Stroitel'nye Materialy [Construction Materials]

ISSN 0585-430X (Print)
ISSN 2658-6991 (Online)

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ®

№ 5

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ ИЗДАЕТСЯ С 1955 г. WWW.RIFSM.RU WWW.JOURNAL-CM.RU МАЙ 2019 г. (770)

СИЛИКАТЭКС

XIII Международная конференция «Развитие производства силикатного кирпича»

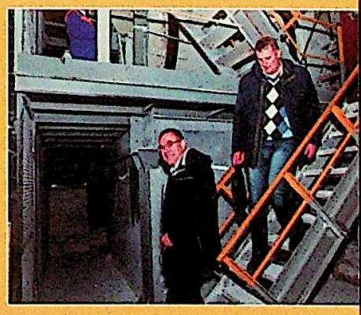
24–25 сентября 2019 г. г. Нижний Новгород Маринс Парк Отель




Программа работы:

24 сентября – пленарное заседание
25 сентября – посещение ООО «Борский силикатный завод»



Генеральный спонсор: masa Milestone to your success.

Спонсор конференции: EIRICH

Организатор конференции журнал Строительные Материалы®

Оргкомитет:

Руководитель проекта – Юмашев Алексей Борисович Менеджер проекта – Юмашева Елена Ивановна
Телефон/факс: (499) 976-22-08, 976-20-36, (916) 610-39-90, (985) 768-98-97
silikatex@bk.ru mail@rifsm.ru www.rifsm.ru
Адрес для корреспонденции: 125319, Москва, ул. Черняховского, д. 9, корп. 1, кв. 1
редакция журнала «Строительные материалы»®

МИНСТРОЙ
РОССИИ

НИИ

МИНИСТЕРСТВО СТРОИТЕЛЬСТВА И ЖИЛИЩНО-КОММУНАЛЬНОГО ХОЗЯЙСТВА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ СТРОИТЕЛЬНОЙ ФИЗИКИ
ЦЕНТР ЭКСПЕРТИЗ, ИССЛЕДОВАНИЙ И ИСПЫТАНИЙ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

2-5 июля 2019 года состоится Международная научная конференция
X Академические чтения, посвященные памяти академика РААСН Осипова Г.Л.,
«АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ СТРОИТЕЛЬНОЙ ФИЗИКИ. ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ. НАДЕЖНОСТЬ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ и ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ»

4 июля 2019 года будет проходить День немецкой строительной науки.

На конференции планируется работа по следующим направлениям:

- Энергосбережение в строительстве
- Строительная теплофизика
- Строительная и архитектурная акустика
- Строительная светотехника
- Экология в строительстве
- Долговечность и прочность строительных конструкций зданий и сооружений
- Проблемы технического регулирования в строительстве
- Ремонт и эксплуатация объектов коммунального хозяйства
- Высотное строительство
- Научная школа для молодежи.

В рамках конференции будет проводиться **Конкурс**, на котором молодые специалисты, аспиранты и студенты смогут представить свои проекты и разработки в номинациях:

- Лучший дипломный проект, включающий раздел "Строительная физика"
- Лучшая работа по направлению "Строительная и архитектурная акустика"
- Лучший доклад в рамках научной школы для молодежи "Строительная физика, энергосбережение и экологическая безопасность".

Победителям вручается Премия имени академика РААСН Осипова Г.Л.

- Оригинальное и талантливое решение акустической задачи.

Приз от компании "Brüel & Kjær" (Дания).

- Оригинальный подход к решению задачи энергосбережения в зданиях.

Приз от компании "Сен-Гобен Строительная Продукция Рус".

Специальный приз Ассоциации производителей керамических стеновых материалов.

За значительный вклад в развитие строительной физики ведущим ученым и специалистам вручается Золотая медаль имени академика РААСН Осипова Г.Л. и Памятный знак.

Для участия в **Конкурсе** необходимо в срок **до 01 июня 2019** года отправить материалы (конкурсная работа, заявка) по адресу **org.com@niisf.ru** с пометкой **«Участие в конкурсе»**.

В рамках конференции будут опубликованы **Статьи** в ведущих российских научных журналах.

Отбор статей для журналов будет проводиться комиссией оргкомитета и редакцией журналов.

Для участия в конференции необходимо в срок **до 05 июня 2019** года отправить **Заявку** по адресу **org.com@niisf.ru**

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

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ®

№5

Основан в 1955 г. (770) май 2019 г.

Обсуждаем нормативную базу отрасли

Ю.В. ПУХАРЕНКО, В.Д. СТАРОВЕРОВ, А.А. ГЕРАСИМЕНКО
Повышение безопасности и качества строительных материалов на основе оценки опыта и деловой репутации предприятия 3

Современные вяжущие материалы

Е.А. ШОШИН, В.В. СТРОКОВА
Влияние природы модифицирующего углевода на свойства силикатных добавок для цементных систем 9

М.В. ЛАБУЗОВА, Е.Н. ГУБАРЕВА, Ю.Н. ОГУРЦОВА, В.В. СТРОКОВА
Использование фотокаталитического композиционного материала в цементной системе 16

XXVII Общее собрание членов Российской академии архитектуры и строительных наук состоялось 17–19 апреля 2019 г. в Москве в Центральном доме архитектора *(Информация)* 22

В Красногорске торжественно открыт завод КНАУФ «Новый дом» по производству систем для модульного домостроения *(Информация)* 24

Н. Эль АШКАР, А. МОРСИ, А. ТАРЕК
Использование наночастиц, извлеченных из рисовой шелухи, в качестве минерального вяжущего 25

Материалы с ячеистой структурой

М.А. ГАЗИЕВ
Оценка потерь предварительного напряжения в арматуре от ползучести автоклавного газобетона 32

А.Л. ПОПОВ, В.В. СТРОКОВА
Фибропенобетон автоклавного твердения с использованием композиционного вяжущего 38

Отходы в производстве строительных материалов

С.Н. ЛЕОНОВИЧ, Д.В. СВИРИДОВ, А.Л. БЕЛАНОВИЧ, Л.С. КАРПУШЕНКОВА, С.А. КАРПУШЕНКОВ
Пористый керамический материал на основе глины и отходов производства гранитного щебня 45

Ю.Г. БОРИСЕНКО, Р.М. АЗАН, Д.П. ШВАЧЁВ, Д.А. ВОРОБЬЕВ
Битумоминеральные композиции для дорожного строительства с использованием бытовых отходов стекла (стеклобоя) 51

Г.И. ЯКОВЛЕВ, Д.А. КАЛАБИНА, В.П. ГРАХОВ, А.Ф. БУРЬЯНОВ, А.Ф. ГОРДИНА, К.А. БАЖЕНОВ, С.В. НИКИТИНА
Фторангидритовые композиции с легким заполнителем на основе вспученного перлитового песка 57

Результаты научных исследований

А.А. АСКАДСКИЙ, Т.А. МАЦЕЕВИЧ, В.И. КОНДРАЩЕНКО
Водопоглощение древесно-полимерных композитов на основе ПВХ с частичной заменой древесного наполнителя на

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

Monthly scientific-technical and industrial journal

STROITEL'NYE MATERIALY®

№5

Founded in 1955

(770) May 2019

Discuss the normative base of industry

Yu.V. PUKHARENKO, V.D. STAROVEROV, A.A. GERASIMENKO
Improving the Safety and Quality of Building Materials Based on the Assessment of Experience and Business Reputation of the Enterprise 3

Modern binding materials

E.A. SHOSHIN, V.V. STROKOVA
Influence of the Nature of Modifying Carbohydrate on the Properties of Silicate Additives for Cement Systems 9

M.V. LABUZOVA, E.N. GUBAREVA, Y.N. OGURTSOVA, V.V. STROKOVA
The Use of the Photocatalytic Composite Material in the Cement System 16

The XXVII General Meeting of the Members of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences was Held on April 17–19, 2019 in Moscow at the Central House of the Architect *(Information)* 22

The Factory "New House" for Producing KNAUF Systems for Modular House Building was Solemnly Opened in Krasnogorsk *(Information)* 24

N. El ASHKAR, A. MORSY, A. TAREK
Using of Nanoparticles Extracted from Rice Husk as Cementitious Material for Sustainability Issues 25

Materials with cellular structure

M.A. GAZIEV
Estimation of Pre-Stress Losses in the Reinforcement Due to the Creep of Autoclaved Aerated Concrete 32

A.L. POPOV, V.V. STROKOVA
Fiber Foam Concrete of Autoclave Hardening with the Use of Composite Binder 38

Waste in production of building materials

S.N. LEONOVICH, D.V. SVIRIDOV, A.L. BELANOVICH, L.S. KARPUSHENKOVA, S.A. KARPUSHENKOV
Porous Ceramic Material Based on Clay And Waste of Production of Granite Rubble 45

Yu.G. BORISENKO, R.M. AZAN, D.P. SHVACHEV, D.A. VOROBIEV
Bitumen-Mineral Compositions for Road Construction with the Use of Household Waste Glass (Cullet) 51

G.I. YAKOVLEV, D.A. KALABINA, V.P. GRAKHOV, A.F. BURYANOV, A.F. GORDINA, K.A. BAZHENOV, S.V. NIKITINA
Fluoro-Anhydrite Compositions with a Light Filler Based on Expanded Perlite Sand 57

Results of scientific research

A.A. ASKADSKII, T.A. MATSEEVICH, V.I. KONDRASHCHENKO
Water Absorption of Wood-Polymer Composites Based on PVC with Partial Replacement of Wood Filler by Mineral One 62

E.E. SHALYI, S.N. LEONOVICH, L.V. KIM
Degradation of Reinforced Concrete Structures of Marine Works from the Combined Impact of Carbonation and Chloride Aggression 67

Editorial address: 9/3 Dmitrovskoye Highway, 127434, Moscow, Russian Federation
Tel./fax: (499) 976-22-08, 976-20-36
mail@rifsm.ru; www.rifsm.ru; www.journal-cm.ru

УДК 658.562:691:69.009.1
DOI: https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-770-5-3-8

Ю.В. ПУХАРЕНКО, д-р техн. наук, член-корр. РААСН (tsik@spbgasu.ru),
В.Д. СТАРОВЕРОВ, канд. техн. наук, А.А. ГЕРАСИМЕНКО, студент
Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (190005, Санкт-Петербург, ул. 2-я Красноармейская, 4)

Повышение безопасности и качества строительных материалов на основе оценки опыта и деловой репутации предприятия

В настоящее время для повышения качества строительных материалов, изделий и конструкций предлагается использовать существующие способы регулирования взаимоотношений «производитель – строитель». При этом есть вероятность, что введение новых ужесточающих мер воздействия со стороны государства в форме обременительного обязательного подтверждения соответствия продукции может привести к обратному эффекту – снижению качества. В то же время формирование системы контроля качества с учетом оценки опыта и деловой репутации производителей строительной продукции обеспечит повышение прозрачности рынка, функционирующего на принципах доверия. Такой подход отвечает европейским принципам выхода на рынок строительной продукции и способствует развитию здоровой конкуренции, устранению недобросовестных производителей, снижению объема контрафактной и фальсифицированной строительной продукции.

Ключевые слова: качество продукции, строительный контроль, входной контроль, техническое регулирование в строительстве, подтверждение соответствия.

Для цитирования: Пухаренко Ю.В., Староверов В.Д., Герасименко А.А. Повышение безопасности и качества строительных материалов на основе оценки опыта и деловой репутации предприятия // *Строительные материалы*. 2019. № 5. С. 3–8. DOI: https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-770-5-3-8

Yu.V. PUKHARENKO, Doctor of Sciences (Engineering), Corresponding member of RAACS (tsik@spbgasu.ru),
V.D. STAROVEROV, Candidate of Sciences (Engineering), A.A. GERASIMENKO, student
St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (4, 2-d Krasnoarmeyskaya st., St. Petersburg, 190005, Russian Federation)

Improving the Safety and Quality of Building Materials Based on the Assessment of Experience and Business Reputation of the Enterprise

At present, to improve the quality of building materials, products and structures, it is proposed to use the existing methods of regulating the "manufacturer – builder" relationship. At the same time, there is a possibility that the introduction of new tightening measures of influence by the state in the form of burdensome mandatory confirmation of compliance of products can lead to the opposite effect – a decrease in quality. At the same time, the formation of a quality control system with due regard for the assessment of the experience and business reputation of manufacturers of construction products will increase the transparency of the market, functioning on the trust principles. This approach meets the European principles of entry into the market of construction products and contributes to the development of healthy competition, the elimination of unscrupulous manufacturers, reducing the volume of counterfeit and falsified construction products.

Keywords: construction control, incoming control, technical regulation in construction, confirmation of compliance.

For citation: Pukharenko Yu.V., Staroverov V.D., Gerasimenko A.A. Improving the safety and quality of building materials based on the assessment of experience and business reputation of the enterprise. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2019. No. 5, pp. 3–8. (In Russian). DOI: https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-770-5-3-8

Согласно Федеральному закону от 27 декабря 2002 г. № 184-ФЗ «О техническом регулировании» под безопасностью продукции понимают «состояние, при котором отсутствует недопустимый риск, связанный с причинением вреда жизни или здоровью граждан, имуществу физических или юридических лиц, государственному или муниципальному имуществу, окружающей среде, жизни или здоровью животных и растений». Очевидно, для обеспечения соответствующего уровня безопасности зданий и сооружений необходимо в первую очередь предъявлять соответствующие требования к строительным материалам, изделиям и конструкциям с учетом оценки риска возникновения и развития негативных сценариев. В этой связи кажутся оправданными внедряемые государством меры регулирования сферы производства строительных материалов, изделий и конструкций, направленные на ужесточение процедур контроля посредством расширения номенклатуры продукции, подлежащей обязательному подтверждению соответствия. Предполагается, что таким образом будут обеспечены условия достижения необходимого уровня безопасности и повышения качества продукции, одновременно с этим рынок сможет очиститься от контрафакта и фальсификата. На самом деле увеличение числа объектов такого контроля зачастую научно не обосновано, процесс не носит системного характера, проводится без оценки рисков и анализа социально-экономических последствий от изменения законодательства, а количество проверок не сокращается, а наоборот, увеличивается [1]. Очевидно, что такой подход приводит к избыточности обязательных требований и выгоден только ограниченному кругу производителей, как правило,

крупным предприятиям отрасли. В этой связи можно привести некоторые примеры.

Так, согласно анализу, проведенному ГК «Городской центр экспертиз», причиной обрушения зданий и сооружений на территории России в период с мая 2013 по май 2014 г. стало применение строительных материалов низкого качества (брака) в 5% случаев, а уже в период с мая 2017 по май 2018 г. зафиксирован их рост до 9% [2]. Становится очевидным, что ужесточение требований со стороны государства не приводит к заменимому росту качества строительных материалов. Таким образом это увеличивает вероятность недостижения целей технического регулирования в целом и технического регламента «О безопасности задний и сооружений» в частности, несмотря на расширение перечня объектов обязательного подтверждения соответствия. Другими словами, преследуемые государством цели не согласуются с получаемыми результатами.

Еще одним примером этого может служить ситуация вокруг обязательной сертификации цементов. Парадоксальность ее подтверждается мнением президента ассоциации «Независимые производители цемента» А. Дрожжина, который констатировал, что в 2015 г. доля фальсифицированного цемента достигала 50%. И, несмотря на введение с 2016 г. обязательной сертификации цемента и ужесточение ответственности в сфере оборота фальсифицированной строительной продукции, решить проблему принципиальным образом не удалось. В настоящее время все производители цемента прошли процедуру обязательной сертификации, но доля фальсифицированной или контрафактной продукции по-прежнему оценивается в пределах 20–30%, а в отдельных сегментах – до 60% [3, 4]. Но даже при выявлении несоответствующей продукции возникает серьезная проблема по изъятию этих материалов.

Таким образом, ужесточение норм нельзя признать в контексте рассматриваемой проблемы эффективным и действенным механизмом. Задача государства должна состоять не в расширении номенклатуры продукции, подлежащей обязательному подтверждению соответствия, и не в ужесточении надзорно-контрольных функций [1], а в определении минимально необходимых, но критически важных показателей, которые должны быть измерены и им дана соответствующая оценка. По сути, государство уже располагает необходимым арсеналом регулирующих мер, в том числе и закрепленных в Кодексе об административных правонарушениях, в частности ст. 9.4 КоАП РФ, касающейся недобросовестных изготовителей строительных материалов. Тем не менее производители, как показывает судебная практика, не несут уголовной ответственности и перекладывают вину на строительные компании, даже если были использованы небезопасные и некачественные материалы.

Для выявления таких ситуаций и своевременного их предупреждения целесообразно как минимум вернуться к существующей ранее (в дореформенный

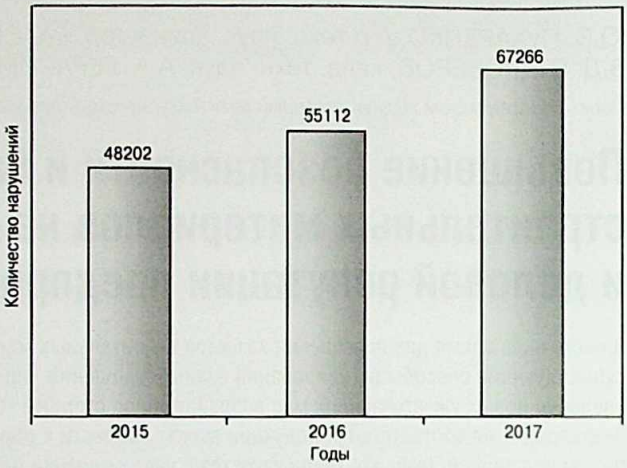


Рис. 1. Статистика нарушений на строительных объектах России [9]

период сферы технического регулирования) системе, когда органы государственного строительного надзора имели полномочия проведения плановых проверок производителей строительных материалов, но уже с учетом сложившейся правоприменительной практики [5, 6]. Для этого требуется вменить органам Госстройнадзора возможность проведения выборочного аудита строительных материалов на строительных объектах и на производстве с учетом не жестких способов государственного контроля, основанного на жалобах, и прежде всего со стороны конкурентов по рынку, а предполагающего использование системы оценки рисков [7, 8].

Данное предложение может быть обосновано тем [9], что количество выявляемых строительными госорганами нарушений из года в год растет (рис. 1). При этом, если позволить проводить «аудит» производства строительных материалов, то аварийных ситуаций, таких, к примеру, как обрушение железобетонных конструкций при строительстве пешеходного моста на станции Смоляниново Дальневосточной железной дороги, когда по причине применения некачественных изделий погибло два человека, можно избежать.

Однако следует понимать, что одно только ужесточение контроля качества, особенно в случае принуждения к дополнительным лабораторным испытаниям, может привести и к обратному эффекту, когда некондиционной продукции на рынке станет больше. Например, при введении обязательного декларирования бетонных смесей согласно проекту национального стандарта «Правила декларирования соответствия смесей и растворов строительных» необходимо будет проводить периодические испытания в сторонней аккредитованной лаборатории, для чего требуется отбирать контрольные пробы (образцы) в количестве N против необходимых сейчас Z. С точки зрения математической статистики, чем больше выборка, тем более достоверными будут получаемые результаты, следовательно, это должно способствовать более тщательной организации тех-

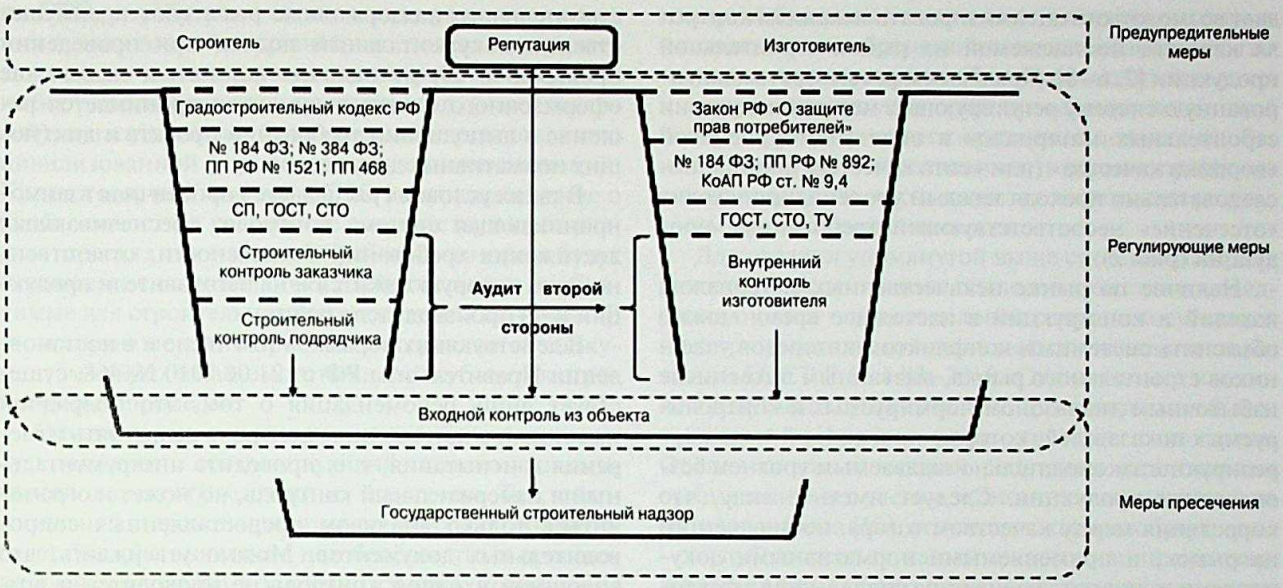


Рис. 2. Модель «воронки качества»

Рис. 3. Модели качества продукции на основе принципов технического регулирования

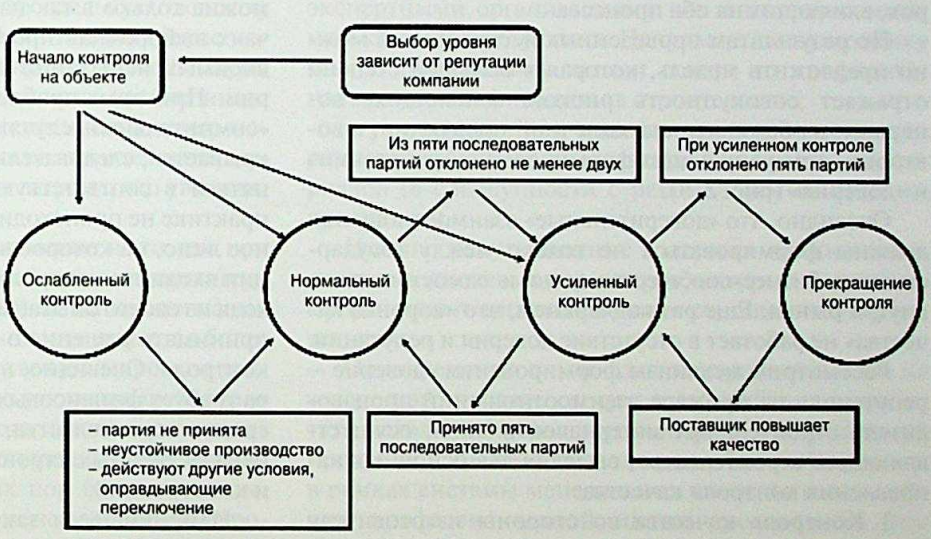


Рис. 4. Схема контроля качества

нологических процессов, что неизбежно приводит к снижению брака. Но в реальных условиях необходимо учитывать сложившиеся экономические отношения между участниками рынка, которые заставляют производителя снижать издержки всеми способами. При этом возникнет соблазн в первую очередь сэкономить на испытаниях, которые, как правило, проводятся с привлечением третьей стороны, и проводить испытания для той же выборки из Z, что позволит сохранить стоимость продукции на прежнем уровне. Более того, зачастую можно встретить ситуацию, когда производитель вообще отказывается от каких-либо реальных испытаний, проводя их «на бумаге». Несомненно, добросовестные производители не могут работать по данной схеме, поэтому проводимые ими комплексные испытания превращаются в дополнительный барьер. Становится очевидной бесперспективность ужесточения требований, связанных с проведением испытаний в независимых лабораториях, и целесообразность развития собственной системы контроля качества внутри предприятия. Именно такой механизм отвечает формированию цивилизованных отношений добросовестной конкуренции и будет стимулировать построение системы «доверие – репутация».

В этой связи будет уместным проанализировать накопленный строительный опыт и попытаться переосмыслить цели и задачи обязательного подтверждения соответствия строительных материалов, что

даст возможность оптимизировать механизм контроля качества поставляемой на рынок строительной продукции [2, 6–8]. Предлагаем рассмотреть адаптированную систему регулирующих мер для индустрии строительных материалов в виде многоуровневой «воронки качества» (или «сита качества»), когда, последовательно проходя каждый уровень, происходит «отсечение» несоответствующей требованиям продукции (рис. 2).

