладчик револьверного пресса снимал и переворачивал кирпичи на ложковую грань. Автомат формовал ряд и перекалывал его на вагонетку. На запарочную вагонетку переносились 10 рядов кирпича и устанавливались в пирамиду. Всего в одной такой пирамиде укладывалось 232 шт. кирпича, а на платформе вагонетки устанавливалось четыре пирамиды. В этом случае количество изделий на вагонетке составляло 928 шт. кирпичей [8].

Оператор пресса вручную снимал кирпич с верхних рядов. Для устойчивости на уровне третьего или четвертого ряда делалась «перевязка», т. е. поворот кирпича-сырца на 90°. На рис. 3 и 4 представлена схема укладки одинарного и утолщенного кирпича на вагонетку. Впоследствии количество кирпича на вагонетке изменяли путем лучшей комплектации рис. 5.

Количество уложенного на запарочную вагонетку одинарного кирпича-сырца составляет 936 шт. В случае прессования утолщенного кирпича (рис. 3) количество в пересчете на одинарный кирпич составило 934 шт. усл. кирпича.

Применение в технологии гидравлического пресса марки RA550 позволило прессовать кирпичи на ребро, и их количество на вагонетке достигло 842 шт.

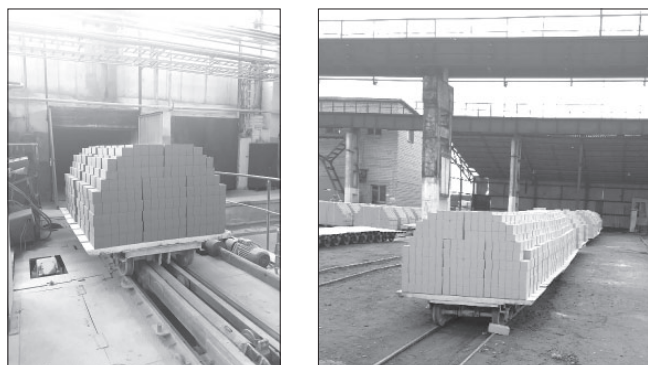


Рис. 5. Укладка изделий с применением ручного труда
Fig. 5. Laying of products using manual labor

Таблица 4
Table 4

Расход тепла на цикл запарки изделий в автоклаве
Heat consumption for the cycle of steaming products
in an autoclave

Количество изделий на вагонетке, шт. усл. кирпича	Количество пара на цикл запарки, кг	Количество пара на нагрев свободного пространства, %	Количество пара для нагрева сухой массы изделий, %	Удельный расход пара, кг/тыс. шт. усл. кирпича
Одинарный кирпич				
936	4517,8	4,7	58,6	344,7
728*	3644	6,8	55	357,5
Утолщенный кирпич, укладываемый на ребро				
934	4509,4	4,7	58,5	344,8
842	4122,9	5,5	57,1	349,7
810*	3988,5	5,9	56,6	351,7
680*	3442,3	7,5	54	361,6
Утолщенный кирпич, укладываемый на постель				
891	4328,7	5,1	57,9	347
756*	3761,6	6,5	55,6	355,4
Камень				
850	3186,1	6,9	52,7	267,7
801*	3036,2	7,5	51,7	270,6
Блоки				
795	2954,3	7,7	51,1	265,4
851	3062,9	7,1	52	257
681	2389,2	10,1	46,5	250,6
720*	2730,9	8,8	49,4	270,9
756*	2786,3	8,4	49,9	263,2
605*	2188	11,5	44,3	258,3

* С учетом упаковки без применения ручного труда.

усл. кирпича, а укладка кирпича на постель и дополнительно применение ручного труда позволили увеличить их число до 891 шт. усл. кирпича.

Гидравлические прессы марки RA550 позволили производить силикатный камень с размерами 250×120×138 мм. Предполагалась ручная перекладка изделий при формировании схемы укладки, в количественном выражении она составила для камня 850 шт. усл. кирпича.

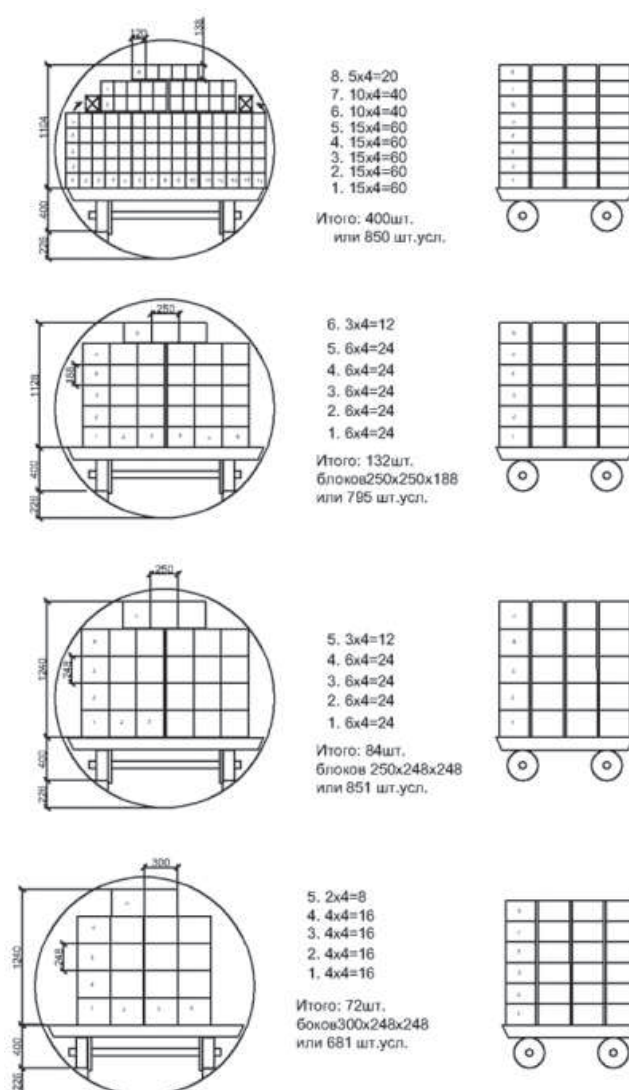


Рис. 6. Варианты схем укладки камня и блоков на вагонетку
Fig. 6. Variants of schemes for laying stone and blocks on a trolley

Установка современных прессов немецких фирм и расширение номенклатуры изделий потребовали разработать новые схемы укладки с выполнением традиционного условия максимального заполнения автоклава. На рис. 6 представлены схемы упаковок на запарочные вагонетки блоков размером 250×250×188; 250×250×250 и 300×250×250 мм.

Сводная таблица по количеству изделий при разных схемах укладки и с использованием ручного труда перекладки изделий у прессы приведена в табл. 2.

Далее разработаны схемы укладки прессованных изделий на вагонетку, учитывающие расположение вагонетки и рельсов в автоклаве, а также полную автоматизацию процесса упаковки. Результаты представлены на рис. 7, 8.

Как видно из рис. 6, схема укладки мелкого формата — *одинарного кирпича* — включает две упаковки по 374 кирпича (728 кирпичей). Если кирпич *утолщенный*, то получается два варианта при укладке на ребро: три упаковки по 200 кирпичей (600 кирпичей); 3,5 упаковки по 144 кирпича (504 кирпича), или 7 упа-

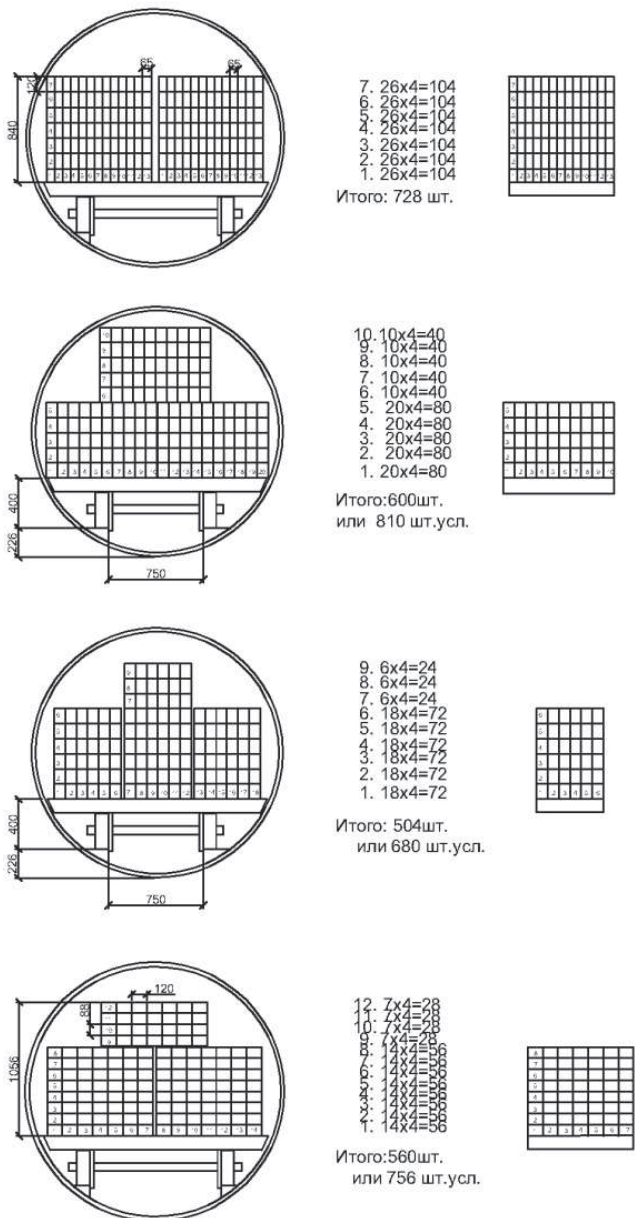


Рис. 7. Схемы укладки кирпича с учетом вида упаковки и минимальной механизированной укомплектовки
Fig. 7. Schemes of laying bricks, taking into account the type of packaging and minimal mechanized staffing

ковок на двух вагонетках. И вариант укладки на постель: 2,5 упаковки по 224 шт. утолщенного кирпича (560 кирпичей), или 5 упаковок на двух вагонетках.

Как видно из рис. 7, при укладке пустотелого камня получаем две упаковки по 7 шт. по горизонтали и 6 рядов по высоте в 4 ряда с другой стороны (укладка по длине 250 мм), т. е. в одной упаковке 168 шт. камня. И половина упаковки комплектуется с половиной другой вагонетки. В итоге получаем с двух вагонеток 5 упаковок.

Укладка блоков среднего формата может быть выполнена по 2 упаковки:

– для блоков размером 250×250×188 мм – 3 шт. по горизонтали и 5 рядов по высоте и в 4 ряда по ширине. В одной упаковке 60 блоков;

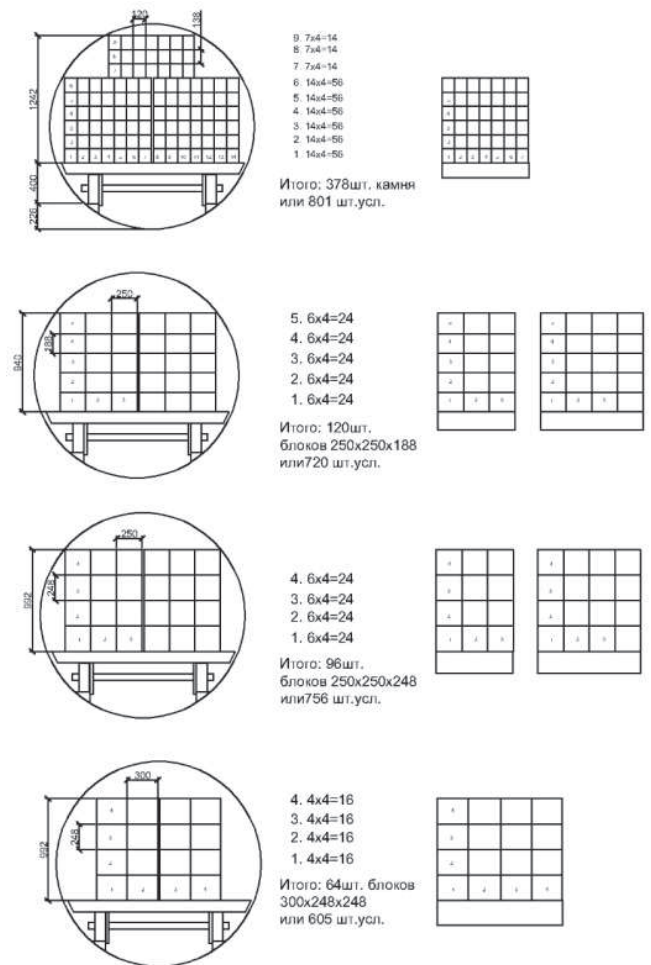


Рис. 8. Схемы укладки камня и блоков с учетом упаковки
Fig. 8. Schemes of laying stone and blocks, taking into account packaging

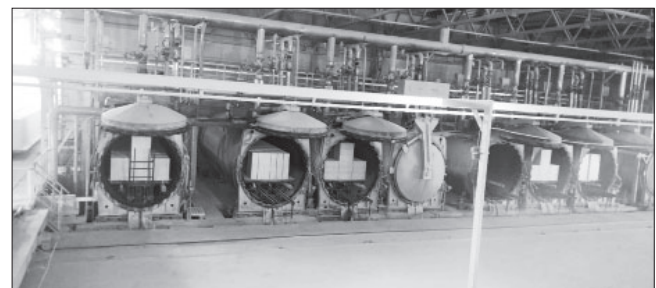


Рис. 9. Загрузка изделий в автоклав по схеме с учетом упаковки
Fig. 9. Loading of products into the autoclave according to the scheme, taking into account the packaging

– для блоков размером 250×250×250 мм – 3 шт. по горизонтали и 4 ряда по высоте и ширине. В одной упаковке 48 блоков;

– для блоков размером 300×250×250 мм – 2 шт. по горизонтали и 4 ряда по высоте и ширине. В одной упаковке 32 блока.