Наличие на рынке некачественных материалов, изделий и конструкций в настоящее время можно объяснить системным конфликтом интересов участников строительного рынка, вызванным в том числе избыточным диапазоном нормируемых и контролируемых показателей, которые не в полной мере коррелируют с законодательно задаваемым уровнем безопасности продукции. Следует иметь в виду, что корреляция между качеством товара, поставляемого на рынок, и применяемыми нормативными документами зависит от количества совпадающих факторов, влияющих на оба процесса.

По результатам проведенных исследований можно предложить модель, которая в большей степени отражает совокупность рисков, влияющих, во-первых, на безопасность конечной продукции, а во-вторых, стимулирующих формирование «репутации» и «доверия» (рис. 2, 3).

Очевидно, что «доверительные» взаимоотношения должны формироваться не только между государством и бизнес-сообществом, но и самостоятельно внутри рынка. Еще раз подчеркнем, что «воронка качества» не работает в отсутствие доверия и репутации.

Рассмотрим механизм формирования «доверие – репутация» на примере взаимоотношений производителя строительных материалов и лица, осуществляющего строительство, выделив два основных направления контроля качества.

1. Контроль качества со стороны изготовителя (поставщика) продукции. В данном случае воздействующим методом являются действующие национальные стандарты и иные нормативные документы, регулирующие деятельность производителей. При этом формированию комплексного функционирования положений различных нормативных документов будет способствовать система менеджмента качества организации, благодаря которой можно разработать индикативные критерии соблюдения соответствующих требований, предъявляемых как к продукции, так и к процессам ее изготовления.

2. Контроль качества со стороны производителей работ. Для этого осуществляется входной контроль поставляемой продукции. Как правило, он несет сугубо документальный характер, а реальные испытания проводятся в крайне редких случаях, но и этими испытаниями определяется ограниченный ряд технических свойств. Полный контроль и оценка соответствия поставляемой на объект продукции декларируемым критериям на основании таких испытаний фактически невозможны. Органы государственного строительного надзора также реализуют преимущественно документальный подход при проведении проверок: в случае наличия полного и надлежаще оформленного пакета документов принимается решение о выполнении требований проекта и диктующих нормативных документов.

В таких условиях распадается органичная взаимопроникающая система контроля, обеспечивающая достижения требований безопасности, ответственность за которую ложится и на изготовителя продукции и на производителя работ.

В действующих нормах, в том числе и в постановлении Правительства РФ от 21.06.2010 № 468, существует лишь рекомендация о том, что подрядчик имеет право при входном контроле выполнять измерения и испытания, т. е. проводить инструментальный и измерительный контроль, но может и ограничиться только анализом предоставленных сопроводительных документов. Можно утверждать, что сплошной входной контроль не проводится и возможна только в так называемых сомнительных случаях выборочная проверка путем проведения независимых испытаний в аккредитованной лаборатории. При этом проблемой является то, что термин «сомнительный случай» законодательством не раскрывается, следовательно, это понятие должно уточняться в соответствующих разделах ППР, чего на практике не происходит. Таким образом, ответственное лицо, на которое возложены функции организации входного контроля, должно самостоятельно, исходя из своего опыта, знаний, внутренних убеждений принимать решение о проведении дополнительного контроля. Очевидно, в силу того, что такая процедура требует финансовых затрат и влияет на удлинение сроков строительства, и происходит использование некачественных строительных материалов, изделий и конструкций.

Изменившееся законодательство привело к запрету планового государственного контроля заводов-изготовителей, но при этом не был сформулирован четкий альтернативный путь формирования новых «правил игры», базирующихся на принципах добросовестности и доверия, для создания системы контроля «изготовитель — строитель», что соответствует мировой практике, когда в системе оценки соответствия смещается тренд с сертификации к инспектированию (как со второй стороны, так и с привлечением независимых органов). Решению именно этой задачи необходимо уделить всесторонние внимание.

Анализ законченных объектов строительства и возникших при этом опасных ситуаций применения некачественной строительной продукции показал, что необходимо на базе саморегулируемых организаций разработать стандарты организации, в которых четко определить обобщенный алгоритм входного контроля на строительных объектах с уточнением возможных «сомнительных» случаев проведения выборочных операций. Целесообразно в этих

же СТО разработать и типовые программы проведения аудита второй стороной, что позволит строителю еще до начала производства работ выполнить выбор потенциальных поставщиков (изготовителей), а изготовителю быть готовым к установлению цивилизованной формы деловых взаимоотношений. Кроме того, необходимо в СТО ввести положение о необходимости в разработке соответствующего раздела проекта производства работ, в котором будут отражены не номинальные, а действительно необходимые для строительного объекта этапы контроля. В этом случае понятие приемки материалов «по документам» уйдет из взаимоотношений субъектов строительного процесса.

Однако перед внедрением каких-либо новаций следует выполнить соответствующий технико-экономический анализ последствий их внедрения. Так, положительной стороной принятия такого рода требований будет быстрое выявление недобросовестных производителей материалов и уменьшится риск поступления некачественной продукции на строительную площадку для прямого использования. При этом внедрение новых методов испытаний, расширение номенклатуры исследуемых характеристик не являются необходимым условием. С другой стороны, внедрение таких мер может повлиять на увеличение сроков строительства, могут возникнуть дополнительные затраты, что увеличит себестоимость строительства.

Однако следует обратить внимание на то, что при этом будет формироваться новый принцип организации строительства, основанный не на компенсации ущерба, а на его предупреждении, что является более действенным механизмом и отвечает мировым тенденциям с учетом внедряемого рискоориентированного подхода, в основе которого лежит предупредительный принцип, а не существующий сейчас компенсационный подход (до сих пор бытует мнение, что компенсировать ущерб – менее затратное мероприятие, чем его предупреждать). Одновременно с этим следует понимать, что при таком сценарии можно будет отказаться от доминирующего в настоящее время государственного подхода ужесточения строительных норм, расширения номенклатуры продукции, подлежащей обязательному подтверждению соответствия. У строительного сообщества есть весь набор необходимых мер, их надо лишь систематизировать и отладить систему функционирования сложной многоступенчатой системы контроля качества (рис. 4), четко установив правила для всех участников строительства, одновременно с этим установив более гибкий механизм ответственности по результатам надзорной деятельности: там, где сейчас устанавливаются драконовские штрафы, возможно обойтись предупреждением.

Как упоминалось ранее, корреляция между двумя событиями зависит от процента совпадения факторов, влияющих на них. Внедряя дополнительный механизм контроля строителям путем их влияния на изготовителя через аудит и проведение выборочных измерений, можно отказаться от избыточного (административного) обременительного механизма обязательного подтверждения. Т. е. происходит совмещение, при котором критерий проведения испытаний (важнейший) становится критерием исхода для обоих событий, поэтому зависимость данных процессов становится выше, что и является логическим результатом предлагаемых новшеств.

Для отладки упомянутой выше системы контроля качества перспективным подходом может стать внедрение оценки опыта и деловой репутации субъектов предпринимательской деятельности на основе положений ГОСТ Р 66.1.03–2016 «Оценка опыта и деловой репутации субъектов предпринимательской деятельности. Национальная система стандартов. Оценка опыта и деловой репутации строительных организаций» и с учетом экономико-математических методов выбора [10], результаты которых будут:

– публиковаться на сайтах ассоциаций производителей. Оценка будет производиться независимыми экспертными организациями, не заинтересованными в конечном результате. Например, данную оценку можно производить силами совета по профессиональным квалификациям в строительстве;

– учитываться как один из критериев принятия решения о заключения контрактов на поставки материалов (в совокупности с рекомендуемым аудитом продукции).

Именно репутационные издержки должны стать одним из ключевых параметров, которые и позволят сформировать цивилизованные отношения в строительстве.

Одновременно с этим для контроля качества на заводе-изготовителе следует в дальнейшем разработать методы непрерывного контроля производимой продукции. Данный подход может быть внедрен как в рамках системы менеджмента качества и дальнейшей профессиональной оценки производства (как один из факторов оценки деловой репутации), так и отдельным инструментом для повышения качества в целом. Примером аналогичного подхода может служить автомобильная индустрия, где заводы-изготовители отзывают партии машин после обнаружения брака в продукции вследствие неполноты непрерывного контроля за производством. В строительстве такие ситуации имеют единичные случаи, что еще раз подтверждает наличие слабых мест в организации контроля.

Выводы

Подводя итог данного исследования, можно констатировать наличие проблемы в области технического регулирования строительных материалов и изделий, когда вновь внедряемые аттестации и сертификации не приносят требуемого результата. В рамках исследования авторами предлагается следующий комплекс мер, основной целью которого является обеспечение исполнения действующих положений законодательства РФ:

1. Разработка СТО для аудита строительных материалов и изделий заказчиком до заключения контракта с поставщиком.

2. Разработка положений для введения в ППР точных положений по входному контролю, аудиту поставляемых изделий и материалов, механизмов действий при наличии сомнений относительно качества продукции.

3. Внедрение практики оценки опыта и деловой репутации изготовителей строительных материалов. Распространение и публикация информации в виде отчетов и сводных рейтингов с помощью специализированных ассоциаций производителей конкретных видов продукции.

4. Ужесточение ответственности изготовителей материалов.

5. Введение практики аудита поставляемых материалов и изделий органами государственного строительного надзора. Организация контрольных закупок изделий. При наличии нарушений привлечение производителей к ответственности вплоть до лишения лицензий на производство данной продукции.

Список литературы

1. Проверки должны занимать в деятельности все меньше и меньше веса // *Газета «Коммерсантъ»*. № 19 от 04.02.2019 г. URL: https://www.kommersant.ru/doc/3873378 (дата обращения 27.02.2019).
2. Яворский А.А., Мартос В.В., Войтович В.А. Системный подход к обеспечению качества бетонных работ на строительной площадке. *Бетон и железобетон – взгляд в будущее: Научные труды III Всероссийской (II Международной) конференции по бетону и железобетону.* Москва. 2014. Т. 4. С. 383–391.
3. Сертификация не решила проблему фальсификации цемента – эксперт. URL: https://www.radidomapro.ru/ryedktzij/proyzvodsvo-materialov/stroymateriali/sertifikatziia-ne-reschila-problemu-faligsifikatzi-63315.php (дата обращения 27.02.2019).
4. Что принесла обязательная сертификация цемента в нынешнем виде для отрасли. URL: http://dom.iastr.ru/biznes/1418-chto-prinesla-obyazatelnaya-sertifikaciya-cementa-v-nyneshnem-vide-dlya-otrasli.html (дата обращения 25.02.2019).
5. Четверик Н.П. Какой строительный контроль нам нужен, или Беззубость не нужна строительному сообществу // *Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века.* 2012. № 9 (164). С. 43–45.
6. Четверик Н.П. Строительный контроль как аналог государственного строительного надзора // *Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века.* 2012. № 11 (166). С. 46–49.
7. Балькин В. М. Строительный контроль и безопасность зданий // *Вестник СГАСУ. Градостроительство и архитектура.* 2013. № 3 (11). С. 40–41.
8. Четверик Н.П. Лабораторный контроль в рамках строительного контроля как основание системы безопасности в строительстве // *Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века.* 2011. № 5 (148). С. 23–24.
9. Годовой отчет о деятельности Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору в 2017 г. Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору. М., 2018. 420 с.
10. Ермолина А. Ю. Выбор поставщиков материально-технических ресурсов в строительных организациях // *Экономические науки.* 2009. № 8 (57). С. 307–311.

References

1. Inspections have to borrow in activity less and less weight. https://www.kommersant.ru/doc/3873378 (Date of access 27.02.2019). (In Russian).
2. Yavorskii A.A., Martos V.V., Voitovich V.A. System approach to ensuring quality of concrete works on the building site. *Concrete and reinforced concrete – a prospection: scientific works of III All-Russian (II International) conferences on concrete and reinforced concrete.* Moscow: 2014. Vol. 4, pp. 383–391. (In Russian).
3. Certification did not solve a cement falsification problem – the expert. https://www.radidomapro.ru/ryedktzij/proyzvodsvo-materialov/stroymateriali/sertifikatziia-ne-reschila-problemu-faligsifikatzi-63315.php (Date of access 27.02.2019). (In Russian).
4. What did obligatory certification of cement as it stands for the industry bring? http://dom.iastr.ru/biznes/1418-chto-prinesla-obyazatelnaya-sertifikaciya-cementa-v-nyneshnem-vide-dlya-otrasli.html (Date of access 25.02.2019). (In Russian).
5. Chetverik N.P. What kind of construction control do we need, or toothlessness is not needed by the construction community. *Stroitel'nye Materialy, oborudovanie, teknologii XXI veka.* 2012. No. 9 (164), pp. 43–45. (In Russian).
6. Chetverik N.P. Construction compliance monitoring as analog of the state construction supervision. *Stroitel'nye Materialy, oborudovanie, teknologii XXI veka.* 2012. No. 11 (166), pp. 46–49. (In Russian).
7. Bal'kin V.M. Construction compliance monitoring and building security. *Vestnik SGASU. Gradostroitel'stvo I arkhitektura.* 2013. No. 3 (11), pp. 40–41. (In Russian).
8. Chetverik N.P. Laboratory control within construction control as the security system basis in construction. *Stroitel'nye Materialy, oborudovanie, teknologii XXI veka.* 2011. No. 5 (148), pp. 23–24. (In Russian).
9. The annual report on activity of Federal Service for Environmental, Technological and Nuclear Supervision in 2017. Federal Service for Environmental, Technological and Nuclear Supervision. Moscow. 2018. 420 p. (In Russian).
10. Ermolina A.Yu. Selection of suppliers of material and technical resources in construction organizations. *Ekonomicheskie nauki.* 2009. No. 8 (57), pp. 307–311. (In Russian).

УДК 666.9
DOI: https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-770-5-9-15

Е.А. ШОШИН[1], канд. техн. наук (shoshin234@mail.ru);
В.В. СТРОКОВА[2], д-р техн. наук (vvstrokova@gmail.com)

[1] Саратовский государственный технический университет им. Ю.А. Гагарина (420057, г. Саратов, ул. Политехническая, 77)
[2] Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова (308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46)

Влияние природы модифицирующего углевода на свойства силикатных добавок для цементных систем

Использование в составе цементной композиции органических модифицирующих агентов в значительных концентрациях актуализирует вопрос их влияния на свойства образуемых органосиликатных аддуктов. В этой связи возникла необходимость изучения влияния молекулярной структуры модифицирующего дисахарида на свойства дисперсий синтетических силикатов кальция, получаемых методом термолиза из соответствующих модифицированных гидросиликатов кальция. Методами фотоколориметрии, динамического рассеяния света, вискозиметрии, электронной микроскопии определены свойства силикат-кальциевой дисперсии (СКД) в зависимости от структуры модифицирующего углевода и влияние добавок СКД на технологические свойства цементных систем. Сочетанием методов динамического рассеяния света и растровой электронной микроскопии определен бимодальный характер распределения частиц по размерам и морфология СКД. Обнаружено, что эти параметры не зависят от молекулярной структуры модифицирующего углевода. Молекулярная структура модифицирующего углевода определяет степень окклюзии углевода силикатной матрицей и характер влияния остаточного свободного модифицирующего углевода в составе СКД на свойства модифицируемой цементной системы. Обнаружено, что СКД, модифицированная сахарозой, обладает наибольшей пластифицирующей активностью по сравнению с СКД, модифицированной лактозой и мальтозой. Обнаружено, что введение СКД в состав цементного вяжущего сопровождается снижением нормальной густоты цементного теста, уровень максимального снижения нормальной густоты зависит от вида модифицирующего углевода в составе СКД.

Ключевые слова: синтетические силикаты кальция, модифицирующий дисахарид, морфология, цемент, реология, нормальная густота.

Работа выполнена в рамках реализации Гранта Президента для научных школ НШ-2724.2018.8 с использованием оборудования Центра Высоких Технологий на базе БГТУ им. В.Г. Шухова, а также Центра Коллективного Пользования «Симбиоз» ИБФРМ РАН, г. Саратов.

Для цитирования: Шошин Е.А., Строкова В.В. Влияние природы модифицирующего углевода на свойства силикатных добавок для цементных систем // *Строительные материалы.* 2019. № 5. С. 9–15. DOI: https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-770-5-9-15

E.A. SHOSHIN[1], Candidate of Sciences (Engineering) (shoshin234@mail.ru);
V.V. STROKOVA[2], Doctor of Sciences (Engineering) (vvstrokova@gmail.com)
[1] Yuri Gagarin State Technical University of Saratov (77, Polytechnicheskaya Street, Saratov, 410054, Russian Federation)
[2] Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (46, Kostyukova Street, Belgorod, 308012, Russian Federation)

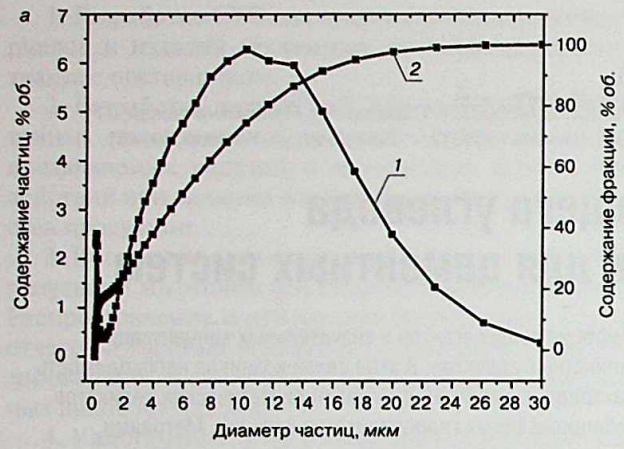
Influence of the Nature of Modifying Carbohydrate on the Properties of Silicate Additives for Cement Systems

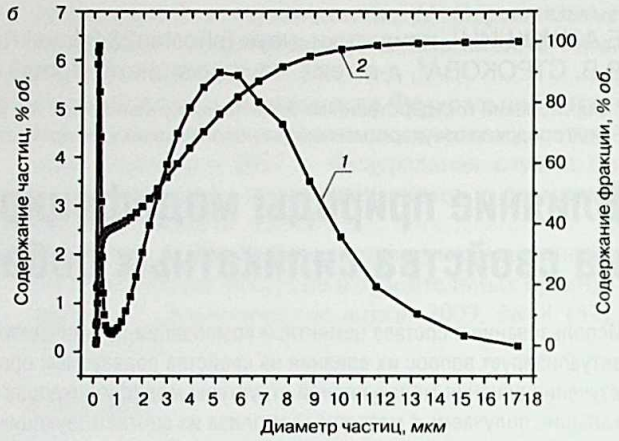
The use of organic modifying agents in the composition of the cement composition in significant concentrations actualizes the problem of their influence on the properties of the formed organo-silicate adducts. In this regard, it became necessary to study the effect of the molecular structure of the modifying disaccharide on the properties of dispersions of synthetic calcium silicates obtained by thermolysis from the corresponding modified calcium hydrosilicates. The properties of silicate-calcium dispersion (SCD) depending on the structure of the modifying carbohydrate and the effect of SCD additives on the technological properties of cement systems are determined by the methods of photocolorimetry, dynamic light scattering, viscometry, electron microscopy. The combination of dynamic light scattering and scanning electron microscopy determined the bimodal nature of the particle size distribution and the SCD morphology. It was found that these parameters do not depend on the molecular structure of the modifying carbohydrate. The molecular structure of the modifying carbohydrate determines the degree of carbohydrate occlusion by the silicate matrix and the nature of the effect of residual free modifying carbohydrate in the SCD on the properties of the modified cement system. It is found that SCD, modified by sucrose, has the greatest plasticizing activity, compared with SCD, modified by lactose, and maltose. It was found that the introduction of SCD in the cement binder is accompanied by a decrease in the normal density of the cement paste, the level of maximum reduction in the normal density depends on the type of modifying carbohydrate in the SCD composition.

Keywords: synthetic calcium silicates, modifying disaccharide, morphology, cement, rheology, normal density.

The work is executed in the framework of the Presidential Grant for scientific schools NSH-2724.2018.8 with the use of equipment of the Center of High Technologies of BSTU named after V.G. Shukhov and also Center for the Collective Use of Research Equipment «Simbioz» of IBPPM RAS (Institute of Biochemistry and Physiology of Plants and Microorganisms, Russian Academy of Sciences, the city of Saratov.

For citation: Shoshin E.A., Strokova V.V. Influence of the nature of modifying carbohydrate on the properties of silicate additives for cement systems. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2019. No. 5, pp. 9–15. (In Russian). DOI: https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-770-5-9-15





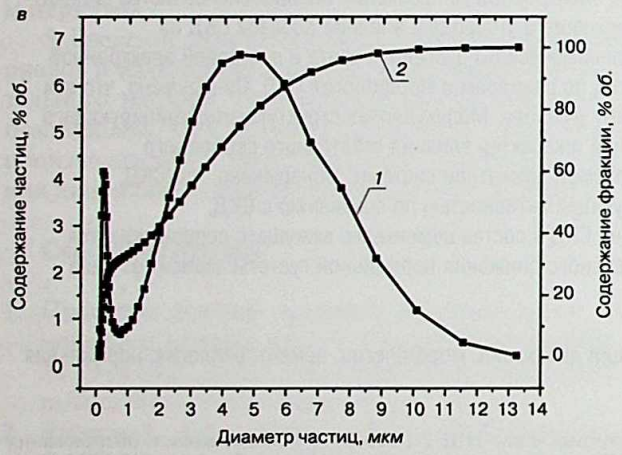


Рис. 1. Кривые распределения частиц по размерам СКД с различными модифицирующими углеводами: *а* – сСКД – сахароза; *б* – мСКД – мальтоза; *в* – лСКД – лактоза; *1* – дифференциальная кривая; *2* – интегральная кривая

Углеводы, несмотря на широкое распространение в природе и разнообразие структурных форм, в строительной практике находят довольно узкое применение. Среди известных направлений использования можно выделить регулирование сроков схватывания (индивидуальные углеводы и углеводподобные соединения) [1–7] и регулирование реологических свойств растворов и бетонных смесей (полисахариды, эфиры целлюлозы) [8–12]. При этом основное внимание, как правило, уделяют количеству ОН-групп и их взаимному расположению [5, 6, 9]. Вопросам изучения влияния молекулярной структуры углевода на гидратацию цемента уделяется значительно меньшее внимание, например [13, 14], несмотря на то, что о наличии связи между структурой углевода и его влиянием на гидратацию цемента известно достаточно давно [15]. При этом сама тема влияния структуры органического агента на фазообразование цементного камня достаточно актуальна. Например, авторы [16, 17] отмечают селективное влияние структуры органического агента (поликарбоксилатного пластификатора) на фазообразование цементного камня, в частности на характер гидроалюминатных фаз, образующих чувствительные к структуре молекулы «гостя» соединения включения.

Причина отсутствия интереса к углеводам объясняется, с одной стороны, сложностью, взаимообусловленностью физико-химических процессов, протекающих в цементной системе в присутствии углеводов. С другой стороны, используемые в практике дозировки углеводов достаточно малы и образующиеся продукты присоединения присутствуют в цементном камне в количествах, неспособных существенно повлиять на его свойства. Тем не менее имеются сведения о возможности практического применения значительных дозировок дисахаридов в целях получения высокодисперсных добавок в цементные бетоны и модификации цементных вяжущих с учетом структурных параметров углеводов [18–23]. Таким образом, возникла необходимость рассмотрения взаимосвязи структурных молекулярных параметров углеводов со свойствами образующихся в их присутствии углевод-гидросиликатных аддуктов.

Настоящая работа посвящена изучению влияния молекулярной структуры модифицирующего дисахарида на свойства синтетических силикатов кальция, получаемых методом термолиза из соответствующих модифицированных гидросиликатов кальция, предназначенных для использования в качестве активных органоминеральных добавок для цементных систем.

Материалы и методы

Материалы, использованные в работе: рядовой портландцемент 42.5Н type I (Хольцим (рус), Россия); изомерные дисахариды сахароза, лактоза и мальтоза; опока кремнистая карьера села Поливановка (Саратовская обл.) с содержанием SiO_2 не менее 80%.

Наполнитель на основе синтетических силикатов кальция – силикат-кальциевая дисперсия (СКД) получен по разработанной схеме [21] совместным помолом цемента, опоки и раствора модифицирующего углевода при соотношении компонентов цемент/опока=1/1 (мас. ч.), В/Т=2 и содержании в суспензии углевода 3% от массы минеральной смеси с последующим термолизом полученных модифици-

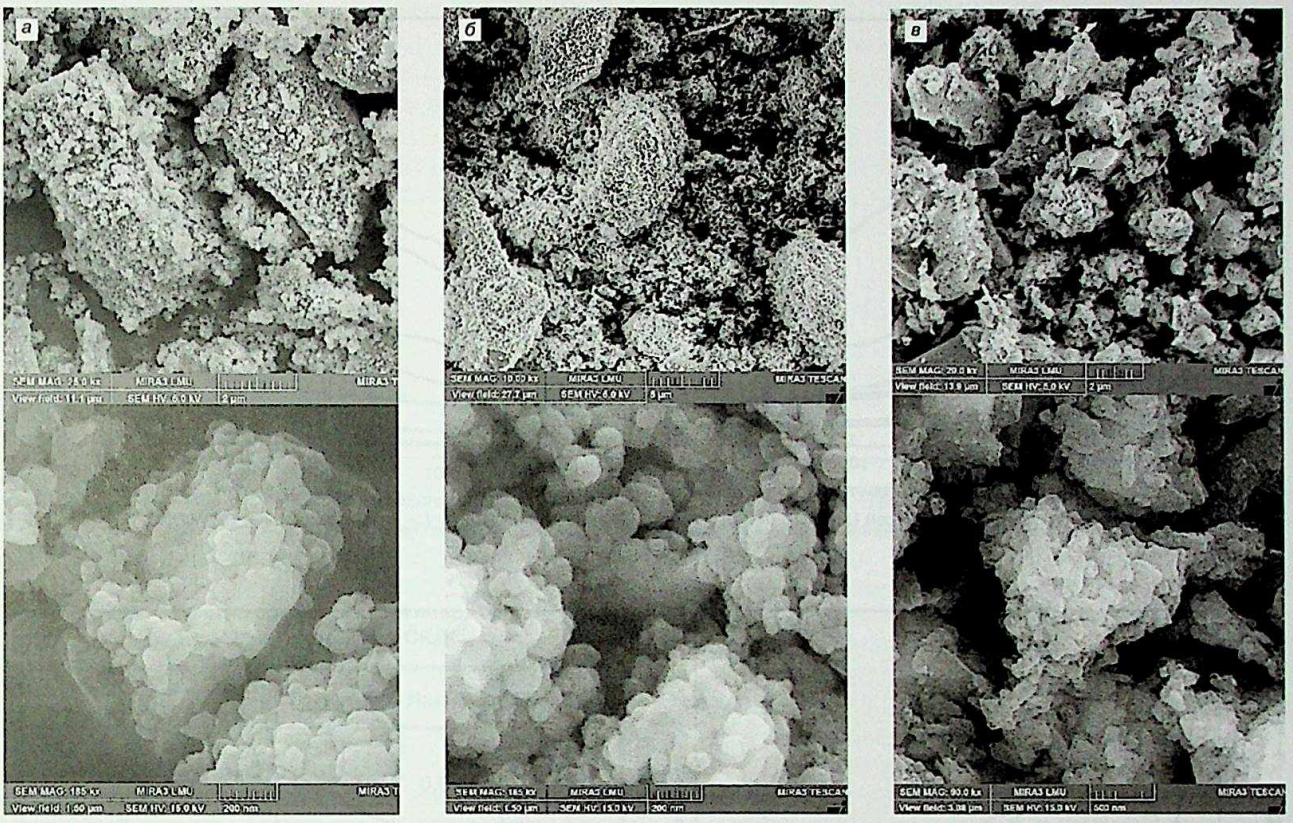


Рис. 2. Микроструктура СКД в зависимости от вида модифицирующего углевода (по данным РЭМ): *а* – сахароза; *б* – мальтоза; *в* – лактоза

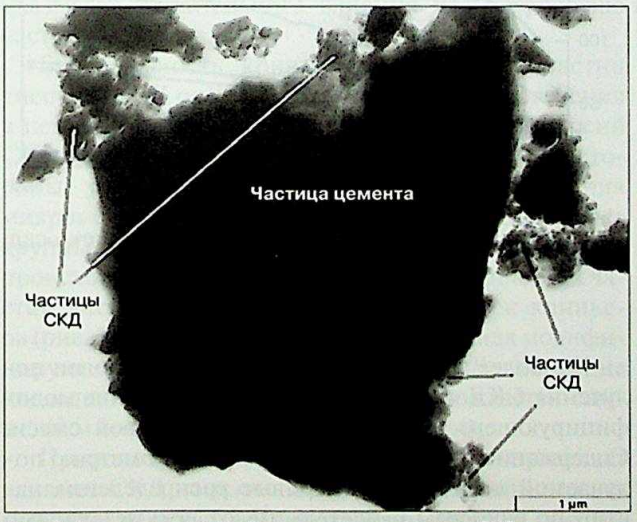


Рис. 3. Характер взаимодействия частиц дисперсии СКД с частицами цементного клинкера (содержание СКД 15%) после ультразвуковой обработки образца в абсолютном этаноле

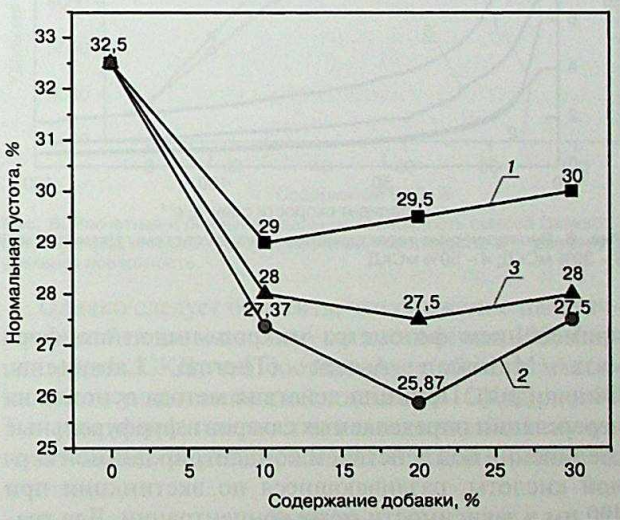


Рис. 4. Зависимость НГ цементного теста от содержания добавки СКД: *1* – лСКД; *2* – сСКД; *3* – мСКД

рованных гидросиликатов кальция при температуре до 200° при пониженном давлении (15 кПа).

Гранулометрический состав порошковых материалов определялся на лазерном анализаторе Horiba LA-300 в абсолютированном изопропаноле.

Удельная поверхность порошкообразных материалов и средний диаметр частиц определялись по воздухопроницаемости слоя материала на приборе ПСХ-12.

Нормальная густота цементного теста определялась согласно ГОСТ 310.3–76.

Содержание остаточных свободных углеводов в составе СКД определялось на образцах соответствующих водных экстрактов, полученных в результате 24 ч экспозиции при температуре 22±1° и В/Т=1/10. Количественное содержание углеводов в полученных экстрактах определяли фотоколориметрическим методом по фенол-сернокислой реакции с

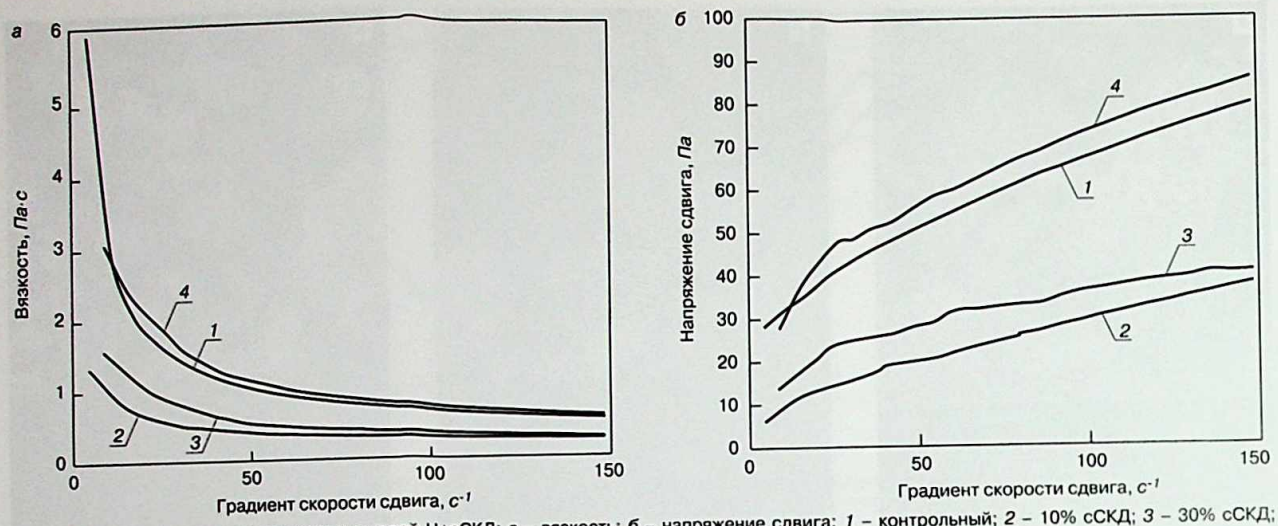


Рис. 5. Реологические характеристики смесей Ц+сСКД: *а* – вязкость; *б* – напряжение сдвига: *1* – контрольный; *2* – 10% сСКД; *3* – 30% сСКД; *4* – 50% сСКД

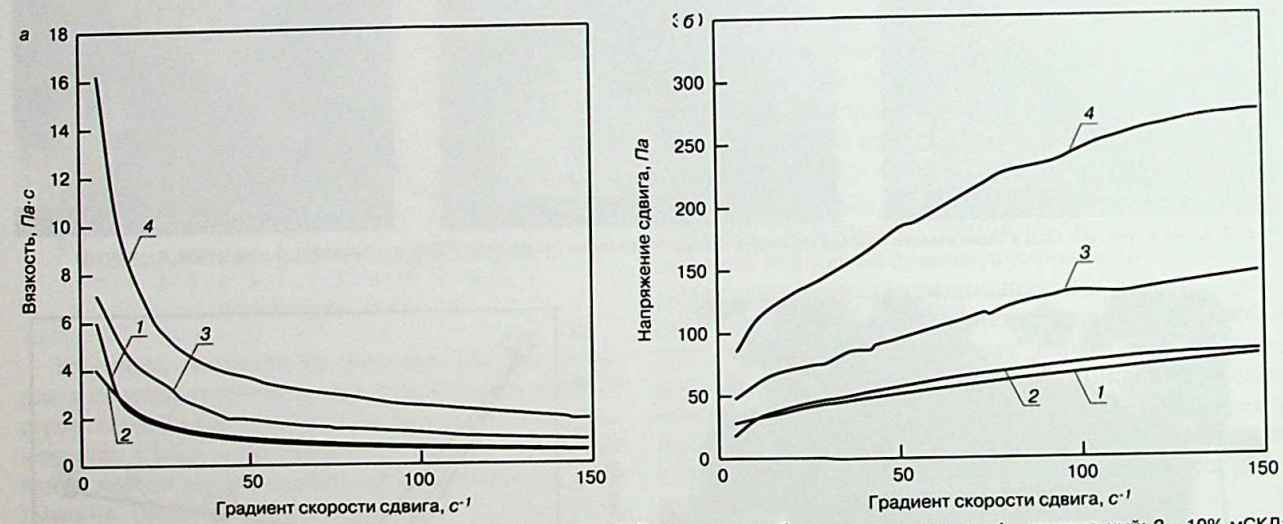


Рис. 6. Реологические характеристики смесей системы Цемент – мСКД: *а* – вязкость; *б* – напряжение сдвига; *1* – контрольный; *2* – 10% мСКД; *3* – 30% мСКД; *4* – 50% мСКД

применением фотометра микропланшетного формата Multiscan Ascent (Thermo Labsystems, Финляндия). Принцип действия метода основан на переведении определяемых сахаров в фурфурольные соединения под действием концентрированной серной кислоты, различающиеся по экстинкции при 490 нм в зависимости от их концентрации. Для градуировки использовали растворы глюкозы с известной концентрацией, стандартное отклонение не превышало 5%.

Морфология частиц СКД определялась с помощью просвечивающего электронного микроскопа (ПЭМ) Libra 120, Carl Zeiss (Германия) и с помощью сканирующего электронного микроскопа высокого разрешения TESCAN MIRA 3 LMU.

Вязкопластические характеристики смесей системы «Цемент – СКД» определялись при помощи ротационного вискозиметра Rheotest RN4.1 с использованием цилиндрической измерительной системы.

Результаты и обсуждение

Наиболее важными параметрами технологии получения СКД является природа и содержание модифицирующего углевода в составе сырьевой смеси. Содержание углевода определяет гранулометрию получаемой добавки [23]. Кривые распределения частиц по размерам свидетельствуют, что независимо от природы модифицирующего углевода силикат-кальциевая дисперсия характеризуется бимодальным распределением частиц (рис. 1).

Бимодальный характер распределения частиц подтверждается данными растровой электронной микроскопии (РЭМ), согласно которым частицы наноразмерного масштаба равномерно распределены по поверхности частиц микронного размера (рис. 2, *а*). Микроэлектронные снимки СКД, модифицированных лактозой и мальтозой, имеют аналогичный характер (рис. 2, *б, в*), что позволяет сделать вывод, что природа модифицирующего углевода не

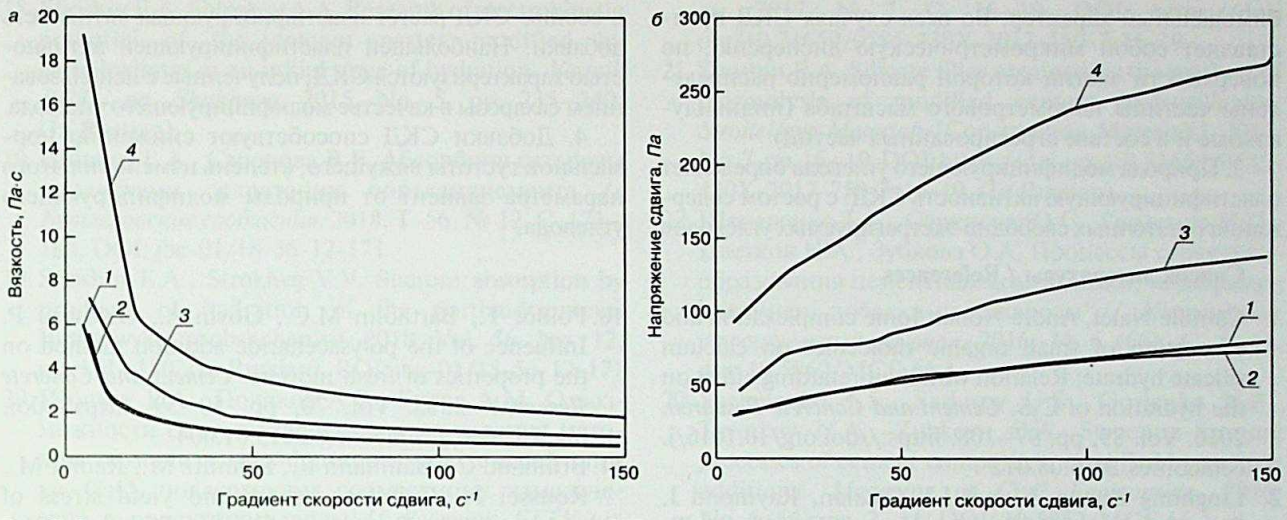


Рис. 7. Реологические характеристики смесей системы Цемент – лСКД: *а* – вязкость; *б* – напряжение сдвига; *1* – контрольный; *2* – 10% мСКД; *3* – 30% мСКД; *4* – 50% мСКД

Остаточное содержание углеводов в водных экстрактах СКД

Модифицирующий дисахарид	Сахароза	Лактоза	Мальтоза
Доля углевода в водном экстракте от количества модифицирующего углевода, %	0,412	0,091	0,061

оказывает значительного влияния на морфологию частиц СКД.

Бимодальность кривых распределения частиц дисперсий СК определяет особенности их поведения в цементных системах: при совмещении дисперсий СК и цементного вяжущего происходит, с одной стороны, уплотнение системы за счет распределения микрометрических частиц дисперсии между более крупными частицами цемента (рис. 1), а с другой – происходит перераспределение нанометрических частиц дисперсии СК по поверхности зерен клинкера (рис. 3). В результате, независимо от вида модифицирующего углевода в составе СКД, введение последней в состав вяжущего сопровождается снижением его нормальной густоты (рис. 4).

Природа модифицирующего углевода определяет влияние СКД на реологию модифицированного цементного вяжущего. Природа этого влияния определяется эффектами окклюзии углеводов минеральной матрицей (см. таблицу).

Относительно высокое содержание экстрагируемой сахарозы определяет повышенную пластифицирующую способность добавки СКД (рис. 5).

Лактоза и мальтоза лучше удерживаются минеральной матрицей, что определяет почти на порядок меньшую концентрацию соответствующих свободно экстрагируемых углеводов. В связи с этим образцы СКД, модифицированные лактозой и мальтозой, не проявляют аналогичной сахарозе пластифицирующей активности (рис. 6, 7).

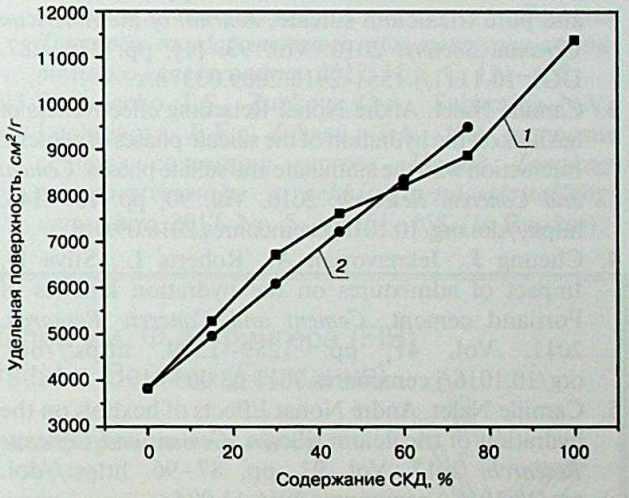


Рис. 8. Расчетная и реальная удельная поверхность смесей Цемент – сСКД (Ц+СКД) по ПСХ-12: *1* – удельная поверхность; *2* – расчетная удельная поверхность

Однако следует отметить, что снижение пластичности наблюдается только по достижении 30% концентрации СКД, что соответствует области максимального уплотнения смеси цемент – СКД (рис. 8). Т. е. увеличение плотности упаковки частиц вяжущего не сопровождается ростом его водопотребности.

Выводы

Полученные экспериментальные данные позволяют сделать следующие выводы.

1. Природа модифицирующего углевода, используемого при синтезе силикат-кальциевых дисперсий (СКД), не влияет на морфологию частиц дисперсии. Микрометрические частицы имеют неправильную форму, тогда как частицы нанометрового масштаба сгруппированы в более крупные образования – агрегированные частицы, размер которых находится в диапазоне 0,1–1 мкм.

2. Независимо от природы модифицирующего углевода кривые распределения частиц СКД имеют

бимодальный характер. Во всех случаях СКД представляет собой микрометрическую дисперсию, по поверхности частиц которой равномерно распределены частицы нанометрового масштаба (индивидуальные и в составе агрегированных частиц).

3. Природа модифицирующего углевода определяет пластифицирующую активность СКД: с ростом содержания остаточных свободно экстрагируемых углеводов в составе СКД растет пластифицирующая активность добавки. Наибольшей пластифицирующей активностью характеризуются СКД, полученные с использованием сахарозы в качестве модифицирующего углевода.

4. Добавки СКД способствуют снижению нормальной густоты вяжущего, степень изменения этого параметра зависит от природы модифицирующего углевода.

Список литературы / References

1. Camille Nalet, André Nonat. Ionic complexation and adsorption of small organic molecules on calcium silicate hydrate: Relation with their retarding effect on the hydration of C_3S. *Cement and Concrete Research*. 2016. Vol. 89, pp. 97–108. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2016.08.012
2. Linghong Zhang, Lionel J.J. Catalan, Raymond J. Balec, Andrew C. Larsen, Hassan Haji Esmaeili, Stephen D. Kinrade. Effects of saccharide set retarders on the hydration of ordinary portlandcement and pure tricalcium silicate. *Journal of the American Ceramic Society*. 2010. Vol. 93. [1], pp. 279–287. DOI: 10.1111/j.1551-2916.2009.03378.x
3. Camille Nalet, André Nonat Retarding effectiveness of hexitols on the hydration of the silicate phases of cement: Interaction with the aluminate and sulfate phases. *Cement and Concrete Research*. 2016. Vol. 90, pp. 137–143. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2016.09.018
4. Cheung J., Jeknavorian A., Roberts L., Silva D. Impact of admixtures on the hydration kinetics of Portland cement. *Cement and Concrete Research*. 2011. Vol. 41, pp. 1289–1309. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.03.005
5. Camille Nalet, André Nonat Effects of hexitols on the hydration of tricalcium silicate. *Cement and Concrete Research*. 2017. Vol. 91, pp. 87–96. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2016.11.004
6. Nalet C., Nonat A. Impacts of hexitols on the hydration of a tricalcium aluminate-calcium sulfate mixture. *Cement and Concrete Research*. 2016. Vol. 89, pp. 177–186. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2016.08.017
7. Lasheras-Zubiate M., Navarro-Blasco I., Fernández J.M., Álvarez J.I. Effect of the addition of chitosan ethers on the fresh state properties of cement mortars. *Cement and Concrete Composites*. 2012. Vol. 34, pp. 964–973. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.04.010
8. Paulo Henrique Silva Santos Moreira, Julio Cezar de Oliveira Freitas, Renata Martins Braga, Renata Mendonça Araújo, Miguel Angelo Fonseca de Souza. Production of carboxymethyl lignin from sugar cane bagasse: A cement retarder additive for oilwell application. *Industrial Crops and Products*. 2018. Vol. 116, pp. 144–149. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.01.073
9. Poinot T., Govin A., Grosseau P. Influence of hydroxypropylguars on rheological behavior of cement-based mortars. *Cement and Concrete Research*. 2014. Vol. 58, pp. 161–168. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2014.01.020
10. Poinot T., Bartholin M.C., Govin A., Grosseau P. Influence of the polysaccharide addition method on the properties of fresh mortars. *Cement and Concrete Research*. 2015. Vol. 70, pp. 50–59. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.01.004
11. Brumaud C., Baumann R., Schmitz M., Radler M., Roussel N. Cellulose ethers and yield stress of cement pastes. *Cement and Concrete Research*. 2014. Vol. 55, pp. 14–21. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2013.06.013
12. Patural L., Marchal P., Govin A., Grosseau P., Devès O. Cellulose ethers influence on water retention and consistency in cement-based mortars. *Cement and Concrete Research*. 2011. Vol. 41, pp. 46–55. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.09.004
13. Smitha B.J., Rawala A., Funkhouser G.P., Roberts L.R., Gupta V., Israelachvilia J.N., Chmelka B.F. Origins of saccharide-dependent hydration at aluminate, silicate, and aluminosilicate surfaces. *PNAS*. 2011. Vol. 108. No. 22, pp. 8949–8954. http://dx.doi.org/10.1073/pnas.1104526108
14. Smitha B.J., Funkhouser G.P., Roberts L.R., Gupta V., Chmelka B.F. Reactions and Surface Interactions of Saccharides in Cement Slurries. *Langmuir: the ACS journal of surfaces and colloids*. 2012. Vol. 28, pp. 14202–14217. http://dx.doi.org/10.1021/la3015157
15. Young J.F. A review of the mechanisms of set-retardation in Portland cement pastes containing organic admixtures. *Cement and Concrete Research*. 1972. No. 2 (4), pp. 415–433. https://doi.org/10.1016/0008-8846(72)90057-9
16. Kanchanason V., Plank J. Effect of calcium silicate hydrate – polycarboxylate ether (C–S–H–PCE) nanocomposite as accelerating admixture on early strength enhancement of slag and calcined clay blended cements. *Cement and Concrete Research*. 2019. Vol. 119, pp. 44–50. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.01.007
17. Conte T., Plank J. Impact of molecular structure and composition of polycarboxylate comb polymers on the flow properties of alkali-activated slag. *Cement and Concrete Research*. 2019. Vol. 116, pp. 95–101. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.11.014
18. Шошин Е.А., Широков А.А. Исследование электрокинетического потенциала модифицированных углеводами цементных паст на начальной стадии гидратации // *Вестник БГТУ им. Шухова*. 2015. № 5. С. 235–240.