Сводная таблица по количеству изделий при разных схемах укладки и без использования ручного труда приведена в табл. 3 и на рис. 9.

С использованием программы Excel произведены расчеты по энергоэффективности автоклавной обработки.



Рис. 10. Линия упаковки изделий
Fig. 10. Product packaging line

Таблица 6
Table 6

Результаты термодинамических процессов
Results of thermodynamic processes

Показатель	Термодинамические процессы	
	Изохорный	Изобарный
Давление в автоклаве-источнике, МПа	0,27–0,33	0,16–0,2
Температура нагрева сырца в автоклаве, °С	30–40	41–56
Количество рекуперированного тепла, кДж/цикл	1,9–2,2 10 ³	2,6–3,3 10 ³

Таблица 7
Table 7

Анализ эффективности разработанных схем упаковок по использованию ручного труда
Analysis of the effectiveness of the developed packaging schemes for the use of manual labor

Изделие	Количество изделий на вагонетке, тыс. шт. усл. кирпича	Наличие ручного труда по перекладке изделий	
		После прессования и при укладке на вагонетку	После автоклавной обработки при упаковке изделий
Одинарный кирпич	936	Ручной труд	Ручной труд
	728*	–	–
Утолщенный кирпич, укладываемый на ребро	934	Ручной труд	Ручной труд
	842	Ручной труд	Ручной труд
	810*	–	–
	680*	–	–
Утолщенный, укладываемый на постель	891	Ручной труд	Ручной труд
	756*	–	–
Камень	850	Ручной труд	Ручной труд
	801с*		
Блок	795	Ручной труд	Ручной труд
	851	Ручной труд	Ручной труд
	681	Ручной труд	Ручной труд
	720*	–	–
	756*	–	–
	605*	–	–

* С учетом упаковки.

Таблица 5
Table 5

Сравнительные данные по расходу тепла в автоклаве
Comparative data on heat consumption in an autoclave

Изделие	Количество изделий на вагонетке, тыс. шт. усл. кирпича	Количество тепла на запарку в зависимости от схемы укладки, %
Одинарный кирпич	936	100
	728*	80,7
Утолщенный кирпич, укладываемый на ребро	934	100
	842	91,4
	810*	88,4
Утолщенный, укладываемый на постель	680*	76,3
	891	100
Камень	756*	86,9
	850	96,3
Блок	801*	91,8
	795	96,5
	851	100
	681	78,0
	720*	89,2
	756*	86,9
605*	71,4	

* С учетом упаковки без применения ручного труда.

В расчетах учитывались следующие данные:

- объем свободного пространства автоклава;
- расход тепла на нагрев сухой массы изделий;
- расход тепла на цикл запарки;
- удельный расход теплоносителя на 1 тыс. шт. усл. кирпича.

Результаты расчета для различных видов прессованных изделий представлены в табл. 4. Методика расчета затрат тепловой энергии приведена в пособии [8, 9].

Как видно из расчетов, уменьшение количества изделий на вагонетке приводит к увеличению свободного пространства и количества тепла на его нагрев.

Уменьшение же количества изделий, связанное с автоматизацией операции упаковки, приводит к снижению расхода тепла на нагрев изделий. Расход тепла на цикл запарки сокращается в зависимости от вида изделий. Для одинарного кирпича расход тепла на один цикл запарки в автоклаве составляет 9,3%, для утолщенного – от 14 до 24%; для камня – 17% и для блоков – 29%.

Полученные результаты показали, что удельный расход пара на 1 тыс. шт. изделий возрастает на 2–4% для всех видов. Результаты сравнительного анализа расхода пара на цикл запарки автоклава, заполненного вагонетками с изделиями, с учетом упаковки, относительно к расходу тепла на цикл запарки автоклава, заполненного вагонетками с изделиями без учета упаковки, представлены в табл. 5.

Снижения удельного расхода пара можно достичь за счет его перепуска. Проведение перепуска при сообщении автоклава-приемника с атмосферой позволяет получить более эффективный перепуск пара. При этом в автоклаве-приемнике в течение всего процесса перепуска пара давление практически равно атмосферному, а также при одинаковом конечном перепаде давления между ним и автоклавом-источником эффективность рекуперации тепла повышается. Хотя автоклав-приемник соединен с атмосферой, поступающий в него пар практически полностью конденсируется и его утечка незначительна.

Проведенные проверки показали, что давление в автоклаве-источнике к концу перепуска может достигать 0,16–0,2 вместо 0,27–0,33 МПа. Температура нагрева сырца составляет 41–56°C вместо 30–40°C. Тогда дополнительное тепло составит 0,7–1,1 кДж/цикл, или 37–50%.

Эффективность полученных результатов разработанных схем упаковок изделий на вагонетки не только по энергозатратам, но и по использованию ручного труда после прессования и снятия с пресса при укладке на автоклавную вагонетку приведена в табл. 7.

Как известно из практики, ручной труд в технологии прессования силикатных изделий связан с приданием устойчивости кладки при упаковке и ее транспортировании. Это достигается поворотом определенных вертикальных рядов, а также поворотом верхних рядов на постель с ребра, снятием по одному изделию с ряда и т. п. Как уже говорилось ранее, ручной труд в зоне переноса кирпича-сырца с гидравлических прессов запрещен в связи с большой скоростью работы пресса, а ручной труд после автоклавной обработки при упаковке связан с повреждением изделий при повороте и перекладке.

Установлено следующее:

– разработанные схемы укладки изделий на запорочные вагонетки не требуют ручного труда у гидравлического пресса и в процессе упаковки (рис. 10);

– удельный расход пара на 1 тыс. шт. изделий с предложенными схемами укладки изделий на запорочные вагонетки возрастает на 2–4% для всех видов изделий;

– общий расход тепла на цикл запорки сокращается для одинарного кирпича на 9,3%, для утолщенного – от 14 до 24%, для камня на 17% и для блоков на 29%.

– доказана энергоэффективность разработанных схем укладки изделий на запорочную вагонетку.

Список литературы

1. PROрынок. Кирпич. Август 2021. http://www.stroyamat.ru/articles/tb-6-2021/pro_market_kirpich_2021_08.pdf
2. Семёнов А.А. Итоги развития российского рынка стеновых материалов в 2021 г. // *Строительные материалы*. 2022. № 3. С. 44–45. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-800-3-44-45>

3. Шмитько Е.И., Верлина Н.А. Процессы прессформования и их влияние на качество кирпича-сырца // *Строительные материалы*. 2015. № 10. С. 5–7.
4. Профессиональное оборудование для производства и упаковки силикатного кирпича // *Строительные материалы*. 2015. № 10. С. 25–26.
5. Автоматизация процесса упаковки силикатного кирпича полимерными лентами. Альтернатива упаковке пакетов в термоусадочную пленку // *Строительные материалы*. 2015. № 10. С. 27.
6. Хавкин Л.М. Технология силикатного кирпича. М.: Строиздат, 2011. 231 с.
7. Мухина Т.Г. Производство силикатного кирпича. М.: Высшая школа, 1967. 125 с.
8. Кузнецова Г.В., Морозова Н.Н. Технология силикатных стеновых ячеистых материалов автоклавного твердения: Учебное пособие. Казань: Издательство КГАСУ, 2016. 120 с.
9. Золотонос Я.Д., Горская Т.Ю., Мартынов П.О. Математическая модель теплообменника с пружинно-винтовым каналом, выполненным из элементов вида ОВОИД // *Известия КГАСУ*. 2018. № 1 (43). С. 171–178.

References

1. PROry'nok. Kirpich. avgust 2021 [PROmarket. Brick. August 2021]. http://www.stroyamat.ru/articles/tb-6-2021/pro_market_kirpich_2021_08.pdf
2. Semenov A.A. Results of the development of the Russian wall materials market in 2021. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2022. No. 3, pp. 44–45. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-800-3-44-45>
3. Shmit'ko E.I., Verlina N.A. Press-molding processes and their influence on adobe brick quality. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2015. No. 10, pp. 5–7.
4. Professional equipment for manufacturing and packing of silicate brick. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2015. No. 10, pp. 25–26.
5. Automation of silicate brick packing process with polymeric tapes. Alternative to packages packing with heat-shrink tape. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2015. No. 10, pp. 27.
6. Khavkin L.M. *Technologiya silikatnogo kirpicha* [Sand-lime brick technology]. Moscow: Stroyizdat. 2011. 231 p.
7. Mukhina T.G. *Proizvodstvo silikatnogo kirpicha* [Production of sand-lime bricks]. Moscow: Vysshaya shkola. 1967. 125 p.
8. Kuzneczova G.V., Morozova N.N. *Technologiya silikatny'x stenovy'x yacheisty'x materialov avtoklavnogo tverdeniya: uchebnoe posobie* [Technology of silicate cellular wall materials of autoclave hardening]. Kazan': Izdatel'stvo KGASU. 2016. 120 p.
9. Zolotonosov Ya.D., Gorskaya T.Yu., Martynov P.O. Mathematical model of a heat exchanger with a spring-screw channel made of elements of the OVOID type. *Izvestiya KSUACE*. 2018. No. 1 (43), pp. 171–178.

И.О. РАЗОВ, канд. техн. наук (razovio@mail.ru), В.Г. СОКОЛОВ, д-р техн. наук,
А.В. ДМИТРИЕВ, канд. техн. наук, С.А. ЕРЕНЧИНОВ, канд. техн. наук

Тюменский индустриальный университет (625000, г. Тюмень, ул. Володарского, 38)

Предложение по устройству перекрытия при возведении зданий с помощью аддитивных технологий

Предложено решение по устройству перекрытия малоэтажного здания методом поэлементной печати сегмента на строительном 3D-принтере с последующим поворотом конструкции в проектное положение. В качестве объекта исследования принята поворотная секция перекрытия, состоящая из верхнего и нижнего поясов, соединенных между собой волнообразным элементом («соединительной решеткой»). Для объекта исследования установлено, что при расчете методом конечных элементов способ моделирования «пластинками» (тип 42/44) + АЖТ в соответствующих местах сокращает трудоемкость создания расчетной модели по сравнению с моделированием объемными телами (тип 36) при сохранении идентичных результатов расчета. При определении оптимальной конфигурации «соединительной решетки» установлено, что волнообразный соединительный элемент имеет преимущества по сравнению с перекрестно-волнообразным элементом и перпендикулярным соединительным элементом. Также в данной работе сделан вывод об оптимальном угле наклона «соединительной решетки» по отношению к поясам, который составляет 26–27°.

Ключевые слова: аддитивные технологии в строительстве, строительная 3D-печать, роботизированная экструзия.

Статья подготовлена в рамках реализации государственного задания в сфере науки на выполнение научных проектов, реализуемых коллективами научных лабораторий образовательных организаций высшего образования, подведомственных Минобрнауки России по проекту «Новые материалы и технологии возведения зданий, сооружений и их элементов с применением роботизированных аддитивных систем» (№ FEWN-2023-0004).