18. Shoshin E.A. Shirokov A.A. Research of electrokinetic potential of the cement pastes modified by carbohydrates at an initial stage of hydration. *Vestnik BGTU im. Shukhova*. 2015. No. 5, pp. 235–240. (In Russian).
19. Шошин Е.А., Строкова В.В. Абсорбция сахарозы продуктами гидратации портландцемента // *Бутлеровские сообщения*. 2018. Т. 56. № 12. С. 171–180. DOI: jbc-01/18-56-12-171
19. Shoshin E.A., Strokova V.V. Sucrose absorption by products of hydration of the portlandtsement. Butlerovskie soobshcheniya. 2018. Vol. 56. No. 12, pp. 171–180. (In Russian). ROI: jbc-01/18-56-12-171
20. Шошин Е.А., Поляков А.В., Буров А.М. О возможности синтеза наносиликатов кальция методом термолиза модифицированных смесей опока–CaO, подвергнутых совместному измельчению в присутствии воды // *Вестник БГТУ им. Шухова*. 2016. № 3. С. 152–158.
20. Shoshin E.A., Polyakov A.V., Burov A.M. The possibility of synthesis of calcium nanosilicates by termolisez of the modified mixes opoka–SAO, subjected to joint crushing in water presence. *Vestnik BGTU im. Shukhova*. 2016. No. 3, pp. 152–158. (In Russian).
21. Шошин Е.А. Силикатный наполнитель, получаемый методом термолиза модифицированных гидросиликатов цемента // *Строительные материалы*. 2017. № 7. С. 16–19. DOI: https://doi.org/10.31659/0585-430X-2017-750-7-16-19
21. Shoshin E.A. Silicate filler obtained by the method of thermolysis of modified cement hydrosilicates. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2017. No.7, pp. 16–19. DOI: https://doi.org/10.31659/0585-430X-2017-750-7-16-19. (In Russian).
22. Шепеленко Т.С., Саркисов Ю.С., Горленко Н.П., Цветков Н.А., Зубкова О.А. Процессы структурообразования цементных композиций, модифицированных добавками сахарозы // *Инженерно-строительный журнал*. 2016. № 6 (66). С. 3–11. doi: 10.5862/MCE.66.1
22. Shepelenko T.S., Sarkisov U.S., Gorlenko N.P., Tsvetkov N.A., Zubkova O.A. Structure-forming processes of cement composites, modified by sucrose additions. *Magazine of Civil Engineering*. 2016. No. 6 (66), pp. 3–11. DOI: 10.5862/MCE.66.1
23. Шепеленко Т.С., Зубкова О.А., Субботина Н.В., Лучникова Е.Е., Зыкеев Г.А. Композиционные цементы, содержащие сахарозу // *Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета*. 2017. № 5. С. 151–158.
23. Shepelenko T.S., Zubkova O.A., Subbotina N.V., Luchnikova E.E., Zykeev G.A. The composite cements containing sucrose. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta*. 2017. No. 5, pp. 151–158. (In Russian).

УДК 666.0.031
DOI: https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-770-5-16-21

М.В. ЛАБУЗОВА, бакалавр (labuzova326@mail.ru),
Е.Н. ГУБАРЕВА, бакалавр (ekaterina.bondareva@rambler.ru),
Ю.Н. ОГУРЦОВА, канд. техн. наук (ogurtsova.y@yandex.ru),
В.В. СТРОКОВА, д-р техн. наук (vvstrokova@gmail.com)
Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова (308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46)

Использование фотокаталитического композиционного материала в цементной системе

Приведены результаты оценки влияния фотокаталитического композиционного материала (ФКМ) системы TiO_2–SiO_2, синтезированного золь-гель методом, на свойства цементной системы. Определены свойства синтезированного ФКМ: химический и минеральный состав, микроструктурные особенности в зависимости от соотношения сырьевых компонентов – тетрабутоксититана и порошка диатомитового. Синтезированные ФКМ отличаются содержанием анатаза и кварца, распределением кристаллов анатаза на поверхности частиц диатомита. Осаждение новообразований на поверхности диатомита избирательно, скопления анатаза отмечаются на частицах, обладающих развитой аморфизованной поверхностью, в то время как закристаллизованные частицы диатомита с гладкой поверхностью остаются непокрытыми новообразованиями анатаза. Установлены зависимости реологических параметров цементного теста, прочности при сжатии и способности к самоочищению цементного камня от состава ФКМ, в частности содержания SiO_2 и TiO_2. Показано, что способность к самоочищению цементного камня с синтезированным ФКМ близка к образцу с промышленным наноразмерным фотокатализатором при одновременном сохранении уровня прочности при сжатии. Оба синтезированных ФКМ могут быть рекомендованы для производства самоочищающихся цементных композитов. Они могут быть получены на основе отечественного сырья, технология их производства проста и не требует специального оборудования. Состав используемого ФКМ, а именно соотношение анатаза и кремнезема, должен быть выбран в зависимости от назначения и условий эксплуатации конструкций.

Ключевые слова: фотокаталитический композиционный материал, золь-гель, анатаз, диатомит, реология, самоочищение.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 19-19-00263) с использованием оборудования на базе Центра Высоких Технологий БГТУ им. В.Г. Шухова.

Для цитирования: Лабузова М.В., Губарева Е.Н., Огурцова Ю.Н., Строкова В.В. Использование фотокаталитического композиционного материала в цементной системе // *Строительные материалы*. 2019. № 5. С. 16–21.
DOI: https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-770-5-16-21

M.V. LABUZOVA, Bachelor (labuzova326@mail.ru), E.N. GUBAREVA, Bachelor (ekaterina.bondareva@rambler.ru),
Y.N. OGURTSOVA, Candidate of Sciences (Engineering) (ogurtsova.y@yandex.ru), V.V. STROKOVA, Doctor of Sciences (Engineering) (vvstrokova@gmail.com)
Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (46, Kostyukova Street Belgorod, 308012, Russian Federation)

The Use of the Photocatalytic Composite Material in the Cement System

The results of the evaluation of the effect of photocatalytic composite material (PCM) of TiO_2–SiO_2 system synthesized by sol-gel method on the properties of the cement system are presented. The properties of the synthesized PCM – chemical and mineral composition, micro-structural features, depending on the ratio of raw materials – tetrabutoxytitanium and diatomite powder are determined. The synthesized PCM differ in the content of anatase and quartz, the distribution of anatase crystals on the surface of diatomite particles. The deposition of tumors on the surface of the diatomite is selective, anatase accumulations are observed on particles having a developed amorphized surface. Whereas the crystallized particles of diatomite with a smooth surface remain uncovered with new formations of anatase. Established the dependence of rheological parameters of cement paste, compressive strength and ability to self-cleaning of cement stone from the composition of PCM, in particular, the content of SiO_2 and TiO_2. It is shown that the ability to self-purification of cement stone with synthesized PCM is close to the sample with industrial nano-scale photocatalyst while maintaining the level of compressive strength. Both synthesized PCMs can be recommended for the production of self-cleaning cement composites. They can be obtained on the basis of domestic raw materials, the technology of their production is simple and does not require special equipment. The composition of the used PCM, namely the ratio of anatase and silica, should be chosen depending on the purpose and operating conditions of the structures.

Keywords: photocatalytic composite material, sol-gel, anatase, diatomite, rheology, self-cleaning.

The study was carried out by a grant from the Russian Science Foundation (project No. 19-19-00263) using equipment based on the Center for High Technologies of Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov.

For citation: Labuzova M.V., Gubareva E.N., Ogurtsova Y.N., Strokova V.V. The use of the photocatalytic composite material in the cement system. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2019. No. 5, pp. 16–21. (In Russian). DOI: https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-770-5-16-21

Получение фотокаталитических композиционных материалов (ФКМ) системы TiO_2–SiO_2 направлено на повышение эффективности протекания реакций фотокаталитического разложения загрязнителей. Известны следующие преимущества синтеза и использования систем TiO_2–SiO_2 по сравнению с наноразмерным TiO_2: повышение эффективности получения наноразмерных частиц TiO_2 путем контроля фазовых превращений и роста кристаллитов при использовании кремнеземной подложки; увеличение площади поверхности фотокаталитического агента для лучшей адсорбции загрязнителей;

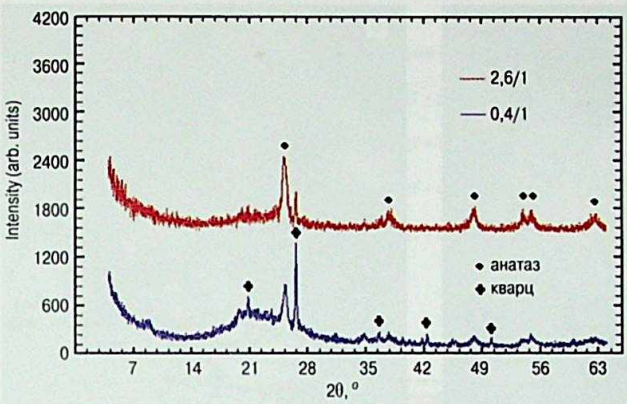


Рис. 1. Фазовый состав синтезированного ФКМ при различном соотношении тетрабутоксититан/диатомит

упрощение распределения фотокаталитического агента в растворной смеси цементного композита и др. [1, 2]. Особенности физического и химического взаимодействия кремнеземного и титансодержащего компонентов при синтезе ФКМ непосредственно влияют на его фотокаталитическую активность: морфология и дисперсность формирующихся систем определяют площадь поверхности ФКМ, участвующей в реализации фотокатализа, а модификация диоксида титана определяет возможность и активность фотокаталитического окисления органических соединений под действием ультрафиолетового излучения [3–6]. Последующее применение синтезированных ФКМ в цементных композитах является перспективным, но на данный момент малоизученным. Интерес представляет разработка принципов применения ФКМ состава TiO_2–SiO_2, синтезированного с использованием отечественного сырья, в цементных системах с целью придания им способности к самоочищению, повышения физико-механических характеристик и долговечности [7–11].

Синтез фотокаталитического оксидного композита TiO_2–SiO_2 осуществляли золь-гель методом. В качестве прекурсора для получения золя TiO_2 использовали тетрабутоксититан $Ti(C_4H_9O)_4$. В качестве кремнеземного сырья как подложки в составе фотокаталитического композиционного материала использовали порошок диатомитовый тонкодисперсный Diasil (удельная поверхность $S_{уд}$=1,39 м^2/г) (Diamix, Ульяновская обл.).

Тетрабутоксититан растворяли 95%-м раствором этилового спирта. После перемешивания полученный золь гидроксида титана вливали в порошок диатомита в следующих массовых соотношениях тетрабутоксититан/диатомит: 2,6/1; 0,4/1. Колбу плотно закрывали и смесь перемешивали на магнитной мешалке. Полученные композиционные материалы высушивали при температуре 100°С, а затем подвергали обжигу при температуре 550°С.

Формирование композиционного материала происходит за счет гетерогенной адгезионной коагуляции, которой способствует разница зарядов частиц золя TiO_2 (положительный заряд) и поверхности частиц диатомита (отрицательный заряд). В результате частицы диоксида титана должны образовывать оболочку на поверхности частиц диоксида кремния [12].

Определение химического (см. таблицу) и минерального (рис. 1) состава сырьевых и синтезированных материалов производили с использованием рентгенофлуоресцентного спектрометра серии ARL 9900 WorkStation. В качестве контрольного фотокаталитического материала использовался промышленный наноразмерный фотокатализатор AEROXIDE TiO_2 P 25 (Evonik Industries).

Результаты рентгенофазового анализа ФКМ (рис. 1) показывают присутствие двух кристаллических фаз: анатаза и кварца. Стоит отметить значительное отличие фазового состава двух исследованных образцов, обусловленное разницей в соотношении сырьевых компонентов для золь-гель синтеза – тетрабутоксититана и порошка диатомитового. В частности, при соотношении тетрабутоксититан/диатомит 0,4/1 отмечается наличие аморфной фазы, которую можно отнести к опаловой составляющей диатомита, присутствуют пики кварца и синтезированного анатаза. При соотношении тетрабутоксититан/диатомит 2,6/1 пики анатаза более интенсивны, при этом, согласно дифрактограмме, опаловый кремнезем практически отсутствует и содержание кварца также незначительно. Это обусловлено высокой интенсивностью пиков анатаза, что относительно снижает интенсивность пиков других фаз. Особенности микроструктуры и элементный состав поверхности материалов исследовались на сканирующем электронном микроскопе высокого разрешения TESCAN MIRA 3 LMU.

Химический состав исследуемых материалов

Сырье	Содержание оксидов, мас. %									
	SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MgO	Na_2O	K_2O	CaO	SO_3	Прочие
Диатомит	86,81	0,28	5,91	2,67	2,35	0,34	1,12	0,41	0,01	0,01
TiO_2	0,01	95,9	–	0,01	0,05	0,19	–	–	–	3,84
ФКМ 2,6/1	56,24	37,31	2,89	1,13	0,52	0,47	0,50	0,21	0,26	0,47
ФКМ 0,4/1	81,25	6,41	5,36	2,59	2,31	0,32	1,10	0,39	0,01	0,26

Исследование особенностей микроструктуры синтезированного ФКМ (рис. 2) позволяет отметить присутствие агломератов частиц анатаза в обоих образцах, внешний вид новообразований схож. Размер отдельных частиц составляет 50–100 нм. Образцы отличаются только объемным содержанием синтезированного анатаза. Его осаждение на поверхности диатомита избирательно, скопления анатаза отмечаются на частицах, обладающих развитой аморфизованной поверхностью, в то время как закристаллизованные частицы диатомита с гладкой поверхностью остаются непокрытыми новообразованиями анатаза. Стоит отметить, что пористые элементы раковин диатомовых водорослей не вносят свой вклад в осаждение анатаза. Картирование по элементам Si, Al, Ti позволило установить, что осаждение также не происходит на алюмосиликатных частицах.

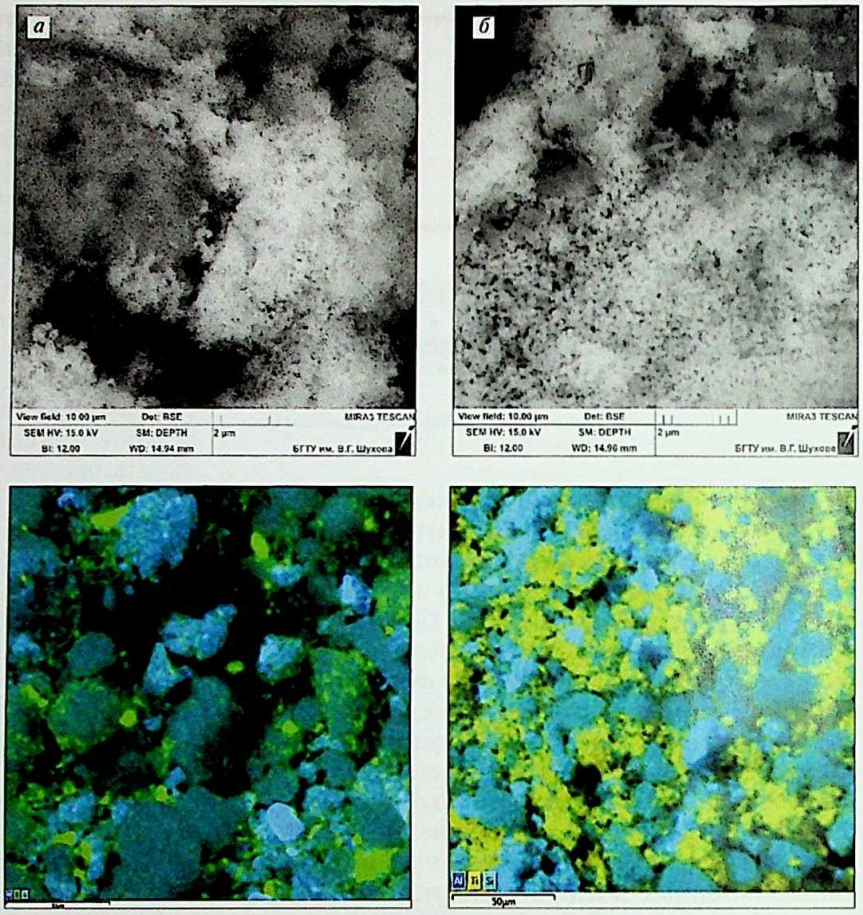


Рис. 2. Микроструктура синтезированного ФКМ при соотношении тетрабутокститан/диатомит 0,4/1 (*а*); 2,6/1 (*б*)

При проектировании фотокаталитически активных бетонов с использованием синтезированного материала важно установить особенности его взаимодействия с цементной системой. В данном исследовании представлены результаты влияния на реологические параметры цементной смеси, предел прочности при сжатии и способность к самоочищению цементного камня.

Влияние фотокаталитического композиционного материала на цементную систему будет осуществляться по нескольким механизмам. Во-первых, и диатомит и анатаз являются гидрофильными веществами, что изменит водопотребность цементного теста. Во-вторых, со стороны кремнеземной составляющей ФКМ предполагается реализация пуццоланового эффекта [13]. В-третьих, возможно влияние анатаза на процессы кристаллизации продуктов гидратации цемента в качестве центров нуклеации эттрингита [14]. Все эти эффекты будут оказывать непосредственное влияние на фотокаталитическую активность ФКМ, а следовательно, на способность к самоочищению бетона.

В данном исследовании в качестве вяжущего использован белый цемент CEM I 52,5 R (Adana, Турция). Водоцементное отношение составляло 0,5. Добавки вводились в следующих дозировках, % от массы цемента: диатомит – 1,5; TiO_2 – 1; ФКМ 2,6/1 – 2,57; ФКМ 0,4/1 – 14,96. Расчет компонентов для проведения исследования производился с целью сохранения в системе постоянного содержания TiO_2 (см. таблицу) для последующей оценки способности цементного камня к самоочищению. При этом целью исследования являлась оценка влияния каждого отдельного компонента на цементную систему, а не их сравнение.

Реологические характеристики цементного теста с добавками изучали при помощи ротационного вискозиметра Rheotest RN4.1. Все исследованные структурированные дисперсные системы являются тиксотропными: при увеличении градиента скорости сдвига вязкость уменьшается, а напряжение сдвига растет (рис. 3). Введение TiO_2 не влияет на вязкость цементной системы при прямом ходе, но незначительно повышает ее при обратном с полным восстановлением структуры, что может быть связано с формированием коагуляционных контактов в присутствии TiO_2. При низких значениях градиента скорости сдвига (до 65 c^{-1}) диатомит и ФКМ 2,6/1 значительно повышают вязкость и напряжение сдвига цементной системы, что связано с высокой пористостью диатомита, обусловливающей поглощение воды. Это провоцирует затруднение перемещения частиц цементной системы относительно друг друга. Скачок напряжения сдвига (рис. 3, *б*) в диапазоне градиента скорости сдвига 10–30 c^{-1} свя-

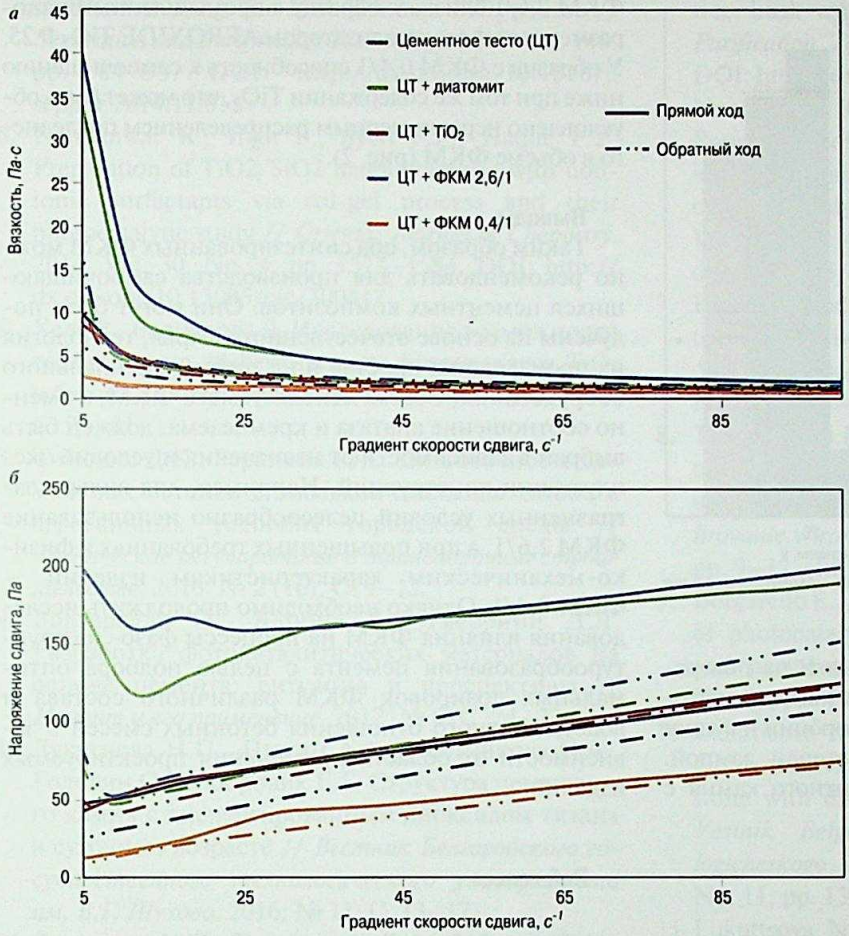


Рис. 3. Реологические характеристики цементного теста различного состава

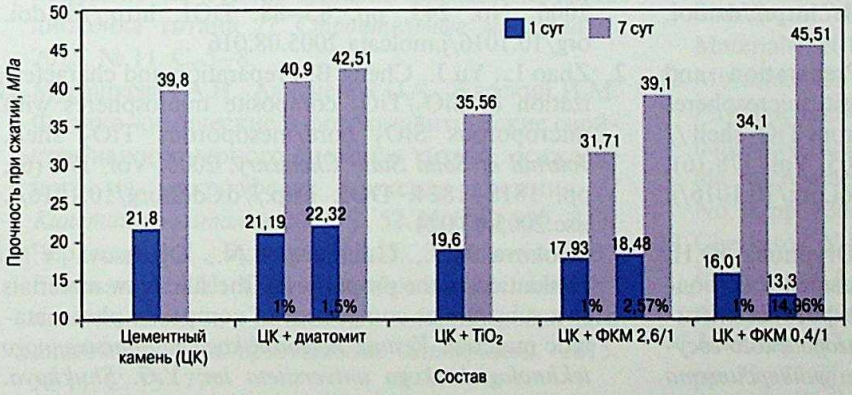


Рис. 4. Прочность при сжатии в начальные сроки твердения цементного камня различного состава

зан с разрушением агрегатов частиц диатомита и ФКМ 2,6/1. В дальнейшем система разжижается, при обратном ходе структура не восстанавливается. Цементная система с ФКМ 0,4/1 показывает низкие, практически не изменяющиеся вязкость и напряжение сдвига ввиду малого содержания жидкости в системе.

Также производилась оценка влияния исследуемых компонентов на предел прочности при сжатии цементного камня на начальных этапах твердения. Водоцементное отношение для всех составов – 0,38 (нормальная густота цементного теста без добавок). Как и ранее, добавки вводились в пересчете на одинаковое содержание TiO_2. Дополнительно для сравнения добавки вводились в количестве 1% от массы цемента (рис. 4).

Полученные результаты показывают (рис. 4), что диатомит в малых дозировках практически не оказывает влияния на прочность цементного камня, промышленный TiO_2 незначительно ее снижает. Использование синтезированного ФКМ в количестве 1% также приводит к снижению прочности цементного камня в начальные сроки твердения по сравнению с контрольным составом. Однако увеличение расхода ФКМ 2,6/1 до 2,57% от массы цемента позволяет на 7 сут твердения достичь показателя контрольного состава, а при увеличении содержания ФКМ 0,4/1 до 14,96% от массы цемента достигается увеличение прочности цементного камня, что может быть связано с пуццолановым эффектом. Замедление набора прочности цементного камня с ФКМ 0,4/1 в первые сутки твердения может быть обусловлено поглощением воды диатомитом, присутствующим в составе ФКМ.

Для определения способности к самоочищению цементных систем были приготовлены таблетки из цементного теста с добавками. Дозировка добавок рассчитывалась исходя из необходимости соблюдения одинакового содержания TiO_2 во всех образцах с целью оценки фотокаталитической активности ФКМ. Фотокаталитическая активность определялась с использованием методики оценки фотокаталитического разложения органического красителя – родамина Б (Rhodamine B, $C_{28}H_{31}ClN_2O_3$). Краситель был нанесен на таблетки в концентрации $4 \cdot 10^{-4}$ моль/л. Образцы выдерживались в течение 4 и 26 ч под ультрафиолетовым излучением (УФ-А, 1,1±0,1 Вт/м^2). Оценка изменения цвета как показатель эффективности самоочищения поверхности производилась по цветовому пространству Lab (координата a) с использованием программного обеспечения [15].