Для цитирования: Разов И.О., Соколов В.Г., Дмитриев А.В., Еренчинов С.А. Предложение по устройству перекрытия при возведении зданий с помощью аддитивных технологий // *Строительные материалы*. 2023. № 10. С. 116–120.

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-818-10-116-120>

I.O. RAZOV, Candidate of Sciences (Engineering) (razovio@mail.ru), V.G. SOKOLOV, Doctor of Sciences (Engineering),
A.V. DMITRIEV, Candidate of Sciences (Engineering), S.A. ERENCHINOV, Candidate of Sciences (Engineering)
Tyumen Industrial University (38, Volodarskogo Street, Tyumen, 625000, Russian Federation)

Proposal for the Installation of the Overlap During the Construction of Buildings Using Additive Technologies

A solution is proposed for the installation of overlap of a low-rise building by the method of element-by-element segment printing on a 3D construction printer with subsequent rotation of the structure to the design position. The object of the study is a rotating section of the overlap, consisting of upper and lower belts connected by a wave-like element ("connecting grid"). For the object of the study, it was found that when calculating by the finite element method, the method of modeling with "plates" (type 42/44) + AJT in the appropriate places reduces the complexity of creating a computational model compared to modeling with volumetric bodies (type 36) while maintaining identical calculation results. When determining the optimal configuration of the "connecting grid", it was found that the wave-shaped connecting element has advantages over the cross-wave element and the perpendicular connecting element. Also in this paper, a conclusion is made about the optimal angle of inclination of the "connecting grid" in relation to the belts, which is 26–27°.

Keywords: additive technologies in construction, 3D construction printing, robotic extrusion.

The article was prepared as part of the implementation of the state task in the field of science for the implementation of scientific projects realized by the teams of scientific laboratories of educational institutions of higher education subordinate to the Ministry of Education and Science of the Russian Federation under the project "New materials and technologies for the construction of buildings, structures and their elements using robotic additive systems" (No. FEWN-2023-0004).

For citation: Razov I.O., Sokolov V.G., Dmitriev A.V., Erenchinov S.A. Proposal for the installation of the overlap during the construction of buildings using additive technologies. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2023. No. 10, pp. 116–120. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-818-10-116-120>

Известны общие сведения о состоянии аддитивных технологий [11–12], при этом отсутствуют конкретные положения с расчетными данными и применяемыми конструктивными решениями в области 3D-печати при возведении малоэтажных зданий, в частности при устройстве перекрытия [1–8]. Лишь некоторые работы направлены на конкретные конструктивные и технологические решения по устройству элементов перекрытия. Например, в [9] предлагается метод печати перекрытия в вертикальном положении «на земле» с последующим монтажом в проектное положение посредством подъемных меха-

низмов (рис. 1), однако технология работ при этом не описывается. При таком способе устройства перекрытия возникает ряд вопросов, связанных с сохранением ее работоспособного состояния при подъеме, повороте и установке в проектное положение, к тому же требуются подъемные механизмы высокой грузоподъемности. В [10] предложен метод выполнения конструкции балки длиной 8–10 м, при котором вначале печатается «опалубка» для создания оптимальной конфигурации, а в дальнейшем внутренние полости заливаются бетоном традиционным способом. Предложенный метод является довольно трудо-

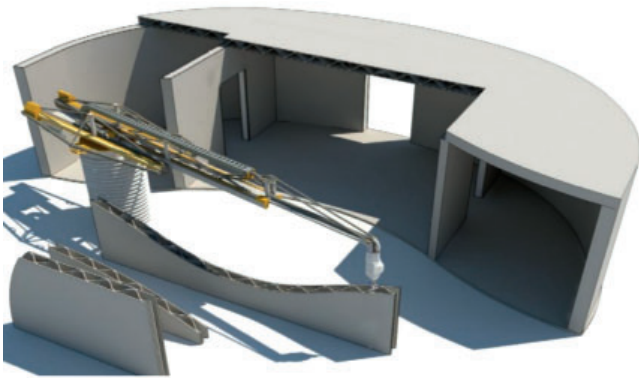


Рис. 1. Изготовление плиты покрытия в вертикальном положении [9]
Fig. 1. Manufacture of the coating plate in a vertical position [9]

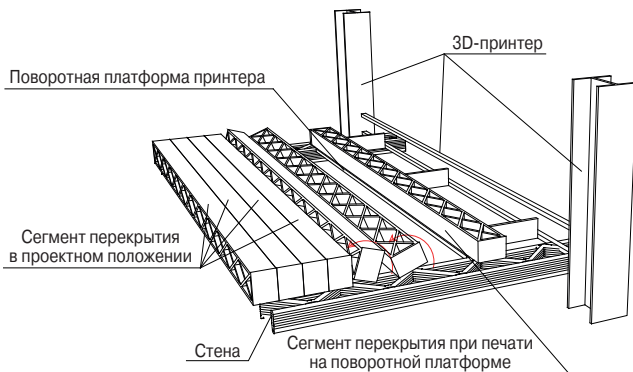


Рис. 2. Принципиальная схема устройства перекрытия методом поэлементной печати с последующим поворотом
Fig. 2. Schematic diagram of the overlap device by the method of element-by-element printing with subsequent rotation



Рис. 3. Двухпролетная балка [9]
Fig. 3. 2-span beam [9]

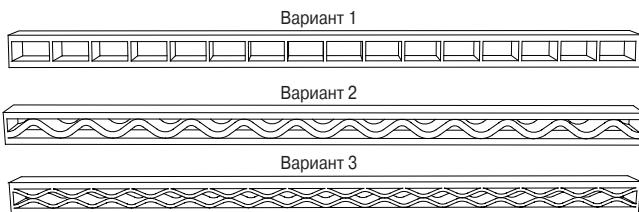


Рис. 4. Варианты конструктивного исполнения поворотного сегмента перекрытия
Fig. 4. Variants of the design of the rotary segment of the overlap

емким с высокой бетоноемкостью. В [11] предложен метод печати мелкомасштабных декоративных плит перекрытия с последующей сборкой, который требует установки армирования вручную, а также опалубочных работ.

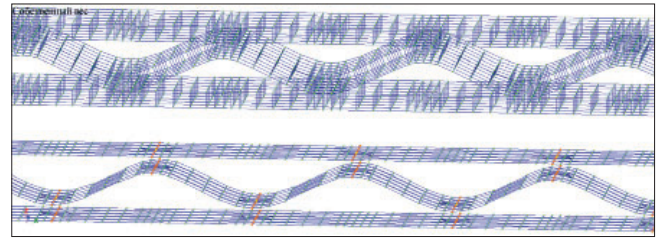


Рис. 5. Фрагмент расчетной схемы. Вверху смоделирован «телами», внизу «пластинками»+АЖТ
Fig. 5. A fragment of the calculation scheme. At the top it is modeled by «bodies», at the bottom by «plates» + an absolutely rigid body

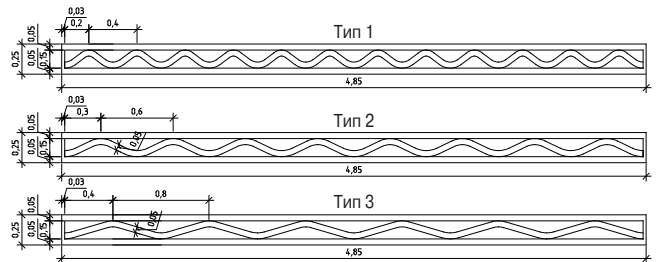


Рис. 6. Варианты типов решетки
Fig. 6. Variants of lattice types

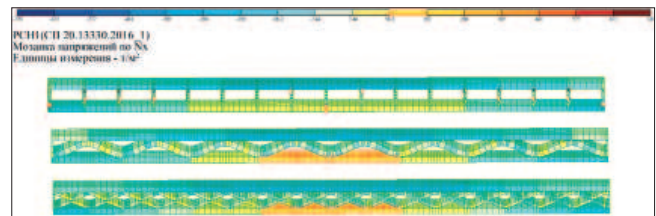


Рис. 7. Напряжения Nx
Fig. 7. Voltage Nx

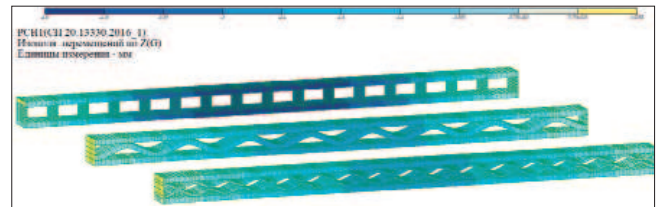


Рис. 8. Перемещения вдоль оси Z
Fig. 8. Movements along the Z axis

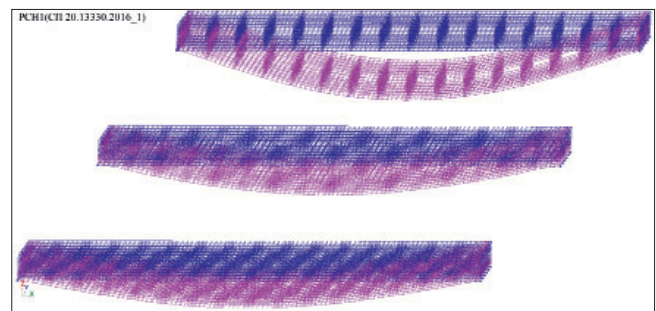


Рис. 9. Прогиб конструкций
Fig. 9. Deflection of structures

В данной работе предложено решение поэлементной печати перекрытия малоэтажного здания, а сама работа направлена на выявление оптимальных конструктивных решений при устройстве перекрытий предложенным методом. Этот метод основан на

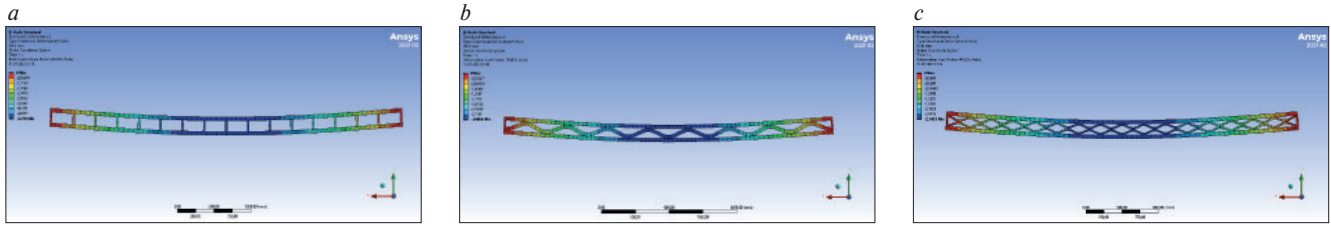


Рис. 10. Перемещения по оси Y для различных вариантов решетки ПК ANSYS: *a* – перемещение по оси Y (вариант 1); *b* – перемещение по оси Y (вариант 2); *c* – перемещение по оси Y (вариант 3)

Fig. 10. Y-axis movements for different versions of the ANSYS program: *a* – Y-axis movement (option 1); *b* – Moving along the Y-axis (option 2); *c* – Y-axis movements (option 3)

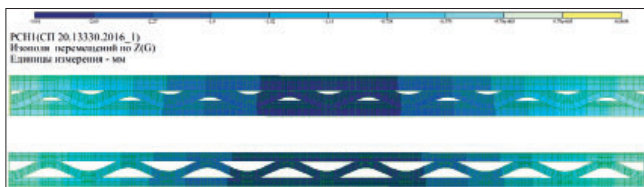


Рис. 11. Сравнение перемещений по направлению Z при различных способах моделирования

Fig. 11. Comparison of movements in the Z direction with different modeling methods