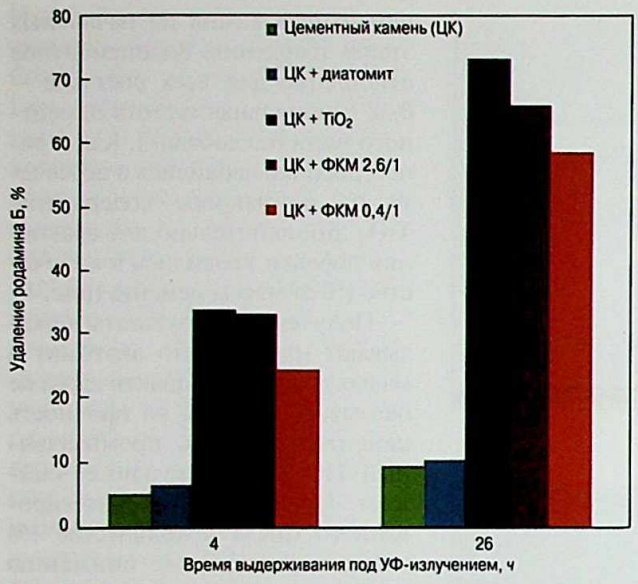


Рис. 5. Способность к самоочищению образцов цементного камня различного состава

Незначительное удаление родамина Б на поверхности цементного камня и цементного камня с диатомитом (рис. 5) связано с процессами сорбции и сушки при выдерживании под ультрафиолетовой лампой. Способность к самоочищению цементного камня с ФКМ 2,6/1 близка к образцу с промышленным наноразмерным фотокатализатором AEROXIDE TiO_2 P 25. У образца с ФКМ 0,4/1 способность к самоочищению ниже при том же содержании TiO_2, что может быть обусловлено неравномерным распределением последнего в объеме ФКМ (рис. 2).

Выводы

Таким образом, оба синтезированных ФКМ можно рекомендовать для производства самоочищающихся цементных композитов. Они могут быть получены на основе отечественного сырья, технология их производства простая и не требует специального оборудования. Состав используемого ФКМ, а именно соотношение анатаза и кремнезема, должен быть выбран в зависимости от назначения и условий эксплуатации конструкций. Например, для сильно загрязненных условий целесообразно использование ФКМ 2,6/1, а при повышенных требованиях к физико-механическим характеристикам изделий – ФКМ 0,4/1. Однако необходимо продолжить исследования влияния ФКМ на процессы фазо- и структурообразования цемента с целью подбора оптимальных дозировок ФКМ различного состава и водоцементного отношения бетонных смесей в зависимости от области применения проектируемых изделий.

Список литературы

1. Arai Y., Tanaka K., Khlaifat A.L. Photocatalysis of SiO_2-loaded TiO_2 // *Journal of Molecular Catalysis A.* 2006. No. 243, pp. 85–88. DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.molcata.2005.08.016
2. Zhao L., Yu J., Cheng B. Preparation and characterization of SiO_2/TiO_2 composite microspheres with microporous SiO_2 core/mesoporous TiO_2 shell // *Journal of Solid State Chemistry.* 2005. Vol. 178 (6), pp. 1818–1824. DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.jssc.2005.03.024
3. Строкова В.В., Губарева Е.Н., Огурцова Ю.Н. Оценка свойств кремнеземного сырья как подложки в составе композиционного фотокаталитического материала // *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова.* 2017. № 2. С. 6–12. DOI: http://dx.doi.org/10.12737/23819
4. Лабузова М.В., Губарева Е.Н., Огурцова Ю.Н., Строкова В.В. Свойства фотокаталитического композиционного материала на основе кремнеземного сырья // *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова.* 2018. № 8. С. 85–92. DOI: http://dx.doi.org/10.12737/article_5b6d5863076c49.45633399
5. Yener H.B., Helvaci S.S. Effect of synthesis temperature on the structural properties and photocatalytic activity of TiO_2/SiO_2 composites

References

1. Arai Y., Tanaka K., Khlaifat A.L. Photocatalysis of SiO_2-loaded TiO_2. *Journal of Molecular Catalysis A.* 2006. No. 243, pp. 85–88. DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.molcata.2005.08.016
2. Zhao L., Yu J., Cheng B. Preparation and characterization of SiO_2/TiO_2 composite microspheres with microporous SiO_2 core/mesoporous TiO_2 shell. *Journal of Solid State Chemistry.* 2005. Vol. 178 (6), pp. 1818–1824. DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.jssc.2005.03.024
3. Strokova V.V., Gubareva E.N., Ogurtsova Y.N. Evaluation of the properties of the silica raw materials as a substrate as component of composite photocatalytic material. *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. V.G. Shukhova.* 2017. No. 2, pp. 6–12. DOI: http://dx.doi.org/10.12737/23819 (In Russian).
4. Labuzova M.V., Gubareva E.N., Ogurtsova Yu.N., Strokova V.V. Properties of photocatalytic composite material based on silica raw materials. *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. V.G. Shukhova.* 2018. No. 8, pp. 85–92. DOI: http://dx.doi.org/10.12737/article_5b6d5863076c49.45633399 (In Russian).
5. Yener H.B., Helvaci S.S. Effect of synthesis temperature on the structural properties and photocatalytic activity of TiO_2/SiO_2 composites synthesized using

synthesized using rice husk ash as a SiO_2 source // *Separation and Purification Technology*. 2015. Vol. 140, pp. 84–93. DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.seppur.2014.11.013

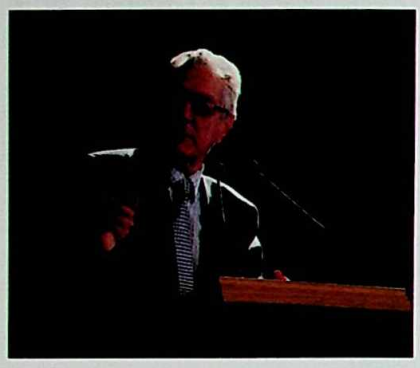
6. Nandanwar R., Ingh P., Syed F.F., Haque F.Z. Preparation of TiO2/SiO2 nanocomposite with non-ionic surfactants via sol-gel process and their photocatalytic study // *Oriental Journal of Chemistry*. 2014. Vol. 30. No. 4, pp. 1577–1584. DOI: http://dx.doi.org/10.13005/ojc/300417
7. Хела Р., Боднарова Л. Исследование возможности тестирования эффективности фотокатализа TiO_2 в бетоне // *Строительные материалы*. 2015. № 2. С. 77–81.
8. Тимохин Д.К., Геранина Ю.С. Долговечность цементных бетонов с добавкой диоксида титана в агрессивных условиях городской среды // *Техническое регулирование в транспортном строительстве*. 2016. № 2 (16). С. 9–12.
9. Боргарелло Э., Капоне К., Гверрини Д.Л. Разработка фотокаталитических материалов на основе цемента: ситуация и перспективы // *Цемент и его применение*. 2017. № 6. С. 74–77.
10. Лукутцова Н.П., Пыкин А.А., Постникова О.А., Головин С.Н., Боровик Е.Г. Структура цементного камня с диспергированным диоксидом титана в суточном возрасте // *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова*. 2016. № 11. С. 13–17.
11. Лукутцова Н.П., Постникова О.А., Соболева Г.Н., Ротарь Д.В., Оглоблина Е.В. Фотокаталитическое покрытие на основе добавки нанодисперсного диоксида титана // *Строительные материалы*. 2015. № 11. С. 5–8.
12. Мурашкевич А.Н., Алисиенок О.А., Жарский И.М. Физико-химические и фотокаталитические свойства наноразмерного диоксида титана, осажденного на микросферах диоксида кремния // *Кинетика и катализ*. 2011. Т. 52. № 6. С. 830–837.
13. Черкасов В.Д., Бузулуков В.И., Тараканов О.В., Емельянов А.И. Структурообразование цементных композитов с добавкой модифицированного диатомита // *Строительные материалы*. 2015. № 11. С. 75–77.
14. Le Saoût, G., & Ben Haha, M. (2011). Effect of filler on early hydration. In Á. Palomo, A. Zaragoza, & J. C. López Agüí (Eds.), Cementing a sustainable future (p. (7 pp.). Madrid, Spain: Instituto de Ciencias de la Construcción «Eduardo Torroja».
15. Guo M.-Z., Maury-Ramirez A., Poon C.S. Self-cleaning ability of titanium dioxide clear paint coated architectural mortar and its potential in field application // *Journal of Cleaner Production*. 2016. No. 112, pp. 3583–3588. DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.10.079

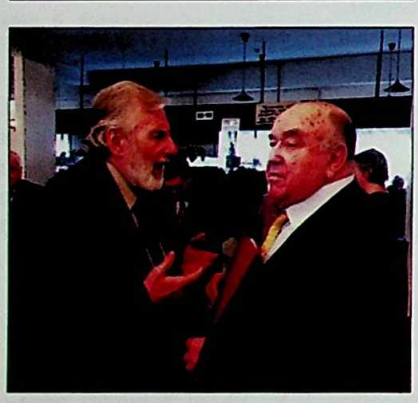
rice husk ash as a SiO_2 source. *Separation and Purification Technology*. 2015. Vol. 140, pp. 84–93. DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.seppur.2014.11.013

6. Nandanwar R., Ingh P., Syed F.F., Haque F.Z. Preparation of TiO_2/SiO_2 nanocomposite with non-ionic surfactants via sol-gel process and their photocatalytic study. *Oriental Journal of Chemistry*. 2014. Vol. 30. No. 4, pp. 1577–1584. DOI: http://dx.doi.org/10.13005/ojc/300417
7. Hela R., Bodnarova L. Research of possibilities of testing effectiveness of photoactive TiO_2 in concrete. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2015. No. 2, pp. 77–81. (In Russian).
8. Timokhin D.K., Geranina Yu.S. Durability cement concrete with the addition of titanium dioxide in the urban environment aggressive. *Tekhnicheskoe regulirovanie v transportnom stroitel'stve*. 2016. No. 2 (16), pp. 9–12. (In Russian).
9. Borgarello E., Kapone K., Gverrini D.L. Development of photocatalytic cement-based materials: situation and perspectives. *Tsement i ego primenenie*. 2017. No. 6, pp. 74–77. (In Russian).
10. Lukuttsova N.P., Pykin A.A., Postnikova O.A., Golovin S.N., Borovik E.G. The structure of cement stone with dispersed titanium dioxide in daily age. *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. V.G. Shukhova*. 2016. No. 11, pp. 13–17. (In Russian).
11. Lukuttsova N.P., Postnikova O.A., Soboleva G.N., Rotar' D.V., Ogloblina E.V. Photo-catalytic pavement on the basis of additive of nano-disperse titanium dioxide. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2015. No. 11, pp. 5–8. (In Russian).
12. Murashkevich A.N., Alisienok O.A., Zharskii I.M. Physicochemical and photocatalytic properties of nanosized titanium dioxide deposited on silicon dioxide microspheres. *Kinetika i kataliz*. 2011. Vol. 52. No. 6, pp. 830–837. (In Russian).
13. Cherkasov V.D., Buzulukov V.I., Tarakanov O.V., Emel'yanov A.I. Structure formation of cement composites with addition of modified diatomite. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2015. No. 11, pp. 75–77. (In Russian).
14. Le Saoût, G., & Ben Haha, M. (2011). Effect of filler on early hydration. In Á. Palomo, A. Zaragoza, & J. C. López Agüí (Eds.), Cementing a sustainable future (p. (7 pp.). Madrid, Spain: Instituto de Ciencias de la Construcción «Eduardo Torroja».
15. Guo M.-Z., Maury-Ramirez A., Poon C.S. Self-cleaning ability of titanium dioxide clear paint coated architectural mortar and its potential in field application. *Journal of Cleaner Production*. 2016. No. 112, pp. 3583–3588. DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.10.079

XXVII Общее собрание членов Российской академии архитектуры и строительных наук состоялось 17–19 апреля 2019 г. в Москве в Центральном доме архитектора

Российская академия архитектуры и строительных наук (РААСН) – одна из четырех государственных академий наук в Российской Федерации, высшая научная организация страны в сфере архитектуры, градостроительства и строительных наук. РААСН исполняет роль федерального научного центра, эффективно осуществляющего координацию фундаментальных исследований в указанных областях.





В Общем собрании членов РААСН приняли участие академики, члены-корреспонденты, иностранные члены, почетные члены и советники РААСН, в числе которых крупнейшие мастера архитектуры, ученые в области архитектурной, градостроительной и строительной науки.

На собрании заслушаны отчетные доклады президента РААСН академика А.В. Кузьмина, первого вице-президента РААСН академика В.И. Теличенко, вице-президента РААСН по направлению «Архитектура» академика А.П. Кудрявцева, и. о. вице-президента РААСН по направлению «Градостроительство» академика М.В. Шубенкова, вице-президента РААСН по направлению «Строительные науки» академика В.И. Травуша, вице-президента РААСН по направлению «Инновации» академика В.А. Ильичева, главного ученого секретаря президиума РААСН академика П.А. Акимова, заместителя президента РААСН В.С. Сычева о деятельности РААСН и ее подразделений в 2014–2018 гг.

После передачи в 2014 г. Министерству строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации в управление имущества академических институтов и региональных отделений РААСН было налажено эффективное взаимодействие с научными организациями, подведомственными Минстрою: Центральным научно-исследовательским и проектным институтом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации (ЦНИИП Минстроя России), Научно-исследовательским институтом строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук (НИИСФ РААСН), обеспечивалось научно-методическое сопровождение их деятельности. Академия формирует, актуализирует и контролирует ежегодное исполнение Плана фундаментальных научных исследований РААСН и Минстроя России, участвует в мониторинге эффективности и оценке результативности деятельности научных организаций, выполняющих научно-исследовательские, опытно-конструкторские и технологические работы гражданского назначения. В РААСН ежегодно готовятся предложения о приоритетных направлениях развития исследований в сфере архитектуры, градостроительства и строительных наук, а также предложения по видам и формам организации научных исследований.

В новых условиях также была налажена система эффективного взаимодействия с Российской академией наук (РАН), другими государственными академиями наук, Министерством науки и высшего образования Российской Федерации, Министерством экономического развития Российской Федерации, Министерством культуры Российской Федерации, другими государственными и профессиональными организациями. В рамках формирования государственной отраслевой политики Академия выступала одним из основных разработчиков проекта Стратегии инновационного развития строительной отрасли Российской Федерации на период до 2030 г., принимала активное участие в подготовке материалов и решений Государственного совета РФ по вопросам развития строительного комплекса и совершенствования градостроительной деятельности. Во многом благодаря активной позиции Академии в конце 2017 г. была воссоздана секция «Строительные технологии и архитектура» в составе Межведомственного совета по присуждению премий Правительства Российской Федерации в области науки и техники. В настоящее время РААСН участвует в создании Стратегии развития строительной отрасли Российской Федерации на период до 2030 г.

В целях дальнейшего развития региональной деятельности в 2015 г. было сформировано восемь территориальных отделений РААСН: Центральное, Приволжское, Дальневосточное, Сибирское, Северо-Западное, Уральское, Южное и Крымское. В 2017 г. в интересах устойчивого экологически безопасного развития, для разработки крупных инвестиционных проектов капитального строительства, промышленности строительных материалов, инженерных систем жизнеобеспечения и жилищно-коммунального хозяйства, транспорта, для решения научно-практических задач сохранения историко-культурного наследия и памятников архитектуры, реконструкции районов массовой жилой застройки, совершенствования образовательной деятельности и повышения качества подготовки кадров для архитектурно-строительного комплекса были созданы региональные академические научно-образовательные центры на базе Томского государственного архи-

тектурно-строительного университета и Новосибирского государственного архитектурно-строительного университета (Сибстрин).

В 2014–2018 гг. успешно выполнялись государственная программа «Развитие науки и технологий на 2013–2020 годы», Программа фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013–2020 гг. и Программа фундаментальных научных исследований в Российской Федерации на долгосрочный период (2013–2020 годы).

Академия постоянно совершенствует экспертную деятельность, причем пул экспертов формируется, как правило, из академиков, членов-корреспондентов, почетных членов, иностранных членов и советников РААСН. В 2014–2018 гг. была оптимизирована сеть научных советов РААСН, в которые по ряду направлений фактически был перенесен центр тяжести прогнозной и экспертной работы.

Члены и советники РААСН постоянно участвуют в проектировании, расчетном обосновании, научном сопровождении строительства, экспертизе и мониторинге наиболее сложных, ответственных и уникальных систем, конструкций, зданий, сооружений и комплексов, в числе которых объекты Олимпиады 2014 года, стадионы Чемпионата мира по футболу 2018 года, самое высокое здание в Европе – многофункциональный комплекс «Лахта-Центр» высотой 462 м и др. Взят курс на усиление взаимодействия с Федеральным центром нормирования, стандартизации и технической оценки соответствия в строительстве (ФАУ «ФЦС»), в том числе в части обеспечения научно обоснованного формирования планов разработки и актуализации сводов правил; планов проведения связанных с этим научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ; планов создания методических материалов и проведения мероприятий по мониторингу и анализу мероприятий, связанных с применением нормативных технических документов при проектировании и строительстве; проведения экспертизы соответствующих конкурсных заявок и отчетных материалов.

Международное сотрудничество РААСН имеет особое значение в современных условиях обострившейся международной обстановки, способствуя налаживанию межгосударственного диалога. Знаковым в этом отношении стало, например, подписание в 2017 году, в рамках официального визита делегации Академии в Китайскую Народную Республику, соглашения о вхождении РААСН в международный консорциум проекта «Новый Шелковый путь».

Академия активно участвует в развитии цифровых технологий в архитектурно-строительном комплексе России. Начиная с 2006 г. в РААСН проводится верификация программных средств, применяемых российскими проектными, конструкторскими и научно-исследовательскими организациями при определении нагрузок и воздействий, напряженно-деформированного (и иного) состояния, динамических характеристик, при оценке прочности, устойчивости и безопасности конструкций, зданий и сооружений.

На Общем собрании были проведены выборы президента РААСН. На высокий пост претендовали академик РААСН А.В. Кузьмин и академик РААСН А.В. Боков. После того как претенденты представили собравшимся свои предвыборные программы, состоялось тайное голосование, по результатам которого кандидатура А.В. Кузьмина получила поддержку 63% академиков и членов-корреспондентов РААСН. Таким образом, Александр Викторович Кузьмин на ближайшие пять лет был избран президентом РААСН.

Первым вице-президентом РААСН был избран академик РААСН Валерий Иванович Теличенко. Вице-президентом РААСН по направлению «Архитектура» был избран академик РААСН Георгий Васильевич Есаулов. Вице-президентом РААСН по направлению «Градостроительство» был избран академик РААСН Михаил Валерьевич Шубенков. Вице-президентом РААСН по направлению «Строительные науки» был избран академик РААСН Владимир Ильич Травуш. Вице-президентом РААСН по направлению «Инновации» избран академик РААСН Вячеслав Александрович Ильичев.

В результате тайных голосований на общих собраниях членов отделений РААСН были избраны академики-секретари отделений РААСН.

Академиком-секретарем Отделения архитектуры РААСН был избран академик РААСН, профессор, кандидат архитектуры Андрей Борисович Некрасов. Академиком-секретарем Отделения градостроительства РААСН была избрана академик РААСН Ольга Валентиновна Малинова. Академиком-секретарем Отделения строительных наук РААСН был избран академик РААСН, профессор, доктор технических наук Николай Иванович Карпенко.

Академик РААСН Павел Алексеевич Акимов был избран главным ученым секретарем президиума РААСН.

В завершение Общего собрания РААСН состоялась торжественная церемония награждения лауреатов XXII конкурса РААСН за лучшие научные и творческие работы в области архитектуры, градостроительства и строительных наук за 2018 год, лауреатов медали РААСН им. Н.В. Никитина за 2018 год и медали РААСН «За полезные труды».

15 мая 2019 г. на производственной площадке КНАУФ в Красногорске состоялась торжественная церемония открытия нового завода по производству систем для модульного домостроения. Официальный старт работе нового предприятия дали губернатор Московской области А.Ю. Воробьев и управляющий компаньон международной группы КНАУФ Манфред Грундке.

В Красногорске торжественно открыт завод КНАУФ «Новый дом» по производству систем для модульного домостроения

Запуск завода «Новый дом» по производству строительных модулей в России – абсолютно новый проект КНАУФ, от успеха которого будет зависеть развитие этого направления компании в мире. Для российских застройщиков это возможность в короткие сроки и с точно прогнозируемыми затратами возводить здания различного назначения из качественных, собранных на заводе конструкций со встроенными инженерными системами, внешней и внутренней отделкой.

Чтобы пожелать удачи новому предприятию, 15 мая в Красногорск на церемонию открытия приехали губернатор Московской области А.Ю. Воробьев, управляющий компаньон международной группы КНАУФ Манфред Грундке, глава городского округа Красногорск Э.А. Хаймурзина, исполнительный вице-президент Российского союза промышленников и предпринимателей В.М. Черепов, руководитель экономического отдела Посольства Германии в России Томас Граф, председатель правления Российско-германской внешнеторговой палаты и глава Московского представительства Объединения торгово-промышленных палат Германии Маттиас Шепп.

Губернатор Московской области А.Ю. Воробьев поздравил компанию КНАУФ и всех ее сотрудников с открытием завода и пожелал успеха новому проекту. Он отметил, что наличие в регионе такого высокотехнологичного, успешного предприятия позволяют, с одной стороны, обеспечивать людей хорошей работой, а с другой – иметь прочную экономическую базу для решения социальных задач.

Управляющий компаньон международной группы КНАУФ Манфред Грундке рассказал об истории проекта, его ключевых особенностях и поблагодарил партнеров – российские и зарубежные компании, поддерживающие модульное домостроение в России. В 2016 г. во время встречи с президентом В.В. Путиным ему была представлена концепция проекта, которую он одобрил. В настоящее время в Красногорске реализовано новое производство, позволяющее предложить клиентам индивидуальное решение по индустриальной технологии и соответственно разумной цене.

Руководитель экономического отдела Посольства Германии в России Томас Граф от имени посла Германии Рюдегера фон Фрича отметил, что новый завод модульного домостроения – это вклад в локализацию производства на российском рынке, знак стабильности и долгосрочных отношений.

После официальной части для гостей и журналистов была проведена экскурсия по заводу, на которой они увидели, как на современном оборудовании изготавливаются модульные элементы и конструкции с использованием профилей, гипсокартона, утеплителя, цементных плит и других компонентов, выпускаемых на российских предприятиях КНАУФ по высоким немецким стандартам качества.

Общий объем инвестиций в создание нового производства составил 6,5 млн евро.

Производство КНАУФ «Новый дом» оснащено высокоточным немецким оборудованием, на котором может изготавливаться более 80% будущих зданий. Это prefab-конструкции (prefab – сокращенное от англ. prefabricated – изготовленный в заводских условиях) – панели и модули заводской готовности, позволяющие возводить строительные объекты различного типа и назначения в короткие сроки, с минимальным отклонением от проекта и практически без отходов.

Prefab-панели представляют собой полностью готовые перекрытия, внутренние и внешние стены, из которых на заводе собирается prefab-модуль, готовый к транспортировке на строительную площадку.

Prefab-модули могут иметь различные варианты отделки, с интеграцией в панелях пола, потолка и стен всех инженерных систем (электрика, отопление, холодное и горячее водоснабжение, канализация, вентиляция, системы оповещения, Интернета, видеонаблюдения и т. д.). На строительной площадке из готовых конструкций остается только собрать здание – жилой дом, объект коммерческой недвижимости, детский сад, больницу и др.

В портфолио КНАУФ уже есть реализованные модульные здания: двухэтажный жилой дом в Красногорске и двухэтажная гостиница на 16 номеров в индустриальном парке «Ступино Квадрат». Модули для строительства этих объектов были изготовлены на экспериментальных сборочных производствах КНАУФ в Новомосковске (Тульская область) и Красногорске.

Производственная мощность завода КНАУФ «Новый дом» – 100 тыс. м^2 prefab-панелей в год. На производстве будут трудиться 50 работников.

УДК 539.2
DOI: https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-770-5-25-31

Н. Эль АШКАР, профессор, Проектирование зданий и сооружений (nhassan10@yahoo.com),
А. МОРСИ, доцент, Проектирование зданий и сооружений (alaamorsy@gmail.com),
А. ТАРЕК, помощник преподавателя (ahmed.tareq.1991@gmail.com)

Арабская академия науки, технологии и морского транспорта (Александрия, Египет)

Использование наночастиц, извлеченных из рисовой шелухи, в качестве минерального вяжущего

В мире существует много источников выбросов CO_2. Это исследование затрагивает два наиболее важных из них. Первый источник – производство портландцемента как основного компонента портландцементного бетона (ПЦБ), который является основным компонентом строительной отрасли. Вторым источником является CO_2, образующийся в результате сжигания рисовой шелухи (РШ) в рисовой промышленности. Установлено, что из рисовой шелухи есть возможность выделения различных типов наночастиц, при этом предотвращается сжигание шелухи. Этими наночастицами предлагается производить частичную замену портландцемента (ПЦ) в бетоне. В этом случае данные частицы выступают пуццолановыми добавками. Замену части ПЦ в бетонах можно считать одним из путей решения проблемы выбросов при производстве цемента. Главная цель этого исследования – изучение пуццоланической активности наночастиц, выделенных из рисовой шелухи, и подтверждение возможности их использования в строительной индустрии.
Был проведен ряд экспериментов для проверки пуццоланической активности различных частиц нано-кремнезема, извлекаемых из рисовой шелухи. Извлечение частиц проводилось по двум методикам. В ходе исследования было проверено два метода определения активности. Первый – измерение электропроводности, второй – индекс активности прочности согласно ASTM C311. В каждом методе использовались различные нанокремнеземы (НК) в сравнении с микрокремнеземом (МК), который хорошо известен как пуццолановый материал и также сравнивался с мраморным порошком, как инертным материалом. Результаты метода электропроводности показывают, что нанокремнезем 1 имеет превосходную пуццолановую активность по сравнению с другими материалами, использованными в данном исследовании. С другой стороны, использование второго метода (индекс активности) для НК и МК дает почти такую же пуццоланическую активность, это может быть связано с тем, что наночастицы недостаточно хорошо распределились (диспергировали) в цементной матрице. По полученным результатам можно сделать вывод, что нанокремнезем может быть использован в качестве хорошей замены портландцемента в связи с его пуццоланической активностью, что в свою очередь ведет к уменьшенной эмиссии опасных газов при производстве цемента, а также к использованию рисовой шелухи как отходов.