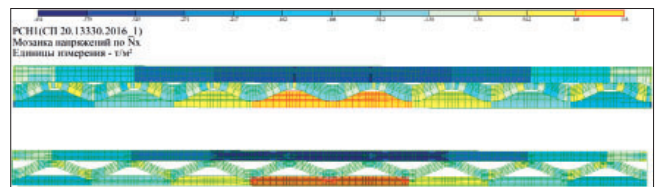


Рис. 13. Сравнение напряжений N_x при различных способах моделирования

Fig. 13. Comparison of N_x stresses with different modeling method

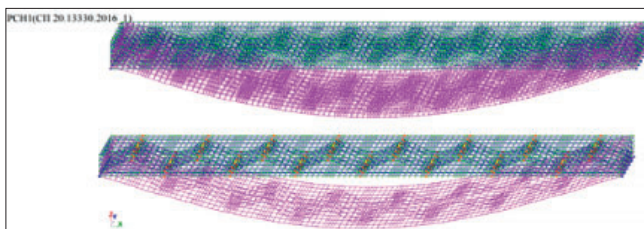


Рис. 12. Сравнение прогибов конструкций

Fig. 12. Comparison of structural deflections

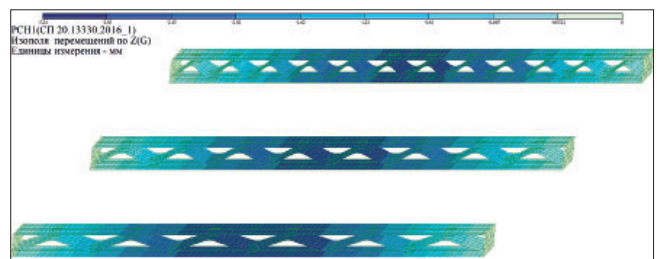


Рис. 14. Сравнение перемещений по направлению Z для различных типов решетки ПК Lira

Fig. 14. Comparison of displacements in the Z direction for different types of lattice Lira program

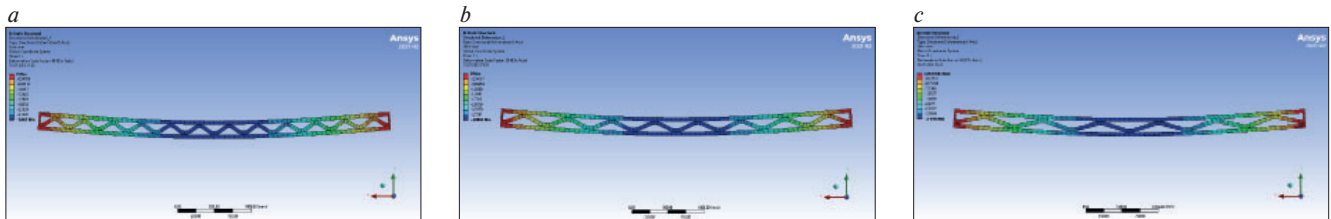


Рис. 15. Сравнение прогибов для различных типов решетки ПК ANSYS: *a* – перемещение по оси Y (тип 1); *b* – перемещение по оси Y (тип 2); *c* – перемещение по оси Y (тип 3)

Fig. 15. Comparison of deflections for different types of ANSYS program: *a* – Y-axis movement (Type 1); *b* – Y-axis movement (Type 2); *c* – Y-axis movements (Type 3)

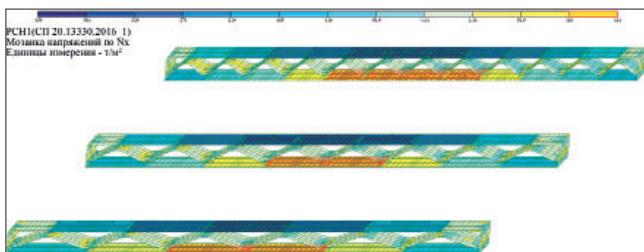


Рис. 16. Сравнение напряжений N_x при различных типах решетки

Fig. 16. Comparison of N_x voltages for different types of grating

в конструкции 3D-принтера (рис. 2). В отличие от предложенного метода в [9] данный подход позволит без применения механизмов большой грузоподъемности осуществить печать конструкции без использования щитовой опалубки. Следует отметить, что такой метод для отдельных мелкомасштабных несущих конструкций уже был осуществлен (рис. 3).

Материалы и методы

В качестве объекта исследования принят сегмент пролетом 4,8 м, высота сегмента 250 мм, ширина сегмента 250 мм. Для определения оптимальной конфигурации «соединительной решетки» конструкции поворотного сегмента предложено три варианта, которые представлены на рис. 4. Расчет

поэлементной печати сегмента перекрытия, на заданной отметке, с последующим поворотом конструкции в проектное положение, при этом предлагается использовать поворотный стенд, предусмотренный

производился с помощью программного обеспечения, основанного на методе конечных элементов. Моделирование объектов осуществлялось «телами» (Тип-36). Вид закрепления опор принят по шарнирно-неподвижной схеме.

В качестве нагрузки учитывается собственный вес изделия $\gamma=2,5 \text{ т/м}^3$; полезная нагрузка интенсивностью $P=10 \text{ кПа}$, приложенная к верхнему поясу элемента. Приложение полезной нагрузки осуществлялось к верхней грани объемного элемента.

Основными критериями оценки оптимального варианта конструкции являлись: минимальные перемещения по оси Z (по вертикали); минимальные напряжения N_x – растяжение/сжатие по направлению пролета; максимальная технологичность печати.

В качестве альтернативного программного обеспечения (ПО) расчет производился на ПК ANSYS. Моделирование объектов осуществлялось КЭ телами (SOLID186 – объемный (трехмерный) гексаэдрический квадратичный элемент, имеющий 20 узлов). Нагрузки и закрепления опор приняты аналогичными.

Далее произведено сравнение результатов расчета при различном подходе к созданию конечно-элементной модели. Для этого сравнивались результаты расчета, выполненные при моделировании с помощью элемента «Тип-36», далее «телами» и с помощью «Тип 42/44», далее «пластинками». Для корректности расчетной схемы при моделировании «пластинками» в месте соприкосновения волнообразного элемента и элемента пояса вводилось абсолютно твердое тело/абсолютно жесткое тело (АТТ/АЖТ) с ведущим узлом сверху по центру (рис. 5).

Также в данной работе произведен анализ трех типов решетки, приведенный на рис. 6, с различной длиной полуволны (0,4; 0,6 и 0,8 м) для поворотного сегмента с целью определить оптимальную конфигурацию волны.

Результаты исследования

Анализ результатов расчета, который реализован на базе на ПК Lira, для конструкций трех вариантов с различным типом решетки показывает следующие результаты:

1. Анализ максимальных напряжений N_x , возникающих в объемных элементах вдоль оси X , которые приведены на рис. 7, показывает, что для варианта 1 напряжения в нижнем поясе поворотного сегмента минимальны, а для вариантов 2 и 3 соизмеримы между собой, но больше, чем для варианта 1.

2. По результатам вычисленных перемещений (рис. 8, 9) можно сделать вывод, что вариант 1 является более деформативным по сравнению с остальными вариантами. Варианты 2 и 3 по деформативности соизмеримы между собой.

При выполнении верификации расчета в ПК ANSYS в целом результаты расчета по сравнению с ПК Lira идентичны. Анализ жесткости исследуемой конструкции показывает (рис. 10), что перемещения в центре пролета у конструкций вариантов 1 и 2

отличаются на 0,6%, а объем используемого материала у варианта 2 на 7,8% меньше.

Результаты расчета по деформациям для различного подхода к моделированию элементов (телами и пластинками), приведенные на рис. 11 и 12, показывают, что деформации элемента при моделировании «телами» и «пластинками» малоразличимы между собой.

Результаты расчета по напряжениям (рис. 13) тоже показали минимальные расхождения, следовательно, для сокращения трудоемкости создания расчетной модели и учета нагрузок различного рода следует использовать универсальный треугольный/четырёхугольный КЭ Тип 42/44 + АЖТ в соответствующих местах.

Далее приведены результаты расчета при различной длине полуволны для соединительного элемента поясов поворотного сегмента.

Результаты расчета по деформациям, выполненные на базе ПК Lira (рис. 14) и ПК ANSYS (рис. 15) говорят о том, что наиболее деформативным вариантом является тип 3 с длиной полуволны 0,8 м. Наибольшая жесткость конструкции принадлежит варианту тип 1.

Анализ напряжений N_x (рис. 16) показывает, что минимальное количество элементов с максимальными растягивающими усилиями содержит конструктивный элемент перекрытия по типу 2. Поскольку армирование элементов при 3D-печати представляет собой сложную процедуру, то в данном случае следует стремиться к минимизации элементов, подлежащих максимальному армированию, поэтому наибольший интерес с данной точки зрения представляет вариант конструктивного элемента перекрытия по типу 2.

Выводы

По совокупности критериев из предложенных вариантов поворотных сегментов перекрытия, представленных на рис. 3, наиболее оптимальной конфигурацией можно считать вариант 2, пояса которого соединяются при помощи волнообразного элемента. Так как напряжения, возникающие в элементе, минимальны, по технологии печати с помощью 3D-принтера такая конфигурация является наиболее подходящей.

При выполнении верификации расчета в ПК ANSYS получены идентичные результаты по сравнению с ПК Lira.

Для создания конечно-элементной модели в расчетных программах следует использовать универсальный треугольный/четырёхугольный КЭ Тип 42/44 + АТТ(АЖТ) в соответствующих местах, что позволяет без ущерба для результатов расчета минимизировать трудозатраты на создание конечно-элементной модели.

Результаты расчета с различными длинами волн показывают, что вариант с длиной полуволны 0,6 м является оптимальным.

Список литературы

1. Засько В.В., Ратушная Е.В. Применение 3D-принтеров в строительстве // *Ресурсосберегающие технологии производства и обработки давлением материалов в машиностроении*. 2021. № 4 (37). С. 106–116.
2. Неустроев Д.В., Овчинников И.Г. Аддитивные технологии и их применение в промышленном и транспортном строительстве // *Вестник евразийской науки*. 2021. Т. 13. № 2. С. 23.
3. Монастырев П.В., Езерский В.А., Иванов И.А., Азауи Дубла Б. Аддитивные технологии возведения стен малоэтажных зданий и их классификация. М.: АСВ, 2019. Т. 2. 368–379. DOI: 10.22337/9785432303134-368-379
4. Денисова Ю.В. Аддитивные технологии в строительстве // *Строительные материалы и изделия*. 2018. Т. 1. № 3. С. 33–42.
5. Славчева Г.С. Анализ российской нормативной документации, регламентирующей применение и развитие строительных аддитивных технологий // *Строительные материалы*. 2023. № 8. С. 10–17. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-816-8-10-17>
6. Мухаметрахимов Р.Х., Вахитов И.М. Аддитивная технология возведения зданий и сооружений с применением строительного 3D-принтера // *Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета*. 2017. № 4 (42). С. 350–359.
7. Славчева Г.С. Строительная 3D-печать сегодня: потенциал, проблемы и перспективы практической реализации // *Строительные материалы*. 2021. № 5. С. 28–36. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-791-5-28-36>
8. De Schutter G., Lesage K., Mechtcherine V., Nerella V.N., Habert G., Agusti-Juan I. Vision of 3D printing with concrete—technical, economic and environmental potentials. *Cement and Concrete Research*. 2018. Vol. 112, pp. 25–36.
9. Файзоллин М.М., Чернавин В.Ю., Аддитивные технологии изготовления плит перекрытий крупнопанельных зданий в гражданском строительстве // *Научные горизонты*. 2022. № 5 (57). С. 80–86.
10. Maitenaz S., Mesnil R., Onfroy P., Metge N., Caron JF. Sustainable reinforced concrete beams: mechanical optimisation and 3D-printed formwork. *RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication. DC 2020: Second RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication*. 2020, Vol. 28, pp. 1164–1173. https://doi.org/10.1007/978-3-030-49916-7_110
11. Anton A., Jipa A., Reiter L., Dillenburger B. Fast complexity: additive manufacturing for prefabricated concrete slabs. *RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication. DC 2020: Second RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication*. 2020. Vol. 28, pp. 1067–1077. https://doi.org/10.1007/978-3-030-49916-7_102
12. Славчева Г.С., Акулова И.И., Вернигора И.В. Концепция и эффективность применения 3D-печати для дизайна городской среды // *Жилищное строительство*. 2020. № 3. С. 49–55. DOI: <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2020-3-49-55>

References

1. Zas'ko V.V., Ratushnaya E.V. Application of 3D printers in construction. *Resursosberegayushchie tekhnologii proizvodstva i obrabotki davleniem materialov v mashinostroenii*. 2021. No. 4 (37), pp. 106–116. (In Russian).
2. Neustroev D.V., Ovchinnikov I.G. Additive technologies and their application in industrial and transport construction. *Vestnik evrazijskoi nauki*. 2021. Vol. 13. No. 2, p. 23. (In Russian).
3. Monastyrev P.V., Yezersky V.A., Ivanov I.A., Azzawi Dubla B. Additive technologies for the construction of walls of low-rise buildings and their classification. Moscow: ASV, 2019. Vol. 2, pp. 368–379. (In Russian). DOI 10.22337/9785432303134-368-379
4. Denisova Yu.V. Additive technologies in construction. *Stroitel'nye materialy i izdeliya*. 2018. Vol. 1. No. 3, pp. 33–42. (In Russian).
5. Slavcheva G.S. Analysis of the Russian regulatory documentation regulating the use and development of construction additive technologies. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2023. No. 8, pp. 10–17. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-816-8-10-17>
6. Mukhametrakhimov R.H., Vakhitov I.M. Additive technology of construction of buildings and structures using a construction 3D printer. *Izvestiya Kazanskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta*. 2017. No. 4 (42), pp. 350–359. (In Russian).
7. Slavcheva G.S. 3D-build printing today: potential, challenges and prospects for implementation. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2021. No. 5, pp. 28–36. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-791-5-28-36>
8. De Schutter G., Lesage K., Mechtcherine V., Nerella V.N., Habert G., Agusti-Juan I. Vision of 3D printing with concrete—technical, economic and environmental potentials. *Cement and Concrete Research*. 2018. Vol. 112, pp. 25–36.
9. Fayzollin M.M., Chernavin V.Yu. Additive technologies for manufacturing floor slabs of large-panel buildings in civil engineering. *Nauchnye gorizonty*. 2022. No. 5 (57), pp. 80–86. (In Russian).
10. Maitenaz S., Mesnil R., Onfroy P., Metge N., Caron JF. Sustainable reinforced concrete beams: mechanical optimisation and 3D-printed formwork. *RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication. DC 2020: Second RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication*. 2020, Vol. 28, pp. 1164–1173. https://doi.org/10.1007/978-3-030-49916-7_110
11. Anton A., Jipa A., Reiter L., Dillenburger B. Fast complexity: additive manufacturing for prefabricated concrete slabs. *RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication. DC 2020: Second RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication*. 2020. Vol. 28, pp. 1067–1077. https://doi.org/10.1007/978-3-030-49916-7_102
12. Slavcheva G.S., Akulova I.I., Vernigora I.V. Concept and effectiveness of 3D printing for urban environment design. *Zhilishchnoe Stroitel'stvo* [Housing Construction]. 2020. No. 3, pp. 49–55. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2020-3-49-55>

УДК 666

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-818-10-121-128>

Т.В. ЧАЙКА¹, ассистент (TVChayika@sevsu.ru),
 В.М. ГАВРИШ¹, канд. техн. наук (vmgavrish@mail.sevsu.ru);
 Н.И. ЧЕРКАШИНА², д-р техн. наук (cherkashina.ni@bstu.ru),
 Р.В. СИДЕЛЬНИКОВ², аспирант (roman.sidelnikov@mail.ru),
 Д.С. РОМАНЮК², аспирант (romanyuk.dmitrij.98@bk.ru)

¹ Севастопольский государственный университет (299053, г. Севастополь, ул. Университетская, 33)

² Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова (308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46)

Модификация композиционных материалов высокодисперсными порошками WC и WO₃

Представлены результаты исследований модификации композиционного материала на основе цемента путем замены вяжущего на 1–5 мас. % высокодисперсными порошками карбида вольфрама WC и оксида вольфрама WO₃, полученными в результате переработки твердосплавных отходов. Введение в цементную смесь порошков WC и WO₃ сокращает начальное и конечное время схватывания, уменьшает нормальную плотность, увеличивает растекаемость цементного теста, а также способствует более ранней гидратации, при этом наблюдается уменьшение интенсивности тепловыделения составов с добавками по сравнению с контрольным составом. Согласно SEM изображениям образцы, содержащие порошки WC и WO₃, имеют более плотную микроструктуру. Рентгенофазовый анализ показал, что добавление высокодисперсных частиц в цементную пасту существенно не изменило фазовый состав затвердевшего камня, при этом наблюдается повышение интенсивности пиков, принадлежащих гидросиликатам кальция в модифицированных образцах, по сравнению с контрольным составом. Экспериментально установлено, что использование высокодисперсных добавок приводит к повышению прочности при сжатии цементных образцов, максимальное увеличение прочности составляет 39 и 40% при содержании добавки 1 мас. % WC и 2 мас. % WO₃ соответственно. Полученные результаты являются важными для понимания механизмов действия высокодисперсных частиц WC и WO₃ на цементные материалы, что в дальнейшем может быть использовано в целях улучшения свойств композиционных материалов на основе цемента в различных областях применения.

Ключевые слова: высокодисперсный порошок, карбид вольфрама, оксид вольфрама, композиционный материал, гидратация, механические свойства, микроструктура.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 19-19-00316 (продление), <https://rscf.ru/project/19-19-00316/> с использованием оборудования на базе Центра высоких технологий БГТУ им. В.Г. Шухова и Центра коллективного пользования «Перспективные технологии и материалы» СевГУ.

Для цитирования: Чайка Т.В., Гавриш В.М., Черкашина Н.И., Сидельников Р.В., Романюк Д.С. Модификация композиционных материалов высокодисперсными порошками WC и WO₃ // *Строительные материалы*. 2023. № 10. С. 121–128.

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-818-10-121-128>

T.V. CHAYKA¹, Assistant (TVChayika@sevsu.ru), V.M. GAVRISH¹, Candidate of Sciences (Engineering) (vmgavrish@mail.sevsu.ru);
 N.I. CHERKASHINA², Doctor of Sciences (Engineering) (cherkashina.ni@bstu.ru), R.V. SIDELNIKOV², Graduate Student (roman.sidelnikov@mail.ru),
 D.S. ROMANYUK², Graduate Student (romanyuk.dmitrij.98@bk.ru)

¹ Sevastopol State University (33, Universitetskaya Street, Sevastopol, 299053, Russian Federation)

² Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (46, Kostyukova Street, Belgorod, 308012, Russian Federation)

Modification of Composite Materials with Highly Dispersed WC and WO₃ Powders

The results of studies on the modification of a cement-based composite material by replacing the binder by 1–5 wt. % highly dispersed powders of wolfram carbide WC and wolfram oxide WO₃ obtained by processing hard-alloy waste, are presented. The introduction of WC and WO₃ powders into the cement mixture reduces the initial and final setting time, reduces normal density, increases the spreadability of cement paste, and also promotes earlier hydration, while a decrease in the intensity of heat release of compositions with additives is observed, compared to the control composition. According to SEM images, samples containing WC and WO₃ powders have a denser microstructure. X-ray phase analysis showed that the addition of highly dispersed particles to the cement paste did not significantly change the phase composition of the hardened stone, while there was an increase in the intensity of peaks belonging to calcium hydro-silicates in modified samples compared with the control composition. It has been experimentally established that the use of highly dispersed additives leads to an increase in the compressive strength of cement samples; the maximum increase in strength is 39% and 40% with an additive content of 1 wt. % WC and 2 wt. % WO₃ respectively. The results obtained are important for understanding the mechanisms of action of highly dispersed WC and WO₃ particles on cement materials, which can subsequently be used to improve the properties of cement-based composite materials for various areas of applications.

Keywords: highly dispersed powder, wolfram carbide, wolfram oxide, composite material, hydration, mechanical properties, microstructure.

The research was carried out at the expense of the Russian Science Foundation grant No. 19-19-00316 (extension), <https://rscf.ru/project/19-19-00316/> using equipment based on the Center for High Technologies of BSTU named after V.G. Shukhov and the Center for Collective Use “Promising Technologies and Materials” of SevSU.

For citation: Чайка Т.В., Гавриш В.М., Черкашина Н.И., Сидельников Р.В., Романюк Д.С., Modification of composite materials with highly dispersed WC and WO₃ powders. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2023. No. 10, pp. 121–128. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-818-10-121-128>

Строительные материалы на основе портландцемента являются основными и самыми востребованными в современном строительстве благодаря своим физико-техническим и эксплуатационным характеристикам, а также широким возможностям модификации их структуры и свойств различными способами под определенные задачи [1–4].

Для повышения физико-механических свойств композитов на основе портландцемента и их компонентов в строительной практике используют различные методы (измельчение вяжущего, гидродинамическая, термическая активация, ультразвуковая обработка, магнитная активация воды затворения, применение минеральных и органических добавок и т. д.) [5–8], при этом особый интерес представляет модификация строительных композитов за счет введения высокодисперсных твердых добавок [9, 10], использование которых позволяет изменять характеристики традиционных строительных материалов в широком диапазоне значений. Положительный эффект достигается за счет того, что высокодисперсные добавки выступают не только в качестве микронаполнителей в материале [11], но, участвуют в процессе гидратации вяжущего: благодаря своей высокой удельной поверхностной энергии стимулируют эффект зародышеобразования при гидратации цемента или, являясь пуццоланами, увеличивают количество низкоосновных гидросиликатов кальция [12, 13].

К числу таких добавок, широко используемых в настоящее время в области строительных материалов на основе портландцемента, относятся наноксиды, такие как SiO_2 (NS) [14, 15]; TiO_2 [16]; Al_2O_3 (NA) [17]; Fe_2O_3 (NF) [18]; ZnO_2 (NZ) [19], а также углеродные наноматериалы: оксид графена (GO), углеродные нанотрубки и волокна [20–22], наноглины (NC) [23]; CaCO_3 [24] и др. Выбор добавок в качестве модификатора цементных материалов зависит от особенностей структурообразования композита, необходимых условий повышения эксплуатационных свойств и его параметров структуры [25].

Исследованию влияния наноразмерных добавок на свойства цементных композитов посвящено множество исследований [14–29], при этом особое внимание уделено механизму их действия и оптимальному количеству [2].

Например, при введении в бетон 0,02, 0,05 и 0,08 мас. % оксида графена GO увеличение прочности при сжатии, изгибе и модуль упругости составляют 12,65, 7,38 и 10,97% соответственно [26]. Кроме того, исследование микроструктуры показывает, что добавление 0,03–0,05% GO к цементному композиту увеличивает гидратацию, что приводит к образованию сшитой структуры, которая перекрывает структуру пор и улучшает компактность композита, повышая механические характеристики [27].

Авторы [28] исследовали влияние нано- CaCO_3 на свойства сверхвысокопрочного бетона. Введение 1,6–4,8% добавки приводит к повышению прочности при сжатии и изгибе на 13–20 и 15–30% соответ-

ственно по сравнению с контрольным образцом. Исследования, проведенные группой ученых [29], показали, что при добавлении 3 и 5% наночастиц Fe_2O_3 прочность при сжатии увеличивается на 26 и 14,5%, прочность на растяжение при изгибе на 17,8 и 23% соответственно.

Несмотря на большое количество исследований и разработок в области наноразмерных добавок в различные композиционные материалы на основе цемента и полученный положительный эффект их введения, высокая стоимость большинства наномодификаторов ограничивает потенциальные возможности их применения в строительных крупнотоннажных материалах, коими являются цементные бетоны. Поэтому в настоящее время признано целесообразным использовать минеральные наноразмерные вещества, которые образуются в качестве побочного продукта или из отходов производства, имеющих высокий технический эффект при меньшей стоимости [30].

Среди таких добавок можно отметить нанопорошки карбида вольфрама WC, оксида вольфрама WO_3 , смесь порошков WC, TiC и др., полученные в результате рециклинга лома твердых сплавов типа ТК, ВК, ВНЖ и др. по технологии [31], отличающиеся от аналогов высокой чистотой, низкой стоимостью, возможностью получения в промышленных объемах.

Результаты исследования, проведенные коллективом авторов [32, 33], показали, что при введении в цементную матрицу 1–2 мас. % высокодисперсного порошка, состоящего из смеси WC, TiC, наблюдается ускорение сроков схватывания цементного теста, повышение прочности исследуемого образца при сжатии на 59–63% и изгибе на 30–35%.

Использование высокодисперсных вольфрамсодержащих порошков, полученных из твердосплавного лома, в качестве добавок в цементные композиты представляется перспективным и эффективным. Однако из-за отсутствия достаточного количества исследований по оценке влияния порошков WC, WO_3 на свойства материалов на основе цемента определение целесообразности их использования является актуальным и требует более детального изучения.

В работе представлены результаты исследования модификации цементной матрицы путем замены части цемента на высокодисперсные порошки карбида вольфрама WC и оксида вольфрама WO_3 (1–5 мас. %), полученные в результате переработки твердосплавных отходов типа ВК. Изучено влияние добавок на свойства цементного теста, на реакцию гидратации цемента и образующихся продуктов гидратации, что оказывает непосредственное влияние на прочность при сжатии и микроструктуру.