Ключевые слова: наночастицы, нанокремнезем, рисовая шелуха, пуццоланическая активность, проводимость, устойчивость, отходы.

Для цитирования: Ашкар Н. Эль, Морси А., Тарек А. Использование наночастиц, извлеченных из рисовой шелухи, в качестве минерального вяжущего // *Строительные материалы*. 2019. № 5. С. 25–31. DOI: https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-770-5-25-31

N. El ASHKAR, Professor of Structural Engineering (nhassan10@yahoo.com),
A. MORSY Assoc. Prof., Structural Engineering (alaamorsy@gmail.com),
A. TAREK, Teacher assistant (ahmed.tareq.1991@gmail.com)
Arab Academy for Science, Technology and Maritime Transport (Alexandria, Egypt)

Using of Nanoparticles Extracted from Rice Husk as Cementitious Material for Sustainability Issues

There are many sources of CO_2 emissions in the world. This study concentrates on two of the most important sources of CO_2 emissions. The first one is from Portland cement production as a main component of Portland cement concrete (PCC), which is the main pillar of the construction industry. The second source is due to the burning of rice husk (RH) from rice industry. Based on this information, if different types of nanosilica particles that can be extracted from rice husk, preventing its random burning, and replace part of Portland cement (PC) in PC concrete as a pozzolanic material, which can be considered as a multiple solution for solving the previous mentioned problems of CO_2 emissions. The main objective of this study is to investigate the pozzolanic activity of these nano particles (NPs) as it can be used as cement replacement material. Also, give an important usage of rice husk by extracting the nanoparticles from rice husk instead of the random burning of it. An extensive experimental program has been conducted to examine the pozzolanic activity of different nanosilica particles extracted from rice husk using two testing methods. The first method is the electrical conductivity measurement and the second is the strength activity index according to ASTM C311, in each method there are different types of nanosilica (NS) compared to silica fume (SF), which well known as pozzolanic material and also compared to Marble Powder as an inert waste material. The results of the electrical conductivity method show that, the Nanosilica 1 has superior pozzolanic activity compared to the other materials used in this study. On the other hand, the using of the second method (strength activity index) both NS and SF almost give the same pozzolanic activity, it may be related to that, the nanoparticles didn't disperse in the cement matrix. According to these results the nanosilica could be used as a good replacement of Portland cement due to its pozzolanic activity, which leads to lower emissions of hazards gases in cement manufacturing as well as using the rice husk as waste material.

Keywords: nanoparticles, nanosilica, rice husk, pozzolanic activity, conductivity, sustainability, waste materials.

For citation: El Ashkar N., Morsy A., Tarek A. Using of Nanoparticles Extracted from Rice Husk as Cementitious Material for Sustainability Issues. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2019. No. 5, pp. 25–31. (In Russian). DOI: https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-770-5-25-31

It is well known that, huge emission of carbon dioxide and other hazards gases are produced from cement industry to the atmosphere, which leads to environmental problems. CO_2 gas represents more than 65% of Global Greenhouse Gas Emissions [1]. There are many industrial processes that give by-products to be used as Portland cement replacement materials to reduce Portland cement usage [2–4] and achieve sustainable and durable concrete [5–8].

Rice husks (RHs) produced from the rice production are a bulky biomass with high silica content. The anticipated world rice production in 2016 is 746.1 million tons. This means that, approximately 186–260 million tons of RH biomass was generated globally in 2016 [9]. Silica and lignocellulose (LC) are two main components of RH, which lead to the usage of it in the production of silica or cellulose nanoparticles (NPs). Due to the tough nature, low nutritional value and great bulk of RH, its application has been limited [10]. The two most common RHs disposal methods are open field burning and land filling, which result in energy waste, greenhouse gas emission, air pollution, and huge landfill space occupancy due to their low bulk density [11, 12].

A pozzolan is defined as "a siliceous and aluminous material, which in itself, possesses little or no cementitious value, but which will in finely divided form in the presence of moisture, react chemically with calcium hydroxide at ordinary temperature to form compounds possessing cementitious properties" [13–17].

Long years ago both of natural pozzolans and industrial by-products were used as supplementary cementing materials (SCMs). Using pozzolans as nanosilica extracted from RH as cementitious material provides a sustainable solution by using nanotechnology, which leads to a significant reduction in the CO_2 emissions associated with Portland clinker production. Also, the use of RH in the extraction of nanosilica will be getting rid of random burning of it. In addition to economic and environmental benefits, using of pozzolan (PZ) in the cement industry improves the durability, and mechanical properties of concrete and mortar [18–24]. Pozzolanic materials have proven to be efficient alternative materials that meet the sustainability requirements; this is because it allows using of waste in the production of PCC. In addition, the partial replacement of PC by such material will lead to reduce the amount PC, fuel consumption and CO_2 emissions.

The objective of this research is to prove that the nanosilica extracted from rice husk can replace the cement as supplementary cementitious material or as a pozzolanic material. The main reason for replacement of cement was lowering emissions of hazards gases from both cement production and also random burning of rice husk.

Several methods have been developed to determine the pozzolanic activity; many of these methods are based on the measurement of a property that is directly related to concrete applications [25]. These methods can be divided into direct and indirect methods. The direct methods related to the presence of $Ca(OH)_2$ and its reduction with time as the reaction between calcium hydroxide and silica occurs, using analytical methods such as X-ray diffraction (XRD), thermo-gravimetric analysis (TGA) and other methods. The indirect test methods measure a physical property of a test sample that indicates the extent of pozzolanic activity. This may involve measurement of properties such as compressive strength, electrical conductivity and other methods. Compressive strength test methods have been used to assess the pozzolanic activity of coal bottom ash, glass powders, crushed bricks, silica fume and sewage sludge ash [26]. Electrical conductivity and pH measurements were used to determine the pozzolanic activity of the fluid catalytic cracking (FCC) in aqueous suspensions of pozzolan/calcium hydroxide [25]. Results from an indirect pozzolanic activity test are often corroborated using direct tests to confirm that pozzolanic reactions are occurring [26].

Nanotechnology is one of the frontiers of science today. As a matter of fact, nanotechnology could affect us all, beyond nanoparticles, critical length scales and nano-tools [27].There are many methods used for nanoparticles production , an approach for comprehensive utilization of RHs have been developed to obtain both lignocellulose

Рис. 1. Микрофотография: *a* – микрокремнезем (МК); *b* – нанокремнезем 1 (НК1); *c* – нанокремнезем 2 (НК2)

Fig. 1. TEM image for: *a* – SF; *b* – NS1; *c* – NS2

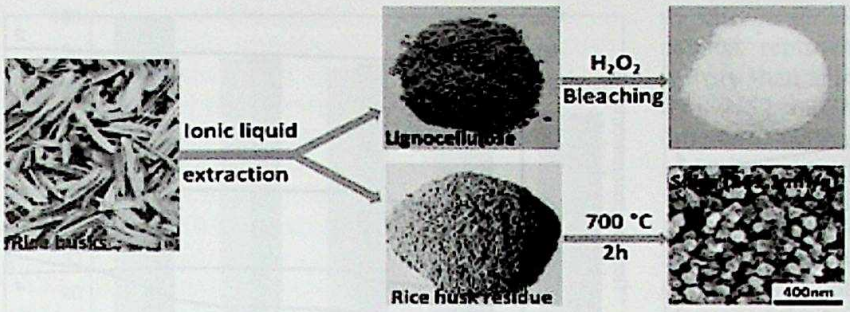


Рис. 2. Один из методов производства нанокремнезема
Fig. 2. One of the production methods NS

and high quality porous silica nanoparticles from RHs. Most of the lignocellulose in RHs was first extracted by dissolving in ionic liquids. The dissolved lignocellulose was subsequently separated and collected. The remaining RH residue after extraction that contains a high concentration of silica was thermally treated to synthesize amorphous porous silica nanoparticles with a high purity and surface area [27].

The main aim of this research is to examine the pozzolanic activity of nano-silica extracted from rice husk waste with no value material with different production techniques, this will allow us to replace the cement as supplementary cementitious material for better environmental sustainability. In addition to compare the efficiency of different types of nano-silica with other well-known pozzolanic material such as "silica fume". To achieve this goal an experimental program has been conducted to examine the Pozzolanic activity of Nanosilica 1 and Nanosilica 2 extracted from rice husk, using two different method of extraction compared to SF, which have highly pozzolanic activity and Marble Powder as an well-known waste inert material. The testing of the pozzolanic activity for all materials in this study through two methods, the electrical conductivity measurement and the second method is the strength activity index according to ASTM C311.

Материалы
Materials

The aggregate used is clean siliceous sand with 0.6 mm of maximum aggregate and also was graded sand that's satisfying the ASTM C618. Cement (OPC Type 1 32.5N). %95 pure calcium hydroxide (CH) form MORGAN SPECIALITY CHEMICALS Co. Silica fume (SF) from Sika Company, contains extremely fine (0.1 mm) reactive silicon dioxide with bulk density = 300 kg/m^3 and TEM images as shown in Fig. 1, *a*. Nanosilica 1 (NS 1) from NanoTech Company with mean particle size = 40 nm and TEM images as shown in Fig. 1, *b*. Nanosilica 2 (NS 2) from NanoTech production Company with mean particle size = 20 nm and TEM images as shown in Fig. 1, *c*, both of them produced by NanoTech Company as in Fig. 2. Commercial Marble powder was produced from local source in Cairo (Shak El Taban).

Методы измерения пуццолановой активности
Pozzolanic Activity Measuring Methods

The pozzolanic activity has been measured in this study through two methods one of them was the electrical conductivity method and the other was Strength Activity Index method (SAI) as in the ASTM C311.

Метод испытания электропроводности / Electrical Conductivity Testing Method. The electrical conductivity was used to determine the pozzolanic activity of the different types of nano silica and other materials in aqueous suspensions of pozzolan/calcium hydroxide. The electrical conductivity of aqueous suspensions of Nanosilica 1 (NS1), Nanosilica 2 (NS2), Silica fume (SF) and Marble Powder (MP) in the absence of calcium hydroxide were measured which indicated by C° using one gram of pozzolan was added to 50 mL of distilled water into a sealed beaker at 40°C. Then, the electrical conductivity measurements were recorded for a total period of 10,000 second at 40°C by using HACH (HQ430d flexi) electrical conductivity meter [24]. The electrical conductivity of dissolved lime in the distilled water in the absence of pozzolan indicated by CL and the electrical conductivity of the aqueous suspension of the pozzolan with of calcium hydroxide indicated by CF was measured as follows: an unsaturated solution of calcium hydroxide

Состав смесей
Mix design for all tested materials

The weights and % of replacement for all of tested materials of each mix are to make six cubes							
Образец Name of Sample	Цемент Cement (Kg)	В/Ц/ Water/Binder ratio	Песок Sand (Kg)	МК SF (%)	НК1 NS1 (%)	НК2 NS2 (%)	Мраморная мука Marble powder (%)
Контрольный Control	0.5	0.484	1.375	–	–	–	–
SF	0.4	0.564	1.375	20	–	–	–
NS1	0.4	0.58	1.375	18	2	–	–
NS2	0.4	0.6	1.375	18	–	2	–
MP	0.4	0.6	1.375	–	–	–	20
	The flow was constant for all mixtures						

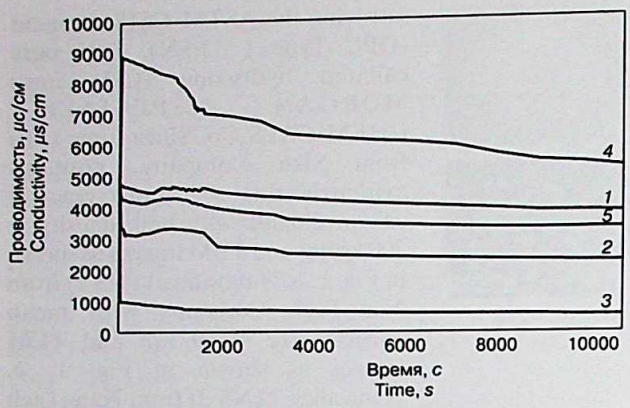


Рис. 3. Значения проводимости (μс/см): *1* – известь; *2* – МК; *3* – НК1, *4* – НК2; *5* – мраморная мука

Fig. 3. Conductivity values (μs/Cm): *1* – lime; *2* – SF; *3* – NS1; *4* – NS2; *5* – marble powder

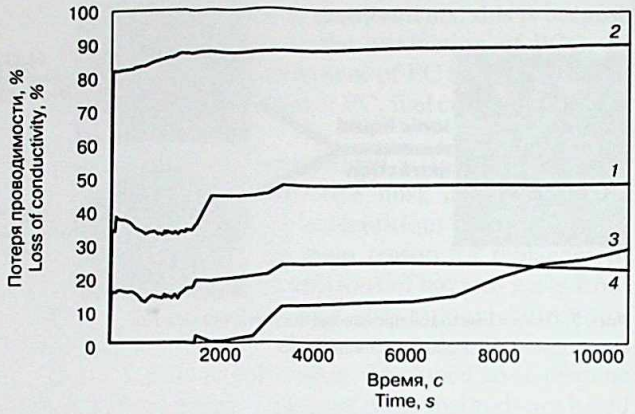


Рис. 4. Потеря проводимости (%) в зависимости от времени для материалов: *1* – МК; *2* – НК1, *3* – НК2; *4* – мраморная мука

Fig. 4. The % of loss in conductivity for all materials: *1* – SF; *2* – NS1; *3* – NS2; *4* – marble powder

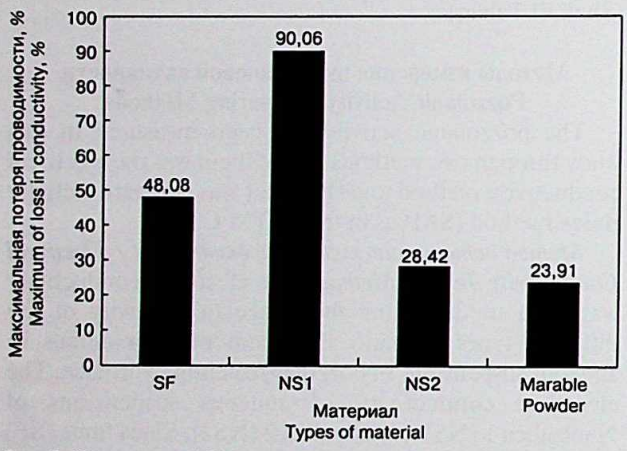


Рис. 5. Максимальный % потерь в проводимости для всех материалов

Fig. 5. The maximum % of loss in conductivity for all materials

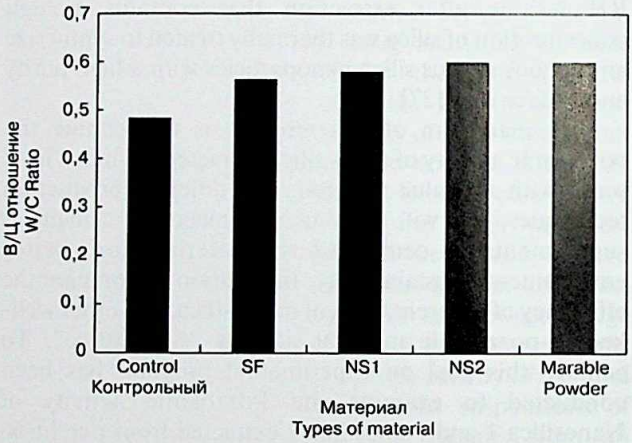


Рис. 6. В/Ц отношение для всех материалов

Fig. 6. W/C ratio for different mixtures in the SAI

was prepared by dissolving 40 mg of CH with 50 mL of distilled water in a closed sealed beaker to prevent carbonation, and then raising the temperature to 80°C to accelerate dissolution by using a heater. Subsequently, the temperature was decreased to 40°C, and 1 g of the mineral under study was added (SF, NS1, NS2 or MP). Next, the electrical conductivity of the solution was immediately measured for a total time of 10,000 s. But for the calculation of the loss in the conductivity in percentage LC% as in equation 1, the electrical conductivity of dissolved lime in the distilled water in the absence of pozzolan must be also measured.

$$CL = \frac{CL-((CF)-(C0))}{CL} \cdot 100, \%. \qquad (1)$$

The assessment of the pozzolanic activity of materials by measuring the electrical conductivity in aqueous suspensions takes into account the fact that the OH^- and Ca^{2+} dissolved in water react with the silica from the pozzolan to produce insoluble products, such as calcium silicate hydrate (CSH). The decline of these ions in solution decreases the electrical conductivity of the solution, if the solution is unsaturated with respect to CH. Because the pozzolanic reaction causes a reduction in the concentration of OH^-, a decrease in the pH of the system also occurs; this means that the relation between the % loss in conductivity and the pozzolanic activity of materials under test is directly proportional [24].

Индекс активности / Strength Activity Index (SAI). Strength activity index is a standard test in ASTM C311 and the test is based on measuring the compressive strength values of test mortar and control cement mortar by using compressive testing machine. The weights for the mixture of the control sample given in the standard to make six cubes (50×50×50 mm) are cement (500 g), water (242 g), and sand (1375 g). In accordance with ASTM C311 [12], 20% by weight of the cement used in the control mortar was replaced with the tested material to prepare the test mortar, while the mix designs used in this study as shown in Table.

It has been indicated that, water content of the test mortar should be adjusted according to the required flow according to that of the control mix flow. Since Specification C 618 specifies that "meeting the 7 day or 28 day Strength Activity Index will indicate specification compliance" only one age might be required. At the

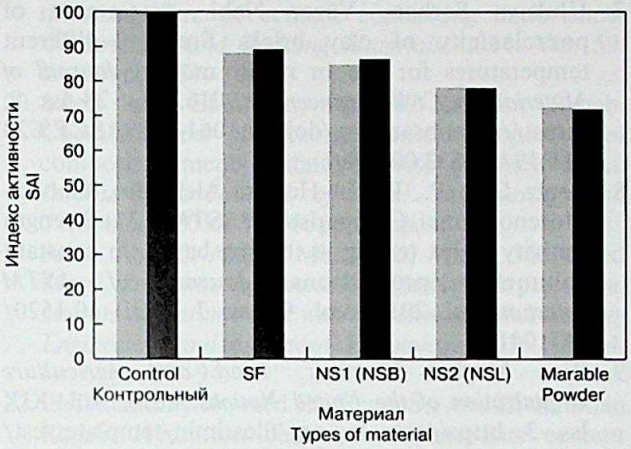


Рис. 7. Результаты по индексу активности: ■ – 7 дней; ■ – 28 дней
Fig. 7. The results of SAI: ■ – 7 Days Results; ■ – 28 Days Results

option of the producer or the user after preparing six-cube batches, only three cubes of control and test mixtures need to be molded for either 7 or 28 day testing (ASTM Standard C 618 "Specifications for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concret"). To determine the compressive strength, as specified in Test Method C 109/C 109M, is depending upon how many specimens were molded as prescribed in the section on Number of Specimens (ASTM Standard C 109/C 109M Test method for compressive strength of hydraulic cement mortars (Using 2-in. or (50-mm) cube specimens). Calculation of the strength activity index with Portland cement is done as follows: Strength activity index with Portland cement = (A/B)*100, where: A = average compressive strength of test mixture cubes, MPA; B = average compressive strength of control mix cubes, MPA.

Результаты и обсуждение
Results and Discussion

In this section the results of both conductivity test and SAI test for all tested materials will be represented and discussed.

Проводимость / Conductivity Results. The relation between the conductivity in (μs/cm) and time in (sec) for lime and other tested materials is shown in Fig. 3, from this figure it was clear that Co must be measured before the calculation of % of loss in conductivity. This means that, the conductivity of the solution can increase, due to the presence of soluble salts in the tested materials.

Fig. 4 shows the relation between the percentage of loss in conductivity and time for different materials; NS1, NS2, SF and MP, from this figure it can be shown this NS1 compared to other materials. The rate of loss in conductivity for nanosilica1 compared to other materials in the first 30 min of the test was very high which it could speeds the rate of the pozzolanic reaction.

The results are summarized in Fig. 5. From this figure it can be indicated that, % of loss in conductivity for NS1 has the superior % of loss in conductivity at 90% compared to other material. Also indicate that NS1 can be used as cement replacement material with more pozzolanic activity than silica fume by 100% greater enhancement than NS2 and MP. This may be related to the large difference between the surface area between nanosilica and micro silica (silica fume), which directly proportional with the reaction between silica particles and calcium hydroxide. While the large difference in pozzolanic activity between two types of nanosilica may be related to differences in both the properties of surface and also the contact angles between them.

Результаты индекса активности / Strength Activity Index Results. The SAI test was performed according to ASTM C311 to NS1, NS2, SF and MP with ratios as shown in Table.The results for the water to binder ratios for all mix are shown in Fig. 6. From this figure the mixes contains NS1 and NS2 needed more water than the mix contains SF, this may due to the large difference between nanosilica and silica fume.

Fig. 7 shows SAI for different mixes; NS1, NS2, SF and MP. From this figure it is clearly shown that replacing cement by other pozzolanic material slightly decreases the SAI. In addition, the results of the SAI showed that the used NS1 and NS2 in addition to silica fume almost decrease the SAI by 3 and 11% respectively, while the marble have 15% decreased than the silica fume replacement. This decrease of SAI when adding nanosilica to silica fume may be related to adding the mixture of nanosilica with silica fume in the cement mixture without dispersion.

It concluded that, in spite of the enormous increase for consumption of $Ca(OH)_2$ in the conductivity method for NS1 than SF, it is shown that the SAI of NS1 is reduced than SF. This difference in comparing the pozzolanic activity using both methods may be due to two factors, first; the real chemical reaction between silica components in the tested materials and $Ca(OH)_2$ in the absence of cement matrix in the first measurement method. While in the second method the dispersion of this nanoparticle in the mixture is a main factor affecting the compressive strength of the tested materials for avoiding agglomeration of this nanoparticles and loss its main advantage "nano-dimension". The second factor; in the strength activity index method the flow must be constant for all tested mixture which leads to change the quantity of water in each test which can lead also to the reduction of compressive strength of the cubes as shown in Fig. 7.

Выводы
Conclusions

The main problem that has been studied in this research was how to reduce the large emissions of CO_2 due to not only by reducing the amount of cement used in construction but also by using of nanosilica that can be extracted from Rice husk instead of random burning of it. While the main objective of this study was to investigate the pozzolanic activity of nanosilica particle extracted from rice husk to be used as cementitious material.

From this study it can be concluded that:

- NS1 has shown that it has the lead in the pozzolanic activity compared to any other materials used in this research;
- NS1 gives greatest % of loss in conductivity which is doubles that of SF;
- NS1 show a very high rate of loss in conductivity in the first 30 minutes which leads to accelerate the pozzolanic reaction;
- It was shown that in the SAI the water to binder ratio was not constant to achieve the constant flow, which means that NS1 needs more water than SF;
- The results of SAI shows that there are a reduction of the pozzolanic activity of NS1 compared to SF;
- The dispersion of nanoparticle is main problem affecting the SAI results.
- By proving the pozzolanicty of the nanosilica extracted from rice husk can lead the future work in the environmental phase of lowering the % of CO_2 emissions, other hazard gases, also their bad effect on the environment and for better sustainability. Recommendations for future work are to make the SAI with constant water to binder ratio.