Материалы и методы исследования

В качестве исходных компонентов были использованы:

– портландцемент ЦЕМ II/A-П 42,5Н СС (ОАО «Верхнебаканский цементный завод»), удельная площадь поверхности $340 \text{ м}^2/\text{кг}$, удельная плот-

Таблица 1
Table 1Свойства вольфрамсодержащих добавок
Properties of tungsten-containing additives

Добавка	Карбид вольфрама	Оксид вольфрама
Формула	WC	WO ₃
Площадь поверхности, м ² /г	1,2	0,81
Насыпная плотность, г/см ³	3,0375	0,812
Удельный вес, г/см ³	13,97	8,2
Кристаллическая структура	Гексагональная	WO ₃ – триклинная (основная фаза); WO ₃ – моноклинная
Размер частиц, нм	40–150 нм	30–200 нм
	Допускается присутствие агломератов размером до 2 мкм в количестве не более 15%	

Таблица 2
Table 2Дозирование цементных смесей (мас. %)
The cement mixture proportions (mas. %)

Смесь	M0	M1	M2	M3	M4	M5
Цемент, %	100	99	98	97	96	95
Добавка порошка WC (или WO ₃), %	–	1	2	3	4	5

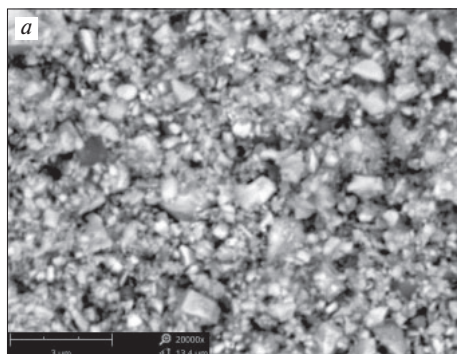
Рис. 1. Микрофотографии порошка карбида вольфрама WC (a) и оксида вольфрама WO₃ (b)

Fig. 1. Micrographs of tungsten carbide (a) and tungsten oxide powder (b)

ность 2,26 г/см³, нормальная густота не более 27,5%. Минеральный состав: C₃S (трехкальциевый силикат) не менее 60%; C₃A (трехкальциевый алюминат) не более 5%; C₃A+C₃AF не более 20% (ГОСТ 22266–2013);

– вода, соответствующая требованиям ГОСТ 23732–2011 «Вода для бетонов и строительных растворов. Технические условия»;

– добавка – высокодисперсный порошок карбид вольфрама WC, полученный в результате рециклинга твердосплавных изделий типа ВК (карбид вольфрама WC, связующий компонент кобальт Co);

– добавка – триоксид вольфрама WO₃, полученный в результате постепенного нагревания порошка карбида вольфрама WC при температуре 750°C до достижения равномерной лимонно-желтой окраски (табл. 1, рис. 1).

Выбор данных добавок обусловлен вариативностью свойств, связанных со спецификой их получения, а также стоимостью и структурой порошков.

Цементную смесь готовили в соответствии с табл. 2. Доля замены добавки в связующем тесте 0–5 мас. %. Порошок WC (WO₃) вводили в цемент в виде суспензии, предварительно подвергнув ультразвуковому диспергированию в течение 30 с при частоте 22 кГц, с целью разбивания крупных агломератов и 30 с при частоте 44 кГц для более эффективной деагломерации частиц при помощи ультразвукового диспергатора УЗД-22/44.

Для проведения испытаний были заформованы образцы-кубы размером 20×20×20 мм. Первые сутки образцы твердели в формах, далее после распалубки

до момента испытаний (на 28-е сут твердения) хранились в ванне с гидравлическим затвором при температуре окружающей среды 20±2°C и относительной влажности воздуха не менее 90%.

Методы исследований и аппаратура

Определение нормальной густоты и сроков схватывания цементного теста проводилось на приборе Вика в соответствии с ГОСТ 310.3–81 «Цементы. Методы определения нормальной густоты, сроков схватывания и равномерности изменения объема».

Исследование растекаемости цементного теста производили по методике [34] с использованием мини-конуса (верхний диаметр 19 мм, нижний диаметр 38 мм и высота 57 мм). Соотношение воды и связующего (портландцемент+добавка) поддерживалось постоянным В/Ц=0,45, чтобы оценить только влияние добавки в растворе.

Исследования физико-механических характеристик проводились с использованием универсальной испытательной машины ТРМ-500 «Тоchline».

Для определения особенности гидратации и влияния добавок WC и WO₃ на свойства цемента с точки зрения динамики тепловыделения использовали автоматизированный дифференциальный электрокалориметр ToniCAL Tg10 при температуре 27°C. Продолжительность измерения 72 ч, соотношение вода/связующее составляло 0,5. Вес образца 10 г.

Кристаллическую структуру материалов исследовали с помощью рентгеновской дифракции (ARL X'TRA, Thermo Techno) с источником CuKα в диа-

пазоне углов 2θ от 4 до 56° в режиме асимметричной компланарной съемки со скользящим углом падения $\alpha=3^\circ$ (θ -scan). Идентификация фаз и индексирование пиков осуществлялись по базе ICDD (International Centre for Diffraction Data) JCPDF.

Микроструктуру скола цементных образцов исследовали на сканирующем электронном микроскопе PHENOM pro X с интегрированной системой энергодисперсионного анализа.

Результаты

Влияние вольфрамсодержащих добавок на свойства цементного теста

Результаты исследования влияния высокодисперсных порошков WC и WO₃ на свойства цементного теста представлены в табл. 3

Введение в цементные пасты высокодисперсных порошков карбида вольфрама и оксида вольфрама сокращает начальное и конечное время схватывания, что указывает на увеличение скорости гидратации.

Нормальная плотность уменьшается с увеличением концентрации от 1 до 5 мас. % добавок WC на 2–5%, при добавлении порошка оксида вольфрама водопотребность изменяется незначительно, независимо от дозировки.

Растекаемость (диаметр расплыва) цементных композиций увеличивается с повышением концентрации добавки. Данный факт можно объяснить, во-первых, малыми размерами частиц порошка, благодаря чему они способствуют уменьшению незаполненных пу-

стот, тем самым увеличивая содержание свободной воды; во-вторых, порошки WC и WO₃ являются инертными материалами, с увеличением их количества в цементном растворе вязкость уменьшается, что приводит к увеличению текучести; в третьих, в результате частичной замены цемента на добавку, потребность в воде для гидратации цемента уменьшается [35].

Термокинетические исследования процессов ранней стадии гидратации вяжущих

Результаты теплоты гидратации цементного теста разных составов (табл. 4) представлены в виде калориметрических кривых (рис. 2).

Добавление порошков WC и WO₃ повлияло на динамику показателей тепловыделения (рис. 2), выраженных зависимостью $dQ/dt=f(t)$ в течение 72 ч.

Все полученные кривые тепловыделения имеют сходный характер. Сразу после затворения цемента водой наблюдается скачок тепловыделения, происходящий на период 3–8 мин (рис. 2), связанный с процессом смачивания поверхности частиц, растворением материалов, а также реакциями ранней стадии гидратации [36]. Добавление порошков изменило пиковое значение выделения: при замене цемента добавкой 1% WC увеличило на 13%; при добавлении 1% порошка WO₃ – на 5% по сравнению с контрольным образцом, при этом тепловыделение увеличилось на 24 и 12% соответственно.

Далее скорость тепловыделения исследуемых смесей снижается до минимума по мере насыщения рас-

Таблица 3
Table 3

Влияние добавок WC и WO₃ на свойства цементного теста
Effect of WC and WO₃ additives on cement dough properties

Добавка	Карбид вольфрама (WC)				Оксид вольфрама (WO ₃)			
	НГ, %	Диаметр расплыва конуса, мм	Сроки схватывания, мин		НГ, %	Диаметр расплыва конуса, мм	Сроки схватывания, мин	
			нач.	кон.			нач.	кон.
M0	27	87,1	201	278	27	87,1	201	278
M1	26,5	87,4	198	265	26,8	88,1	199	275
M2	26,3	87,6	197	247	26,6	88,6	196	267
M3	26,1	88,4	184	249	26,5	92	189	270
M4	25,8	89,5	175	255	26,7	96	174	265
M5	25,5	96,3	179	260	26,8	97,5	175	263

Таблица 4
Table 4

Характеристика термокинетических показателей
Characteristics of thermokinetic indicators

№ пробы	Образец	Начало реакции, с	Экзоэффект			Тепловыделение макс. за 72 ч, Дж/г
			Момент достижения, ч:мин:с	Величина максимума, Дж/г·ч	Тепловыделение, Дж/г	
1	ПЦ	15	0:05:31	16,53	1,08	209,9
			13:03:10	8,11	70,11	
2	ПЦ+1% WC	17	0:05:52	18,7	1,34	205,07
			12:55:18	7,78	52,15	
3	ПЦ+1% WO ₃	15	0:05:54	17,41	1,22	194,45
			12:42:37	7,58	65,06	

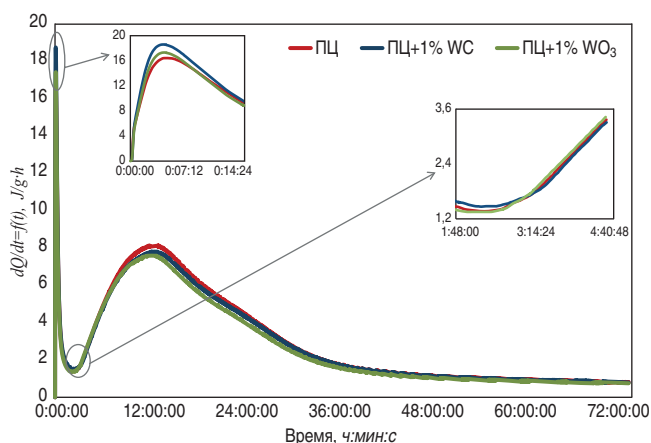


Рис. 2. Дифференциальные кривые тепловыделения при гидратации исследуемых цементных образцов

Fig. 2. Differential curves of heat release during hydration of the studied cement samples

творя первичными продуктами гидратации [37]: наступает индукционный период, продолжительность которого у исследуемых составов почти одинакова и составляет 2–3 ч (рис. 2). Далее начинается второй этап химической реакции гидратации – основного экзотермического пика тепловыделения. Время начала схватывания практически совпадает со временем, когда скорость реакции начинает быстро возрастать.

Согласно результатам измерения тепловыделения образцов с использованием добавок наблюдается тенденция к ускорению гидратации. Об этом можно судить по возникновению более раннего основного пика гидратации. Второй температурный пик наступил на 8 и 21 мин раньше для образцов с использованием порошка WC, WO₃ соответственно. Скорость гидратации в этот период регулируется скоростью образования и роста продуктов гидратации [38]. Это может быть связано с ускоренным гетерогенным зародышеобразованием гидратов на частицах высокодисперсных порошков, что подтверждается работами других авторов, которые установили в исследованиях, что инертные наполнители с очень малыми размерами частиц могут усиливать кинетику гидратации в период ускорения гидратации, действуя как центры кристаллизации новообразований [30, 39, 40].

Однако, несмотря на ускорение появления основного пика гидратации, наблюдается уменьшение интенсивности тепловыделения составов с добавками по отношению к контрольному (табл. 4), при добавлении WC на 4%, при добавлении WO₃ на 6,5%. Количество выделяемого модифицированными образцами тепла уменьшилось на 25,6 и 7,2% соответственно, что обусловлено уменьшением содержания портландцемента в системе и изменением количества жидкой фазы по отношению к цементу.

Рентгенофазовый анализ

Добавление высокодисперсных частиц в цементную пасту не вызвало образования новых фаз, что говорит об отсутствии химических взаимодействий между частицами WC (или WO₃) и гидратами цемента (рис. 3).

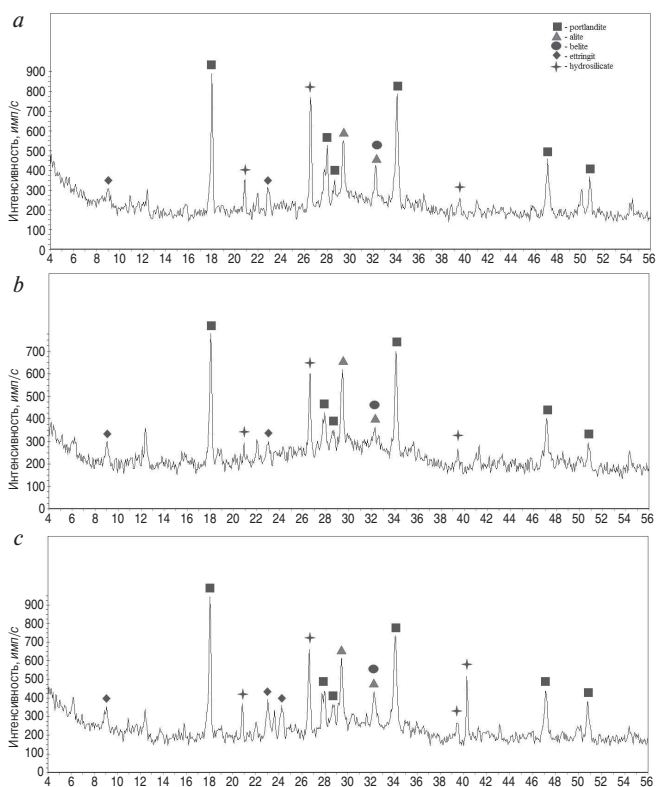


Рис. 3. Рентгенограмма цементного камня контрольного состава (а) и модифицированного 1 мас. % порошком WC (b); WO₃ (c) в возрасте 28 сут

Fig. 3. X-ray of the control composition cement stone (a) and modified with 1 mass. % WC powder (b); 1 mass. % WO₃ (c) powder at the age of 28 days

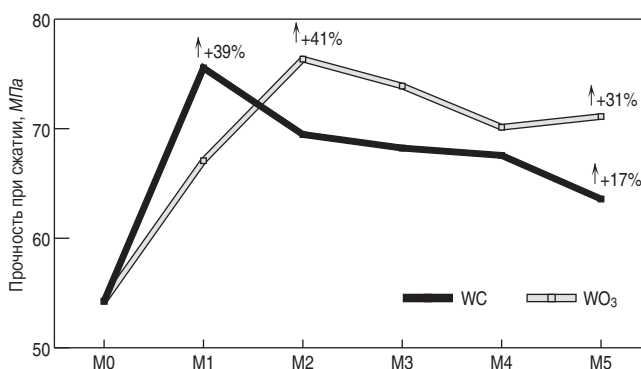


Рис. 4. Прочность при сжатии цементных образцов в зависимости от концентрации добавки

Fig. 4. Compressive strength of cement specimens depending on additive concentration

При этом установлено, что образцы цементного камня контрольного состава и образцы с добавлением порошков WC и WO₃ характеризуются практически равнозначной интенсивностью отражения портландита. В то же время суммарная интенсивность дифракционных максимумов алита C₃S, белита C₂S в модифицированных образцах ниже по сравнению с контрольным, а интенсивность пиков, принадлежащих гидросиликатам кальция, выше, что приводит к увеличению физико-механических характеристик цементного камня и подтверждает результаты механических испытаний разработанных композиций (рис. 4).

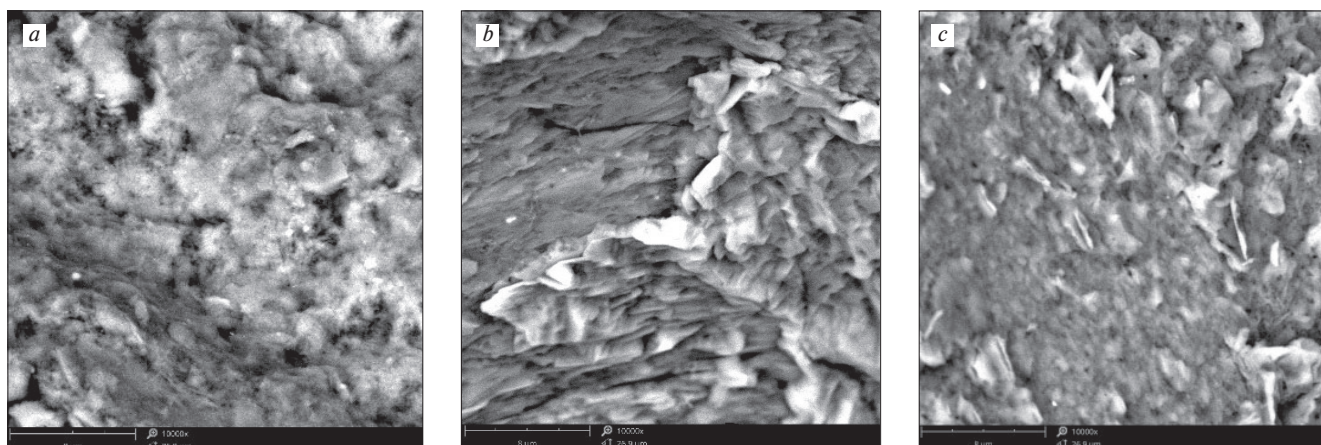


Рис. 5. Микроструктура цементных образцов контрольного состава (а) и модифицированного порошком WC (b) и WO_3 (c) при увеличении $\times 10000$
Fig. 5. Microstructure of cement samples of control composition (a) and modified with WC powder (b) and WO_3 powder (c) at $\times 10000$ magnification

Прочностные свойства

Результаты изменения прочности при сжатии цементного камня контрольного и модифицированных порошками составов представлены на рис. 4.

Результаты эксперимента показывают увеличение прочностных характеристик модифицированного цементного камня по сравнению с контрольным составом. Максимальное увеличение прочности при сжатии составляет 39 и 41% при добавлении 1 мас. % WC и 2 мас. % WO_3 соответственно.

При увеличении содержания в цементном образце порошка WC более 1 мас. % и порошка WO_3 более 2% прочность цементного камня снижается, при этом остается выше контрольного. Снижение прочности может быть связано с агломерацией порошка, а также с инертностью добавок, в результате чего чрезмерная замена цемента приводит к отрицательному результату.

Микроструктура цементного камня

С целью изучения микроструктуры и для объяснения причин изменения прочностных характеристик цементного материала при добавлении высокодисперсного порошка было проведено электронно-микроскопическое исследование микроструктуры поверхности скола цементных образцов при увеличении $\times 10000$. На рис. 5 представлены изображения цементных образцов контрольного состава M0 и образцов, модифицированных порошками WC и WO_3 состава M1 и M2 соответственно, которые имеют самые высокие прочностные характеристики.

Согласно SEM изображениям образцы, содержащие порошки WC и WO_3 , имеют более плотную и однородную структуру.

Выводы

На основании результатов эксперимента можно сделать следующие выводы:

– введение в цементную смесь высокодисперсных порошков WC и WO_3 сокращает начальное и конечное время схватывания, уменьшает нормальную плотность, увеличивает растекаемость цементного теста;

– введение высокодисперсной добавки способствовало более ранней гидратации. Наблюдается уменьшение интенсивности тепловыделения составов с добавками по отношению к контрольному составу;

– рентгенофазовый анализ показал, что добавление высокодисперсных частиц в цементную пасту существенно не изменило фазовый состав цементного камня, при этом наблюдается повышение интенсивности пиков, принадлежащих гидросиликатам кальция в модифицированных образцах, по сравнению с контрольным составом, приводящее к увеличению физико-механических характеристик прочности цементного камня;

– экспериментально установлено, что использование высокодисперсных добавок приводит к повышению прочности цементных образцов при сжатии на 39 и 40% при содержании добавки 1 мас. % WC и 2 мас. % WO_3 соответственно;

– образцы, содержащие порошки WC и WO_3 , имеют более плотную микроструктуру.

На основании вышеизложенного можно сделать вывод, что высокодисперсные порошки WC и WO_3 , несмотря на инертность к продуктам гидратации цемента, способствуют образованию более плотной структуры цементной матрицы. Происходит это не только за счет малых размеров частиц порошка, которые способствуют эффекту заполнения, а непосредственно за счет проявления эффекта зародышеобразования продуктов гидратации портландцемента на поверхности частиц, что приводит к уплотнению структуры цементных композитов и улучшению их прочностных характеристик.

На следующем этапе исследований планируется проведение испытаний и оценка радиационно-защитных свойств композиционного материала на основе цемента с добавлением высокодисперсных вольфрамсодержащих порошков.

Список литературы / References

1. Dabić P., Damir Barbir. Implementation of natural and artificial materials in Portland cement. *Hemijaska*

- industrija*. 2020. Vol. 74, pp. 14–14. DOI: 10.2298/HEMIND191216014D
2. Agzamov F.A., Grigoryev A.Y. Modification of Portland cement with nanoadditives. *Nanotechnologies in Construction*. 2022. Vol. 14. No. 4, pp. 319–327. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2022-14-4-319-327>
 3. Bakhtin A., Lyubomirskiy N., Bakhtina T., Fic S. Influence of forced carbonisation on the binding properties of sludge with a high β -Belite content. *Materials*. 2021. Vol. 14. No. 24. 7899. <https://doi.org/10.3390/ma14247899>
 4. Ястребинский Р.Н., Карнаухов А.А., Павленко В.И., Городов А.И., Акименко А.В., Фанина Е.А. Радиационно-защитные характеристики композита на основе термостойкой модифицированной дроби гидрида титана // *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова*. 2022. № 12. С. 86–93. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-12-86-93
 4. Yastrebinskiy R.N., Karnauhov A.A., Pavlenko V.I., Gorodov A.I., Akimenko A.V., Fanina E.A. Radiation-protective characteristics of a composite based on a heat-resistant modified fraction of titanium hydride. *Vestnik of Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov*. 2022. No. 12, pp. 86–93. (In Russian). DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-12-86-93
 5. Fediuk R., Mochalov A., Timokhin R. Review of methods for activation of binder and concrete mixes. *AIMS Materials Science*. 2018. Vol. 5, pp. 916–931. DOI: 10.3934/matricsci.2018.5.916
 6. Saidova Z., Yakovlev G., Smirnova O., Gordina A., Kuzmina N. Modification of cement matrix with complex additive based on chrysotyl nanofibers and carbon black. *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11. No. 15. 6943. DOI: 10.3390/app11156943
 7. Judina A. Non-reagent methods for the activation of concrete mix raw components in the construction industry. *Architecture and Engineering*. 2020. Vol. 5. Iss. 1, pp. 30–35. DOI: 10.23968/2500-0055-2020-5-1-30-35
 8. Ibragimov R., Korolev E., Potapova L., Deberdeev T., Khasanov A. The influence of physical activation of Portland cement in the electromagnetic vortex layer on the structure formation of cement stone: the effect of extended storage period and carbon nanotubes modification. *Buildings*. 2022. Vol. 12. No. 6. 711. <https://doi.org/10.3390/buildings12060711>
 9. Ramadan M., Amin M.S., Sayed Mostafa A. Superior physico-mechanical, fire resistivity, morphological characteristics and gamma radiation shielding of hardened OPC pastes incorporating $ZnFe_2O_4$ spinel nanoparticles. *Construction and Building Materials*. 2020. Vol. 234. 117807. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117807>
 10. Franco-Luján V., Montejo-Alvaro F., Ramírez-Arellanes S., Martínez H., Medina D. Nanomaterial-reinforced Portland-cement-based materials: a review. *Nanomaterials*. 2023. Vol. 13. No. 8, 1383. <https://doi.org/10.3390/nano13081383>
 11. Fediuk R.S. Research on water absorption fine-grained fiber-reinforced concrete on composite binders. *Fundamental research*. 2016. No. 2 (Part 2), pp. 303–307. DOI 10.17513/fr.39927
 12. Soudabeh Dezhampanah, Iman M. Nikbin, Sadegh Mehdipour, Reza Mohebbi, Hamid Habibi Moghadam. Fiber-reinforced concrete containing nano – TiO_2 as a new gamma-ray radiation shielding materials. *Journal of Building Engineering*. 2021. Vol. 44. 102542. doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102542
 13. Пшембаев М.К., Ковалев Я.Н., Яглов В.Н. Особенности процессов гидратации и твердения цемента в присутствии наночастиц // *Вестник ВКГТУ*. 2020. № 1. С. 175–183. DOI: 10.51885/15614212_2020_1_175
 13. Pshembraev M.K., Kovalev Ya.N., Yaglov V.N. Features of hydration and cement hardening processes in the presence of nanoparticles. *Vestnik VKGTU*. 2020. No. 1, pp. 175–183. (In Russian). DOI: 10.51885/15614212_2020_1_175
 14. El-Gamal S.M.A., Abo-El-Enein S.A., El-Hosiny F.I. et al. Thermal resistance, microstructure and mechanical properties of type I Portland cement pastes containing low-cost nanoparticles. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2018. 131, pp. 949–968. <https://doi.org/10.1007/s10973-017-6629-1>
 15. Копаница Н.О., Демьяненко О.В., Куликова А.А., Самченко С.В., Козлова И.В., Лукьянова Н.А. Влияние способов активации на структурно-технологические характеристики наномодифицированных цементных композиций // *Нанотехнологии в строительстве*. 2022. Т. 14. № 6. С. 481–492. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2022-14-6-481-492>
 15. Kopanitsa N.O., Demyanenko O.V., Kulikova A.A., Samchenko S.V., Kozlova I.V., Lukyanova N.A. Influence of activation methods on the structural and technological characteristics of nanomodified cement compositions. *Nanotekhnologii v stroitel'stve*. 2022. Vol. 14. No. 6, pp. 481–492. (In Russian). <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2022-14-6-481-492>
 16. Aref Sadeghi-Nik, Javad Berenjani, Ali Bahari, Abdul Sattar Safaei, Mehdi Dehestani. Modification of microstructure and mechanical properties of cement by nanoparticles through a sustainable development approach. *Construction and Building Materials*. 2017. Vol. 155, pp. 880–891. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.08.107>
 17. Muzenski Scott, Flores Vivian Ismael, Sobolev K. Ultra-high strength cement-based composites designed with aluminum oxide nano-fibers. *Construction and Building Materials*. 2019. Vol. 220, pp. 177–186. [10.1016/j.conbuildmat.2019.05.175](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.05.175)
 18. Abo-El-Enein S.A., El-Hosiny F.I., El-Gamal S.M.A., Amin M.S., Ramadan M. Gamma radiation shielding, fire resistance and physicochemical characteristics of Portland cement pastes modified with synthesized Fe_2O_3 and ZnO nanoparticles. *Construction and Building Materials*. 2018. Vol. 173, pp. 687–706. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.071>
 19. Madani Hesam, Boroujeni Amir, Pourjahanshahi Amin. Mechanical properties and photocatalytic reactions of