References

1. Greenhouse Gas Emissions. United States Environmental Protection Agency. January 19, 2017. https://www.epa.gov/ghgemissions/sources-greenhouse-gas-emissions (date of access 19.06.2018)
2. Sabrah B.A., El-Aleem S. Abd, Gouda H. Physico-mechanical and chemical properties of composite cement containing high percentages of mechanically activated Egyptian slag. *International Journal of Engineering Research & Technology*. 2014. Vol. 3 (9), pp. 1446–1457.
3. Abd El. Aziz, S. Abd El-Aleem, Heikal M., El-Didamony H. Hydration and durability of sulphate-resisting and slag cement blends in Caron's Lake water. *Cement and Concrete Research*. 2005. Vol. 35. Iss. 8, pp. 1592–1600.
4. El-Didamony H., S. Abd El-Aleem Mohamed, Gouda H. Durability performance of blended cements incorporating Egyptian SRC and GBFS in Aggressive Water. *International Journal of Innovative Science and Modern Engineering (IJISME)*. 2015. Vol. 3. Iss. 9, pp. 23–35.
5. Bahurudeen A., Kaisar Wani, Mirza Abdul Basit, Manu Santhanam Assesment of pozzolanic performance of sugarcane bagasse ash. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2016. Vol. 28 Iss. 2. https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29MT.1943-5533.0001361
6. Pavía S., Walker R., Veale P., Wood A. Impact of the properties and reactivity of rice husk ash on lime mortar properties. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2014. Vol. 26. Iss. 9. https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29MT.1943-5533.0000967
7. Ulukaya Serhan, Yüzer Nabi. Assessment of pozzolanicity of clay bricks fired at different temperatures for use in repair mortar. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2016. Vol. 28 Iss. 8. https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29MT.1943-5533.0001560
8. Bentz Dale P., Durán-Herrera Alejandro, Galvez-Moreno Daniel. Comparison of ASTM C311 Strength Activity Index testing vs. testing based on constant volumetric proportions. *Journal of ASTM International*. 2011. Vol. 9. Iss. 7. DOI: 10.1520/JAI104138
9. Rice Market Monitor. *Food and Agriculture Organization of the United Nations*. 2016. Vol. XIX Iss. 3. http://www.fao.org/fileadmin/templates/est/COMM_MARKETS_MONITORING/Rice/Images/RMM/RMM-Oct16_H.pdf
10. Heikal Mohamed, Aziz M. Abd El., El-Aleem S. Abd, El-Didamony H. Effect of polycarboxylate on rice husk ash Pozzolanic cement. *Silicates Industriels*. 2004. Vol. 69 (9–10), pp. 73–84.
11. El-Aleem Mohamed Saleh Abd. Activation of granulated blast-furnace slag using lime rich sludge in presence and absence of rice husk ash. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*. 2015. Vol. 5. Iss. 3, pp. 43–51.
12. Chen Haoran, Wang Weixing, Martin Jarett C., Oliphant Adam J., Doerr Paige A., Xu Jeffery F. Extraction of lignocellulose and synthesis of porous silica nanoparticles from rice husks: a comprehensive utilization of rice husk biomass. *ACS Sustainable Chem. Eng*. 2013. Vol. 1. Iss. 2, pp. 254–259. https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/sc300115r
13. El-Alfi E.A., Radwan A.M., Abd El-Aleem S. Effect of limestone fillers and silica fume pozzolana on the characteristics of sulfate resistant cement pastes. *Ceramics Silikaty*. 2004. Vol. 48. Iss. 1, pp. 29–33.
14. Abd-El.Aziz M.A., Aleem S. Abd. El., Heikal Mohamed. Physico-chemical and mechanical characteristics of pozzolanic cement pastes and mortars hydrated at different curing temperatures. *Construction and Building Materials*. 2012. Vol. 26. Iss. 1, pp. 310–316.
15. Abd-El-Aleem S., Abd-El-Aziz M.A., El-Didamony H. Calcined carbonaceous shale pozzolanic Portland cement. *Egyptian Journal of Chemistry*. 2002. Vol. 5. Iss. 3, pp. 501–517.
16. ASTM Standard C311-05: Standard Test Methods for Sampling and Testing Fly Ash or Natural Pozzolans for Use in Portland-Cement Concrete.
17. ASTM Standard C125: Standard terminology Relating to concrete and concrete Aggregates.
18. Heikal Mohamed, Abd El-Aleem S., Morsi W.M. Characteristics of blended cements containing nano-silica. *Housing & Building National Research Center (HBRC) Journal*. 2013. Vol. 9, pp. 243–255.
19. Abd El-Aleem S., Heikal Mohamed, Morsi W.M. Hydration characteristic, thermal expansion and

microstructure of cement containing nano-silica. *Construction and Building Materials.* 2014. Vol. 59. Iss. 30, pp. 151–160.
20. Saleh Abd El-Aleem, Abd El-Rahman Ragab. Chemical and physico-mechanical properties of composite cements containing micro- and nano-silica. *International Journal of Civil Engineering and Technology.* 2015. Vol. 6, pp. 5, pp. 45–64.
21. Saleh Abd El-Aleem Mohamed, Wafaa Mohamed Morsi. *Performance of nano-modified cement pastes and mortars in Caron's lake water. International Journal of Engineering and Advanced Technology.* 2015. Vol. 4. Iss. 6, pp. 80–94.
22. El-Didamony H., Abd El-Aleem S., Abd El-Rahman Ragab. Hydration behavior of composite cement containing fly ash and nanosized-SiO_2. *American Journal of Nano Research and Applications.* 2016. Vol. 4. Iss. 2, 6–16.
23. Kizilkanat Ahmet B., Oktay Didem, Kabay Nihat, Tufekci M. Mansur. Comparative experimental study of mortars incorporating pumice powder or fly ash. *Journal of Materials in Civil Engineering.* 2016. Vol. 28. Iss. 2 https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29MT.1943-5533.0001407
24. Hoppe Filho J., Garcez M.R., Medeiros M.H.F., Silva Filho L.C.P., Isaia G.C. Reactivity assessment of residual rice-husk ashes. *Journal of Materials in Civil Engineering.* 2017. Vol. 29. Iss. 6. https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29MT.1943-5533.0001820
25. Velázquez Sergio, Monzó José M., Borrachero María V., Payá Jordi. Assessment of the pozzolanic activity of a spent catalyst by conductivity measurement of aqueous suspensions with calcium hydroxide. *Materials (Basel).* 2014. Vol. 7. Iss. 4, pp. 2561–2576. doi: 10.3390/ma7042561
26. Donatello S., Tyrer M., Cheeseman C.R. Comparison of test methods to assess pozzolanic activity. *Cement and Concrete Composites.* Vol. 32. Iss. 2, pp. 121–127. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2009.10.008
27. Filipponi Luisa, Sutherland Duncan. NANOTECHNOLOGIES: Principles, Applications, Implications and Hands-on Activities. A compendium for educators. https://ec.europa.eu/research/industrial_technologies/pdf/nano-hands-on-activities_en.pdf

УДК 666.973.6
DOI: https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-770-5-32-37

М.А. ГАЗИЕВ, канд. техн. наук (mgaziev56@mail.ru)

Грозненский государственный нефтяной технический университет им. акад. М.Д. Миллионщикова
(364061, Чеченская Республика, г. Грозный, пр-т им. Х.А. Исаева, 100)

Оценка потерь предварительного напряжения в арматуре от ползучести автоклавного газобетона

Одним из путей повышения долговечности наружных стеновых панелей из ячеистых бетонов является применение в них предварительно напряженного армирования, позволяющее существенно повысить их жесткость и трещиностойкость.
В статье приводятся результаты экспериментальных исследований потерь натяжения в арматуре от ползучести бетона для предварительно напряженных газобетонных элементов. Установлено, что эти потери линейно зависят от начального уровня обжатия в газобетоне в пределах от 0,3 до 0,6 от его призменной прочности и составляют 22–30%. Остаточные напряжения в напрягаемой арматуре находятся в пределах от 136 до 245 МПа, что является достаточным для обеспечения эксплуатационной трещиностойкости крупноразмерных изделий из газобетона при влагообменных и карбонизационных процессах. Полученные результаты являются основой для дальнейшей разработки метода расчета потерь напряжений в арматуре от ползучести газобетона, а также при составлении рекомендаций по проектированию и изготовлению преднапряженных ограждающих конструкций из ячеистых бетонов.

Ключевые слова: автоклавный газобетон, эксплуатационная надежность, преднапряженные элементы, ползучесть бетона, потери напряжений, трещиностойкость и долговечность.

Для цитирования: Газиев М.А. Оценка потерь предварительного напряжения в арматуре от ползучести автоклавного газобетона // *Строительные материалы.* 2019. № 5. С. 32–37. DOI: https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-770-5-32-37

M.A. GAZIEV, Candidate of Sciences (Engineering) (mgaziev56@mail.ru)
Grozny State Oil Technical University named after Academician M.D. Millionshchikov
(100, Kh.A. Isaeva Avenue, Grozny, Chechen Republic, 364061, Russian Federation)

Estimation of Pre-Stress Losses in the Reinforcement Due to the Creep of Autoclaved Aerated Concrete

One of the ways to increase the durability of the external wall panels of cellular concrete is the use of pre-stressed reinforcement, which can significantly increase their stiffness and crack resistance. The article presents the results of experimental studies of tension losses in the reinforcement due to the creep of concrete for pre-stressed aerated concrete elements. It is established that these losses linearly depend on the initial level of compression in aerated concrete in the range from 0.3 to 0.6 of its prismatic strength and constitute 22–30%. Residual stresses in the stressed reinforcement range from 136 to 245 MPa, which is sufficient to ensure the operational crack resistance of large-size products of aerated concrete during moisture exchange and carbonizing processes. The obtained results are the basis for further development of the method for calculating stress losses in the reinforcement due to the aerated concrete creep, as well as when preparing recommendations for the design and manufacture of pre-stressed enclosing structures of cellular concrete.

Keywords: autoclaved concrete, operational reliability, pre-stressed elements, concrete creep, stress losses, crack resistance and durability.

For citation: Gaziev M.A. Estimation of pre-stress losses in the reinforcement due to the creep of autoclaved aerated concrete. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2019. No. 5, pp. 32–37. (In Russian). DOI: https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-770-5-32-37

До середины 1990-х гг. в России повышение энергоэффективности зданий и сооружений не являлось приоритетной задачей. Это было связано с большим количеством и, следовательно, низкой ценой на энергетические ресурсы. В настоящее время мировая тенденция, ориентированная на энергоэффективность, влияет и на российскую строительную сферу: ужесточаются требования к термическому сопротивлению ограждающих конструкций. Одним из приемов повышения энергоэффективности здания является использование материалов, способных уменьшить теплопотери и сделать внутренний микроклимат более комфортным. В ряду таких материалов, безусловно, заслуживает внимания автоклавный ячеистый бетон, который признан одним из самых эффективных строительных материалов для наружных ограждающих конструкций зданий, выполняющим одновременно несущие и теплозащитные функции, отвечающий современным возросшим требованиям по теплозащите, пожарной безопасности и санитарным нормам.

Анализ результатов ранее выполненных обширных натурных обследований жилых домов с наружными стеновыми панелями из автоклавного ячеистого бетона показывает, что в условиях эксплуатации на их поверхности возникают усадочные трещины от воздействия влагообменных и карбонизационных процессов [1–8].

В исследованиях Е.С. Силаенкова [1] отмечается, что в стеновых панелях из ячеистого бетона в период эксплуатации от 5–6 мес до 1,5 лет вначале появляются одиночные трещины шириной 0,2–0,3 мм, доходя в отдельных случаях до 0,5–0,7 мм, разделяющие панель на отдельные участки, а в последующем образуются трещины меньшей ширины, чем первоначальные (0,15–0,25 мм), но в большем количестве и локализуются внутри участков, ограниченных первоначальными трещинами. При этом предполага-

лось, что первые трещины, которые появились на наружной поверхности панелей, являются следствием высыхания, а последующие – влияния фактора карбонизации ячеистого бетона.

Такая динамика появления и развития поверхностных трещин объясняется тем, что расчетные суммарные растягивающие усадочные напряжения с учетом ползучести, возникающие в наружных слоях стеновой панели при одновременном протекании этих процессов по ее толщине (при разных сроках эксплуатации начиная с 6 мес), могут составить от 0,5 до 1,4 МПа. Данные усадочные напряжения превышают предел прочности при растяжении ячеистых бетонов, используемых в ограждающих конструкциях, в 1,5–4 раза, что непременно приводит к образованию и раскрытию трещин недопускаемой ширины [9].

Проблема повышения трещиностойкости и долговечности крупноразмерных изделий из ячеистых бетонов является многоплановой, и решать ее надо комплексно, как технологическими приемами, так и конструктивными мероприятиями.

Технологические приемы и методы управления эксплуатационной деформируемостью и трещиностойкостью ячеистых бетонов через алгоритмы конструирования для них оптимальных параметров состава и структуры твердой фазы и порового пространства по комплексу задаваемых свойств и систему рецептурно-технологических факторов их регулирования, обеспечивающих высокую долговечность ячеисто-бетонных изделий, разработаны академиком Е.Н. Чернышовым [10].

Одним из конструктивных мероприятий, направленных на повышение трещиностойкости наружных стеновых панелей из автоклавного ячеистого бетона, как показали проведенные в 1990-е гг. исследования в НИИЖБ, ЦНИСК, Уральском ПромстройНИИпроекте и Политехническом институте, является применение предварительно напряженной арматуры [11–13].

Проведенные комплексные исследования в области создания преднапряженных газобетонных стеновых панелей также свидетельствуют о том, что применение предварительно напряженной арматуры оказывает существенное влияние на повышение их жесткости и трещиностойкости при одновременном снижении трудоемкости и себестоимости производства таких изделий [14].

Необходимость дальнейшего развития производства преднапряженных стеновых панелей из ячеистого бетона подвергается сомнению из-за возможных высоких потерь напряжения в арматуре от усадки и ползучести бетона в процессе их эксплуатации. В связи с этим является актуальным изучение вопроса о величине потерь напряжения в напрягаемой арматуре от ползучести бетона в газобетонных стеновых панелях, так как данный фактор существенно меняет начальное предварительное напряжение в арматуре, снижая эффект его действия.

Целью данных экспериментальных исследований является определение фактической величины потерь напряжений в арматуре вследствие ползучести автоклавного газобетона при параллельном испытании образцов-призм и преднапряженных элементов под постоянными и уменьшающимися во времени напряжениями обжатия, начальный уровень которых варьировался с 0,3 до 0,6 от призменной прочности бетона.

Эти сведения необходимы для обоснования наибольшего уровня предварительного обжатия в бетоне, достаточного для закрытия возможных технологических трещин и нейтрализации растягивающих усадочных напряжений, возникающих в поверхностных слоях газобетонных стеновых панелей при влагообменных и карбонизационных процессах, а также для оценки потерь напряжений в арматуре на основе существующих теорий ползучести бетона.

Длительным испытаниям подвергали 18 изолированных от высыхания предварительно напряженных газобетонных элементов размером 120×150×1200 мм с отверстиями по геометрическому центру диаметром 16 мм, а также три образца-близнеца (без преднапряжения) с такими же размерами для контроля температурных деформаций.

Предварительное напряжение создавали одним стержнем диаметром 12 мм из стали класса А600 (А-IV) с модулем упругости $E_s = 1{,}9 \cdot 10^5$ МПа и пределом текучести при растяжении $\sigma_т = 590$ МПа.

Усилие натяжения арматуры передавали на бетон через стальные пластины, динамометр и резьбовую муфту, при помощи которой выбирался зазор от удлинения арматуры при натяжении. Величину усилия, действующего в арматуре, контролировали по шкале индикатора часового типа с ценой деления 0,001 мм, установленного на специально изготовленном и оттарированном на заводском прессе динамометре. На одном из торцов преднапрягаемых газобетонных элементов для захвата арматуры при ее натяжении применялись цанговые зажимы типа НИИЖБ.

Исследования проводили на автоклавном газобетоне плотностью 600 кг/м^3 с призменной прочностью $R_{b,n}$ = 3, МПа и модулем упругости $E_{b,n}$ = 2100 МПа. Начальный уровень обжатия бетона в предварительно напряженных элементах составлял 0,3; 0,45 и 0,6 $R_{b,n}$, что соответствовало первоначальным контролируемым величинам предварительного напряжения, в арматурных стержнях равным: 175, 260 и 350 МПа.

На рис. 1 показан общий вид испытуемых преднапряженных элементов с приспособлениями и измерительными приборами для создания натяжения в арматуре и контроля в ней соответствующих напряжений, а также для замера длительных деформаций в бетоне. Потери напряжений в арматуре и ползучесть бетона в преднапряженных элементах при каждом уровне обжатия определялись по результатам испытания шести образцов-близнецов.

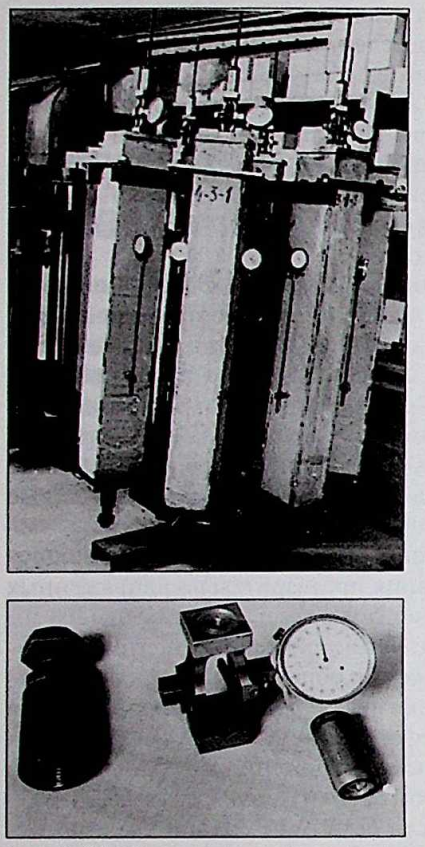


Рис. 1. Общий вид предварительно напряженных элементов из газобетона во время длительных испытаний на этажерках-вертушках

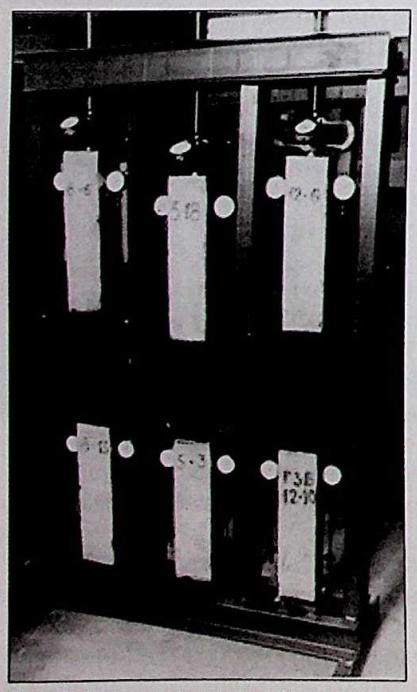


Рис. 2. Кассетно-пружинные установки для исследования ползучести в газобетонных образцах-призмах

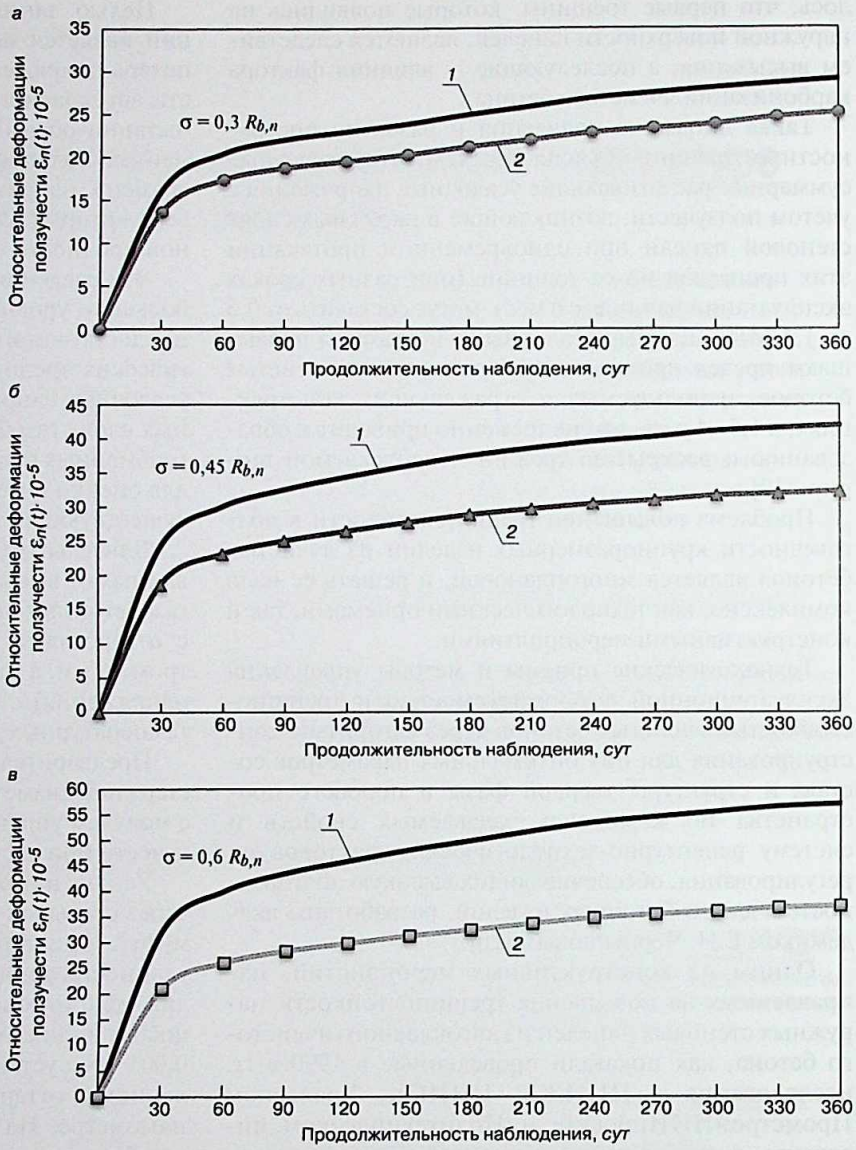


Рис. 3. Ползучесть газобетона в предварительно напряженных элементах и в образцах-призмах: *а, б, в* – начальный уровень обжатия бетона 0,3; 0,45; 0,6 $R_{b,n}$ соответственно; *1* – ползучесть образцов-призм; *2* – ползучесть преднапряженных элементов

Рис. 4. Зависимость потерь напряжений в арматуре от начального уровня обжатия в бетоне за равные промежутки времени наблюдения

Для изучения деформаций ползучести данного газобетона при тех же начальных уровнях обжатия в бетоне, но при постоянной сжимающей нагрузке проводились длительные испытания 18 образцов-призм размером 100×100×400 мм (по шесть образцов на каждый уровень обжатия).

Наряду с загруженными призмами велись также наблюдения за тремя незагруженными образцами-эталонами для исключения деформаций, вызванных колебанием температуры в помещении.

При статических расчетах элементов ячеисто-бетонных конструкций используются нормативные и расчетные характеристики автоклавных ячеистых бетонов для состояния средней установившейся влажности бетона, равной 10 мас. %. Поэтому исследования для определения потерь напряжения в арматуре от фактора ползучести газобетона нами проводились на гидроизолированных липкой пленкой и парафином преднапряженных элементах и образцах-призмах при данной влажности в бетоне.

В целях обеспечения чистоты эксперимента влияние ползучести арматуры на потери напряжений устраняли путем предварительной ее вытяжки до напряжений, равных 0,9 от нормативного предела прочности.

Деформации ползучести газобетона в предварительно напряженных элементах (рис. 1) измеряли индикаторами часового типа с ценой деления 0,01 мм, установленными стационарно по двум противоположным граням на базе 350 мм, а на образцах-призмах, используемых в опытах на простую ползучесть,– на базе 200 мм (рис. 2).

На рис. 3 приведены кривые относительных деформаций ползучести газобетона, построенные по средним показаниям родственных групп преднапряженных элементов и образцов-призм при разных начальных уровнях напряжений в бетоне.

Как следует из рис. 3, процесс ползучести газобетона в преднапряженных элементах при переменном напряжении в арматуре качественно сходен с соответствующим процессом ползучести бетона на образцах-призмах при длительном действии постоянных напряжений. Однако за счет снижения во времени усилия в напрягаемой арматуре скорость длительного деформирования бетона в них уменьшается в более ранние сроки, чем в бетонных призмах. При этом деформации ползучести газобетона к сроку наблюдения 360 сут в исследованных предварительно напряженных элементах при уровне напряжения обжатия бетона 0,3; 0,45 и 0,6 $R_{b,n}$ составили соответственно 85, 76 и 65% от деформаций ползучести бетона на призмах при постоянных сжимающих напряжениях.

По данным результатов экспериментов, потери напряжений в арматуре определяли по формуле:

$$\sigma_{sp}(t) = \sigma_{01} - \sigma_{02}(t), \qquad (1)$$

где $\sigma_{sp}(t)$ – потери предварительного напряжения в арматуре к моменту наблюдения t; σ_{01} – напряжение в арматуре до обжатия бетона; $\sigma_{02}(t)$ – напряжение в арматуре в момент времени t с учетом текущих потерь от ползучести бетона:

$$\sigma_{02}(t) = \frac{\sigma_{01} - \varepsilon_s(t)E_s}{1 - \mu_н n_t}, \qquad (2)$$

где $\varepsilon_s(t)$ – деформация арматуры от ползучести бетона;

$$\mu_н = \frac{F_s}{F_b + nF_s}; \; n_t = \frac{E_s}{E_b(t)},$$

где F_s и F_b – площадь поперечного сечения арматуры и бетона соответственно; E_s, $E_b(t)$ – модули упругости арматуры и бетона. При этом значение начального модуля упругости газобетона принимается постоянным во времени.