- zinc oxide nanoparticles in the cement environment. *Amirkabir (Journal of Science and Technology)*. 2018. Vol. 50. 257. DOI:10.22060/ceej.2017.12333.519
20. Karthik Chintalapudi, Rama Mohan Rao Pannem. Strength properties of graphene oxide cement composites. *Materials Today: Proceedings*. 2021. Vol. 45. Part 4, pp. 3971–3975. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.369>
 21. Liu Y., Shi T., Zhao Y. et al. Autogenous shrinkage and crack resistance of carbon nanotubes reinforced cement-based materials. *International Journal of Concrete Structures and Materials*. 2020. Vol. 14. 43. <https://doi.org/10.1186/s40069-020-00421-0>
 22. Dong Lu, Xianming Shi, Jing Zhong. Interfacial bonding between graphene oxide coated carbon nanotube fiber and cement paste matrix. *Cement and Concrete Composites*. 2022. Vol. 134, 104802. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2022.104802>
 23. Nehal Hamed, M.S. El-Feky, Mohamed Kohail, El-Sayed A.R. Nasr. Effect of nano-clay de-agglomeration on mechanical properties of concrete. *Construction and Building Materials*. 2019. Vol. 205, pp. 245–256. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.02.018>
 24. Zemei Wu, Caijun Shi, K.H. Khayat, Shu Wan. Effects of different nanomaterials on hardening and performance of ultra-high strength concrete (UHSC). *Cement and Concrete Composites*. 2016. Vol. 70, pp. 24–34. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2016.03.003>
 25. Khuzin A., Ibragimov R. Processes of structure formation and paste matrix hydration with multilayer carbon nanotubes additives. *Journal of Building Engineering*. 2020. Vol. 35. 102030. DOI: 10.1016/j.job.2020.102030
 26. Chen Wei, Xu Longfei, Hua, Wang, Huang Heng Li, Zhou. Mechanical properties and shrinkage behavior of concrete-containing graphene-oxide nanosheets. *Materials (Basel)*. 2020. Vol. 13. 590. DOI: 10.3390/ma13030590
 27. Karthik Chintalapudi, Rama Mohan Rao Pannem. Enhanced chemical resistance to sulphuric acid attack by reinforcing graphene oxide in ordinary and Portland pozzolana cement mortars. *Case Studies in Construction Materials*. 2022. Vol. 17. e01452. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01452>
 28. Liu Changjiang, He Xin, Deng Xiaowei, Wu Yuyou, Zheng Zhoulian, Liu Jian, Hui David. Application of nanomaterials in ultra-high performance concrete: a review. *Nanotechnology Reviews*. 2020. Vol. 9. No. 1, pp. 1427–1444. <https://doi.org/10.1515/ntrev-2020-0107>
 29. Jamal A. Abdalla, Blessen Skariah Thomas, Rami A. Hawileh, Jian Yang, Bharat Bhushan Jindal, Erandi Ariyachandra. Influence of nano-TiO₂, nano-Fe₂O₃, nanoclay and nano-CaCO₃ on the properties of cement/geopolymer concrete. *Cleaner Materials*. 2022. Vol. 4, 100061. <https://doi.org/10.1016/j.clema.2022.100061>
 30. Yakovlev G., Drochytka R., Skripiūnas G., Urkhanova L., Polyanskikh I., Pudov I., Karpova E., Saidova Z., Elrefai A.E.M.M. Effect of ultrafine additives on the morphology of cement hydration products. *Crystals*. 2021. Vol. 11, 1002. <https://doi.org/10.3390/cryst11081002>
 31. Patent EP 3 138 932 A1 Verfahren und vorrichtung zur gewinnung eines pulvers aus partikeln von wolfram oder wolframverbindungen mit einer partikelgrösse im nano-,mikron- oder submikronbereich. Galuga A., Baranov G., Gavrish V., Smirnov S., Losenkov A., Vostrognutov S. Declared 01.09.2015. Published 08.03.2017.
 32. Gavrish V., Chayka T., Baranov G., Oleynik A.Y., Shagova Y.O. Investigation of the influence of tungsten carbide nanopowder WC and the mixture of tungsten carbides and titanium carbides (WC, TiC) on the change of concrete performance properties. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. Vol. 1866. No. 1. 012008. DOI: 10.1088/1742-6596/1866/1/012008
 33. Чайка Т.В., Гавриш В.М., Павленко В.И., Черкашина Н.И. Влияние высокодисперсного порошка смеси WC и TiC на свойства композиционных материалов // *Нанотехнологии в строительстве*. 2023. Т. 15. № 1. С. 14–26. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2023-15-1-14-26>.
 33. Chayka T.V., Gavrish V.M., Pavlenko V.I., Cherkashina N.I. Influence of high-dispersive powder mixture of WC and TiC on the composite materials properties. *Nanotekhnologii v stroitel'stve*. 2023. Vol. 15. No. 1, pp. 14–26. (In Russian). <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2023-15-1-14-26>
 34. Tan Z., Bernal S.A. Provis J.L. Reproducible minislump test procedure for measuring the yield stress of cementitious pastes. *Materials and Structures*. 2017. Vol. 50. 235. DOI:10.1617/s11527-017-1103-x
 35. Xiang Chen, Haiming Chen, Qian Chen, Abubakar. S. Lawi, Jie Chen. Effect of partial substitution of cement with dolomite powder on glass-fiber-reinforced mortar. *Construction and Building Materials*. 2022. Vol. 344. 128201. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.128201
 36. Ahmad Alzaza, Katja Ohenoja, Rawia Dabbebi, Mirja Illikainen. Enhancing the hardened properties of blended cement paste cured at 0°C by using alkali-treated ground granulated blast furnace slag. *Cement and Concrete Composites*. 2022. Vol. 134. 104757. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2022.104757>
 37. Elijah Adesanya, Amarachi Ezu, Hoang Nguyen, Christine Röbber, Harisankar Sreenivasan, Katja Ohenoja, Paivo Kinnunen, Mirja Illikainen. Hydration of blended ladle slag and calcium aluminate cement. *Journal of Building Engineering*. 2023. Vol. 66. 105855. <https://doi.org/10.1016/j.job.2023.105855>
 38. Klemczak B., Batog M. Heat of hydration of low-clinker cements. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2016. Vol. 123, pp. 1351–1360. <https://doi.org/10.1007/s10973-015-4782-y>
 39. Maria C.G. Juenger, Rafat Siddique. Recent advances in understanding the role of supplementary cementitious materials in concrete. *Cement and Concrete Research*. 2015. Vol. 78. Part A, pp. 71–80. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.03.018>
 40. Ouyang X., Koleva D.A., Ye G. et al. Insights into the mechanisms of nucleation and growth of C–S–H on fillers. *Materials and Structures*. 2017. Vol. 50. 213. <https://doi.org/10.1617/s11527-017-1082-y>



INTERNATIONAL
ASSOCIATION OF
FOUNDATION
CONTRACTORS

МЕЖДУНАРОДНАЯ
АССОЦИАЦИЯ
ФУНДАМЕНТОСТРОИТЕЛЕЙ

КАЛЕНДАРЬ МЕРОПРИЯТИЙ 2024 года*

КОНФЕРЕНЦИИ, ФОРУМЫ И СЕМИНАРЫ МЕЖДУНАРОДНОЙ АССОЦИАЦИИ ФУНДАМЕНТОСТРОИТЕЛЕЙ

ЯНВАРЬ

СЕМИНАР «Инженерные изыскания, проектирование и строительство сейсмостойких зданий и сооружений»

Казахстан, Алматы 17–19 января

ФЕВРАЛЬ

СЕМИНАР «Освоение подземного пространства в условиях плотной городской застройки» (курс лекций в НИИОСП им. Н. М. Герсевича АО «НИЦ «Строительство»)

Москва 14–15 февраля

МАРТ

СЕМИНАР «Инженерные изыскания и проектирование фундаментов на многолетнемерзлых грунтах» (курс лекций в НИИОСП им. Н. М. Герсевича АО «НИЦ «Строительство»)

Москва 13–15 марта

АПРЕЛЬ

КОНФЕРЕНЦИЯ «Гидротехнические сооружения: современные технологии проектирования, строительства и эксплуатации»

Сочи 3–4 апреля

МАЙ

КОНФЕРЕНЦИЯ «Основания и фундаменты: новые технологии, специальная техника, оборудование и материалы» (в рамках выставки СТТ Expo)

Москва 29–30 мая

ИЮНЬ

КОНФЕРЕНЦИЯ «Опоры и фундаменты для ВЛ: технологии проектирования и строительства»

Санкт-Петербург 26–28 июня

СЕНТЯБРЬ

КОНФЕРЕНЦИЯ «Инженерная защита территорий, зданий и сооружений»

Пермь 18–19 сентября

НОЯБРЬ

МЕЖДУНАРОДНЫЙ СТРОИТЕЛЬНЫЙ ФОРУМ «АРКТИКА»

Москва 13–15 ноября

ДЕКАБРЬ

СЕМИНАР «Инженерные изыскания, расчет и проектирование оснований и фундаментов в сложных грунтовых условиях» (курс лекций в НИИОСП им. Н. М. Герсевича АО «НИЦ «Строительство»)

Москва 4–5 декабря

* В календарь 2024 года могут быть внесены изменения, касающиеся корректировки тематики, сроков и места проведения мероприятий.

За дополнительной информацией можно обратиться по телефонам: +7 (495) 66-55-014, +7 925 575-78-10
e-mail: info@fc-union.com, www.fc-union.com

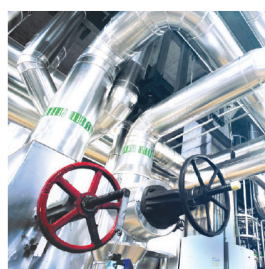
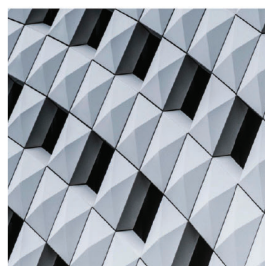


ИнтерСтрой Экспо

МЕЖДУНАРОДНАЯ
ВЫСТАВКА
строительных,
отделочных
материалов
и инженерного
оборудования

16 | 17 | 18
АПРЕЛЯ
2024

Санкт-Петербург
КВЦ «ЭКСПОФОРУМ»



КОНГРЕСС ПО СТРОИТЕЛЬСТВУ IBC

Организатор — компания MVK
Офис в Санкт-Петербурге

MVK Международная
Выставочная
Компания



+7 (812) 401 69 55, interstroyexpo@mvk.ru

Забронируйте стенд:
interstroyexpo.com