Параллельно величину потерь преднапряжения в арматуре от ползучести бетона контролировали также по шкале индикатора часового типа с ценой деления 0,001 мм, установленного на специально изготовленном и оттарированном динамометре (рис. 1). Следует отметить, что потери, вычисленные по формулам (1) и (2), отличались от значений, зафиксированных с помощью динамометра, в пределах от 5 до 10% в зависимости от уровня предварительного натяжения в арматуре.

Полученные опытные данные (рис. 4) свидетельствуют о том, что потери предварительного напряжения в арматуре линейно зависят от начального уровня обжатия в газобетоне в пределах от 0,3 до 0,6 от его призменной прочности.

Однако, в начальный период наблюдения за потерями напряжений в арматуре в предварительно напряженных газобетонных элементах (в пределах сроков испытания до 30–45 сут) при уровне обжатия в бетоне, соответствующего 0,6 $R_{b,n}$, проявляется некоторая нелинейная зависимость. В дальнейшем

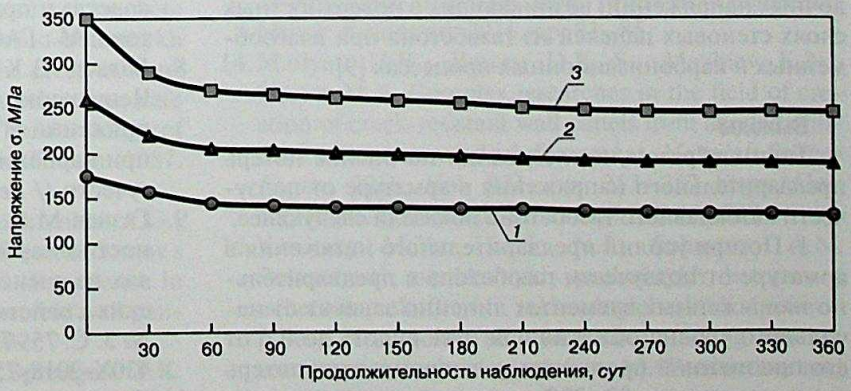


Рис. 5. Кривые релаксации напряжений в арматуре при разных уровнях обжатия бетона в преднапряженных газобетонных элементах: *1* – при 0,3 $R_{b,n}$; *2* – при 0,45 $R_{b,n}$; *3* – при 0,6 $R_{b,n}$

из-за большего падения усилия в напрягаемой арматуре при данном уровне обжатия в газобетоне происходит снижение величины напряжения и в самом бетоне, что, безусловно, приводит к переходу нелинейной зависимости в линейную.

Анализ полученных результатов позволяет рекомендовать в качестве наибольшего уровень предварительного обжатия в бетоне для преднапряженных элементов из газобетона равным 0,6 $R_{b,n}$, который также соответствует границе линейной ползучести для автоклавных ячеистых бетонов [15].

Потери предварительного натяжения в арматуре, связанные с быстро натекающими деформациями ползучести бетона при передаче усилия на газобетонные элементы автоклавного твердения, были столь маленькими, что практически ими можно пренебречь.

Для более наглядного представления о характере развития и величине падения напряжения в арматуре от ползучести газобетона в преднапряженных элементах на рис. 5 построены зависимости релаксирующего напряжения в арматуре от времени при разных начальных уровнях обжатия в бетоне.

Опытные данные показывают, что процесс релаксации напряжений в напрягаемой арматуре, независимо от длительности наблюдения и от величины первоначального уровня напряжения в ней и в бетоне, протекает примерно с одинаковой скоростью. При этом величины относительных потерь преднапряжения в арматуре, натекающие за равные промежутки времени, отличаются друг от друга в пределах от 4 до 8%.

На основе экспериментальных исследований получено, что возможные потери напряжений в арматуре для преднапряженных элементов из автоклавного газобетона вследствие его ползучести, происходящие в них в течение 360 сут при начальном уровне обжатия в бетоне от 0,3 до 0,6 $R_{b,n}$, составляют 22–30%.

При этом абсолютные величины остаточных напряжений в напрягаемой арматуре были равными 136, 188 и 245 МПа, чем обеспечивается уровень обжатия в бетоне соответственно 0,85; 1,18 и 1,54 МПа, достаточный для нейтрализации растягивающих усадочных напряжений, возникающих в поверхностных слоях стеновых панелей из газобетона при влагообменных и карбонизационных процессах [9].

Выводы

Таким образом, исследования по оценке потерь предварительного напряжения в арматуре от ползучести автоклавного газобетона показали следующее.

1. Потери усилий предварительного натяжения в арматуре от ползучести газобетона в предварительно напряженных элементах линейно зависят от начального уровня обжатия в бетоне вплоть до 0,6 от его призменной прочности, а величина этих потерь может составить 22–30% от первоначальных значений.

2. Абсолютная величина остаточных напряжений в арматуре обеспечивает уровень обжатия в газобетоне в пределах от 0,85 до 1,54 МПа, достаточный для закрытия возможных технологических трещин, а также для исключения появления в условиях эксплуатации новых трещин в наружных стеновых панелях при влажностно-карбонизационных воздействиях.

3. Полученные экспериментальные данные, в которых наряду с исследованием потерь предварительного напряжения изучались и реологические свойства газобетона, позволяют разработать методы расчета потерь напряжений в арматуре от ползучести бетона в крупноразмерных газобетонных изделиях с преднапряженным армированием.

Список литературы

1. Силаенков Е.С. Долговечность изделий из ячеистых бетонов. М.: Стройиздат, 1986. 176 с.
2. Силаенков Е.С., Батаев Д.К-С., Мажиев Х.Н., Газиев М.А. Повышение долговечности конструкций и изделий из мелкозернистых ячеистых бетонов при эксплуатационных воздействиях. Грозный, 2015. 355 с.
3. Силаенков Е.С., Кантор С.Л., Газиев М.А. Учет ползучести бетона вследствие карбонизации при расчете напряженного состояния ячеисто-бетонных стеновых панелей. Долговечность конструкций из автоклавных бетонов. Таллин, 1987. Ч. I. С. 160–163.
4. Пинскер В.А., Соловей Ж.Б., Почтенко А.Г., Кесли Э.О., Чуркина В.А. Опыт эксплуатации домов с ячеисто-бетонными ограждениями. Таллин, 1984. Ч. II. С. 190–192.
5. Тимаков Ю.В., Безбородов В.А., Шпренгерт Т.К. Натурные обследования наружных стен здания из газобетона. Таллин, 1984. Ч. II. С. 193–198.
6. Чернышов Е.М., Власов В.В., Баутина Е.И. Прогнозирование полного и остаточного ресурсов ограждающих конструкций из ячеистого бетона. Ростов н/Д: Рост. гос. строит. ун-т, 2007. 194 с.
7. Федин А.А. Научно-технические основы производства и применения силикатного ячеистого бетона. М.: ГАСИС, 2002. 264 с.
8. Батаев Д.К-С., Газиев М.А., Пинскер В.А., Чепурненко А.С. Теория расчета усадочных напряжений в ячеисто-бетонных стеновых панелях при карбонизационных процессах с учетом ползучести // *Вестник МГСУ*. 2016. № 12. С. 11–22.
9. Газиев М.А. Эмпирический метод расчета влажностно-карбонизационных напряжений в панелях из ячеистого бетона с учетом его реологических свойств // *Строительные материалы*. 2018. № 3. С. 75–79. DOI: https://doi.org/10.31659/0585-430X-2018-757-3-75-79
10. Чернышов Е.М., Славчева Г.С. Управление эксплуатационной деформируемостью и тре-

щиностойкостью макропористых (ячеистых) бетонов. Часть I. Контекст проблемы и вопросы теории // *Строительные материалы*. 2014. № 1. С. 105–112.
11. Фурманов Б.А., Нудель В.С., Куршпель В.Х. Заводское изготовление преднапряженных газозолобетонных панелей // *Бетон и железобетон*. 1984. № 6. С. 14–16.
12. Куршпель В.Х., Макаричев В.В., Филиппов Б.П. Стеновые панели из ячеистого бетона с комбинированным армированием // *Бетон и железобетон*. 1986. № 12. С. 7–8.
13. Батаев Д.К-С., Газиев М.А., Пинскер В.А. Опыт исследования и внедрения преднапряженных стеновых панелей из автоклавных ячеистых бетонов. *Опыт производства и применения ячеистого бетона автоклавного твердения: Материалы 9-й Международной научно-практической конференции*. Минск: Колоград, 2016. С. 83–85.
14. Mailyan D.R., Bataev D.K.-S., Mazhiev K.N., Gaziev M.A. Complex researches in the field of creation of crack-resistant wall panels from cellular concrete with prestressed reinforcement. *Materials Science Forum*. 2018. Vol. 931, pp. 252–257 https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.931.252
15. Кривицкий М.Я., Левин Н.И., Счастный А.Н. Ползучесть автоклавных ячеистых бетонов с учетом некоторых технологических факторов / Производство и применение изделий из ячеистых бетонов. М.: Стройиздат,1968. С. 105–120.

References

1. Silaenkov E.S. Dolgovechnost' izdelii iz yacheistykh betonov [longevity of products from aerated concrete]. Moskov: Stroyizdat. 1986. 176 p.
2. Silaenkov E.S., Bataev D.K-S., Madziev H.N., Gaziev M.A. Povyshenie dolgovechnosti konstruktsii i izdelii iz melkozernistykh yacheistykh betonov pri ekspluatatsionnykh vozdeistviyakh [Increase of durability of building structures made from fine-grained concrete under operational impacts]. Grozny, 2015. 355 p.
3. Silaenkov E.S., Kantor S.L., Gaziev M.A. Uchet polzuchesti betona vsledstvie karbonizatsii pri raschete napryazhennogo sostoyaniya yacheisto-betonnykh stenovykh panelei [Accounting for the creep of concrete due to carbonization at calculating the stress state of aerated concrete wall panels]. The durability of structures from autoclaved concretes. Tallinn. 1987. Part I, pp. 160–163.
4. Pinsker V.A., Solovey Zh.B., Pochtenko A.G., Kesli E.O., Churkina V.A. Opyt ekspluatatsii domov s yacheisto-betonnymi ograzhdeniyami [Experience in the operation of houses of aerated concrete wall panels]. Tallinn. 1984. Part II, pp. 190–192.
5. Timakov U.V., Bezborodov V.A., Sprengert T.K. Naturnye obsledovaniya naruzhnykh sten zdaniya iz gazobetona [Field surveys of the exterior walls of the building are made of aerated concrete]. Tallinn. 1984. Part II, pp. 193–198.
6. Chernyshov E.M., Vlasov V.V., Bautina E.I. Prognozirovanie polnogo i ostatochnogo resursov ograzhdayushchikh konstruktsii iz yacheistogo betona [Prediction of the total and residual resources of wall panels made of aerated concrete]. Rostov-on-Don: Rostov state building Universities. 2007. 194 p.
7. Fedin A.A. Nauchno-tekhnicheskie osnovy proizvodstva i primeneniya silikatnogo yacheistogo betona [Scientific and technical bases of production and application of silicate aerated concrete]. Moscow: GASIS. 2002. 264 p.
8. Bataev D.K.-S., Gaziev M.A., Pinsker V.A., Chepurnenko A. S., The theory of shrinkage stress calculation in aerated concrete wall panels under carbonizing processes taking into account creep. *Vestnik MGSU*. 2016. No. 12, pp. 11–22. (In Russian).
9. Gaziev M.A. An empirical method for calculating wetness-carbonization stresses emerges in panels of aerated concrete, with considering its rheological properties. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2018. No. 3, pp. 75–79. (In Russian). DOI: https://doi.org/10.31659/0585-430X-2018-757-3-75-79.
10. Chernyshov E.M., Slavcheva G.S. Management of operational deformation and crack resistance of macro-porous (aerated) concrete. Part 1. The Context of the problem and theory questions. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2014. No. 1, pp. 105–112. (In Russian).
11. Furmanov B.A., Nudel V.S., Kurshpel V.Kh. Factory production of prestressed aerated ash concrete panels. *Beton i zhelezobeton*. 1984. No. 6, pp. 14–16. (In Russian).
12. Kurshpel V.Kh., Makarichev V.V., Filippov B.P. Wall panels of aerated concrete with a combined reinforcement. *Beton i zhelezobeton*. 1986. No. 12, pp. 7–8. (In Russian).
13. Bataev D.K.-S., Gaziev M.A., Pinsker V.A. Experience of research and implementation of prestressed wall panels made of autoclave cellular concrete. *Experience of production and use of cellular concrete of autoclave curing: Materials of the 9th International Scientific and Practical Conference*. Minsk: Kolorgrad. 2016. pp. 83–85.
14. Mailyan D.R., Bataev D.K.-S., Mazhiev K.N., Gaziev M.A. Complex researches in the field of creation of crack-resistant wall panels from aerated concrete with prestressed reinforcement. *Materials Science Forum*. 2018. Vol. 931, pp. 252–257 https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.931.252
15. Krivitsky M.Ya., Levin N.I., Schastnyy A.N. Polzuchest' avtoklavnykh yacheistykh betonov s uchetom nekotorykh tekhnologicheskikh faktorov [Creep of autoclave aerated concrete taking into account some technological factors]. Production and application of products from cellular concrete. Moscow: Stroyizdat. 1968, pp. 105–120.

УДК 691.328.4
DOI: https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-770-5-38-44

А.Л. ПОПОВ, инженер (surrukin@gmail.com), В.В. СТРОКОВА, д-р техн. наук (vvstrokova@gmail.com)
Белгородский государственный технический университет им. В.Г. Шухова (308012, Белгород, ул. Костюкова, 46)

Фибропенобетон автоклавного твердения с использованием композиционного вяжущего

Теоретически обоснована и экспериментально подтверждена возможность использования композиционного вяжущего и фибры для улучшения физико-механических характеристик пенобетона автоклавного твердения. Показано, что замена портландцемента в составе пенобетона композиционным вяжущим ТМЦ-70 позволяет повысить его прочность на 35%. Модифицированная базальтовая фибра в процессе автоклавирования выступает в качестве активной подложки для кристаллизации продуктов гидратации клинкерных минералов, препятствует коррозии фибры компонентами цементного камня, приводит к повышению ее адгезии к матрице сцементированного вещества, что в совокупности с композиционным вяжущим ТМЦ–70 позволяет повысить класс прочности по сравнению с контрольным составом пенобетона с В1,5 до В2,5. Также дисперсное армирование пенобетона способствует уменьшению среднего размера пор в матрице пенобетона с сохранением средней плотности, что улучшает теплоизоляционные характеристики пенобетона, снижая его теплопроводность. Таким образом, проведена многокритериальная оптимизация и установлены рациональные границы варьирования рецептурно-технологических факторов для получения пенобетона автоклавного твердения.

Ключевые слова: автоклавный пенобетон, композиционное вяжущее, фибра.

Для цитирования: Попов А.Л., Строкова В.В. Фибропенобетон автоклавного твердения с использованием композиционного вяжущего // *Строительные материалы*. 2019. № 5. С. 38–44. DOI: https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-770-5-38-44

A.L. POPOV, Engineer (surrukin@gmail.com), V.V. STROKOVA, Doctor of Sciences (Engineering) (vvstrokova@gmail.com)
Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (46, Kostyukova Street, Belgorod, 308012, Russian Federation)

Fiber Foam Concrete of Autoclave Hardening with the Use of Composite Binder

The possibility of using a composite binder and fiber to improve the physical and mechanical characteristics of autoclaved foam concrete is theoretically justified and experimentally confirmed. It is shown that the replacement of Portland cement in the foam concrete with binder composite TMTS-70 can increase its strength by 35%. Modified basalt fiber in the process of autoclaving acts as an active substrate for crystallization of hydration products of clinker minerals, prevents corrosion of fiber components of cement stone, leads to an increase in its adhesion to the matrix of the cemented substance, which together with composite binder TMTS-70 makes it possible to increase the strength class in comparison with the control composition of foam concrete from B1,5 to B2,5. Also, dispersed reinforcement of foam concrete helps to reduce the average pore size in the foam concrete matrix, while maintaining the average density, which improves the thermal insulation characteristics of foam concrete, reducing its thermal conductivity. Thus, multi-criteria optimization is carried out and rational limits of variation of prescription-technological factors for the production of autoclaved foam concrete are established.

Keywords: autoclaved concrete, composite binder, fiber.

For citation: Popov A.L., V.V. Strokova. Fiber foam concrete of autoclave hardening with the use of composite binder. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2019. No. 5, pp. 38–44. (In Russian). DOI: https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-770-5-38-44

Автоклавный ячеистый бетон в настоящее время является одним из высоковостребованных строительных материалов. Наряду с эффективными технико-эксплуатационными характеристиками, заключающимися в показателях прочности и теплопроводности, материалы автоклавного твердения имеют ряд технологических преимуществ – низкую металлоемкость производства и возможность создания высокопроизводительной линии. Помимо этого, автоклавная технология позволяет наиболее эффективно применять осадочные горные породы, которые характеризуются сравнительно легкими условиями добычи и обработки [1–6].

Проведенными исследованиями [7, 8] была доказана эффективность использования композиционного вяжущего на основе кварц-полевошпатового песка Ленского бассейна в технологии автоклавного твердения. Тонкомолотое многокомпонентное вяжущее, в состав которого входит кремнеземистый компонент алюмосиликатного состава, обладает высокой прочностью при сжатии при гидротермальных условия твердения в отличие от чистого цемента, что делает возможным создание материалов автоклавного твердения с пониженным расходом цемента и улучшенными физико-механическими характеристиками. Также остается открытым вопрос влияния дисперсного армирования в системах гидротермального твердения. Так, согласно исследованиям [9–11] в ячеистых бетонах показатель теплопроводности можно улучшить введением дисперсной фибры, стабилизируя таким образом пористую матрицу пенобетона и предотвращая коалесценцию пор. Представляется актуальным изучение влияния дисперсного армирования на физико-механические характеристики пенобетона автоклавного твердения.

В этой связи следующим этапом работы стало изучение влияния композиционного вяжущего и дисперсного армирования на свойства пенобетонов автоклавного твердения. Для этого проводили разработку составов пенобетона автоклавного твердения на основе следующих компонентов:

Таблица 1

Заводской состав автоклавного пенобетона D500

Состав, на 1 м³	Цемент, кг	190
	Известь, кг	40
	Полевошпатовый песок, кг	290
	Пенообразователь, л	2
	Вода, л	200
Свойства	Марка по плотности	D500
	Предел прочности при сжатии после автоклавирования, МПа	1,9
	Класс по прочности	В1,5
	Теплопроводность, Вт/(м·°С)	0,117

– кварц-полевошпатовый песок Ленского бассейна со сложным полиминеральным составом, мас. %: кварц – 29,84; альбит – 17,48; микроклин – 4,71; иллит – 2,46; биотит – 1,06; роговая обманка – 2,59; гисмондин – 1,08; рентгеноаморфная фаза – 40,78;

– композиционное вяжущее ТМЦ–70 на основе цемента ЦЕМ I 32,5Н производства АО «Якутцемент» (г. Якутск) и вышеназванного кварц-полевошпатового песка, характеризующееся активностью 52,5 МПа согласно ГОСТ 310.4–81;

– известь производства ОАО «Химико-металлургический завод» г. Красноярска с массовой долей активных CaO+MgO не менее 80% согласно ГОСТ 9179–77;

– протеиновый (белковый) пенообразователь «FoamX» производства ООО «М-Альянс» (совместное производство Италия–Россия) в качестве пеноагента;

– два вида минеральной фибры – базальтовое волокно производства ООО «Каменный век» (Московская область, г. Дубна), термообработанное по авторской методике [12, 13], и стеклянное волокно производства Taishan fiberglass inc. China (Китай).

Проектирование состава пенобетона проводили, взяв за основу готовый стандартный состав автоклавного пенобетона производства ООО «Стройкомпозит» (г. Якутск) для пеноблоков плотностью D500 (табл. 1), на основе которого получают изделия с прочностью 1,9 МПа после автоклавирования.

В лабораторных условиях было приготовлено четыре предварительных состава (табл. 2):

1. Контрольный: заводской состав автоклавного пенобетона D500.
2. Заводской состав автоклавного пенобетона D500 с заменой портландцемента разработанным вяжущим ТМЦ–70.
3. Заводской состав автоклавного пенобетона D500 с добавкой базальтовой фибры.
4. Заводской состав автоклавного пенобетона D500 с добавкой стеклянной фибры.

Физико-механические свойства разработанных составов пенобетона, прошедших автоклавную обработку, показали (табл. 3), что замена портландцемента марки ЦЕМ I 32,5 Н вяжущим ТМЦ–70 улучшает прочность при сжатии на 35%, теплопроводность при этом остается в пределах погрешности. При введении в контрольный состав фибры в количестве 0,1% от массы сухой смеси прочность для состава с базальтовой фиброй повышается на 5%, а со стеклянной – остается в пределах погрешности, зато улучшается показатель теплопроводности на 7 и 10% для стеклянной и базальтовой соответственно.

Снижение показателя теплопроводности обосновывается тем, что дисперсное армирование пенобетона способствует уменьшению среднего размера пор в матрице с сохранением средней плотности. Как известно, теплоизоляционной фазой в пенобетоне является наименее теплопроводная газовая фаза – воздух. Теплопроводность же воздуха будет меняться в зависимости от размера пор, причем чем меньше пора, тем меньше теплопроводность [11, 12].

Таблица 2

Предварительные составы пенобетона D500 на 1 м³

№ п/п	Вяжущее		Известь, кг	Песок, кг	Фибра		Пенообразователь, л	Вода, л
	Вид	Количество, кг			Вид	Количество, % от массы сухой смеси		
Контрольный	ЦЕМ I 32,5 Н	190	40	290	–	–	2	200
1	ТМЦ–70				–	–	2	210
2	ЦЕМ I 32,5 Н				Стеклянная	0,1	2,3	210
3	ЦЕМ I 32,5 Н				Базальтовая	0,1	2,3	210

Таблица 3

Физико-механические свойства предварительных составов пенобетона D500

№ п/п	Предел прочности при сжатии, МПа	Плотность, кг/м³	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°С)
Контрольный	1,91	512	0,110
1	2,56	502	0,112
2	1,92	507	0,102
3	2,06	516	0,098

Таблица 4

Условия планирования эксперимента для разработки составов пенобетона

Факторы		Уровни варьирования			Интервал варьирования
Натуральный вид	Кодированный вид	–1	0	+1	
Соотношение цемента к извести (ТМЦ–70), кг	x_1	1:1 (118)	1:2 (157)	1:4 (188,5)	–
Фибра, % от массы сухой смеси	x_2	0,05	0,1	0,15	0,05

Таблица 5

Расчет соотношений известь:цемент для математического планирования

Соотношение известь:цемент	Содержание извести	Содержание вяжущего, кг	
		цемента в вяжущем	вяжущего в общем
1:4	33	132	188,5
1:2	55	110	157
1:1	82,5	82,5	118

Для разработки рациональных составов использовано математическое планирование эксперимента на основе анализа прочности при сжатии и коэффициента теплопроводности автоклавированых образцов. Было проведено двухфакторное планирование, в качестве варьируемых параметров выступали количество фибры и соотношение портландцемента в вяжущем ТМЦ–70 к извести в составе (табл. 4). Для корректного отображения применяемых соотношений известь:цемент – 1:4, 1:2, 1:1 как уровней варьирования в матрице они были заменены на количественные расходы вяжущего ТМЦ–70 (табл. 5). При этом соблюдается общее количество вяжущих компонентов: портландцемент+известь = 165 кг.

Содержание фибры варьировалось в минимальных концентрациях 0,05; 0,1; 0,15% от массы сухой смеси с шагом варьирования 0,05%. Такая дозировка связана с тем, что при добавлении фибры от 0,2% от массы сухой смеси она заметно загущает систему, повышая водотвердое отношение пеносмеси и снижая стойкость пенных систем.

Таблица 6

Матрица планирования

№ точки плана	Факторы			
	x_1	x_2	Вяжущее ТМЦ–70	Фибра
1	–1	+1	118	0,15
2	0	+1	157	0,15
3	+1	+1	188,5	0,15
4	–1	0	118	0,1
5	0	0	157	0,1
6	+1	0	188,5	0,1
7	–1	–1	118	0,05
8	0	–1	157	0,05
9	+1	–1	188,5	0,05

Так как в работе исследуется два вида фибры, было проведено два эксперимента с одной матрицей планирования для определения степени влияния вида фибры на физико-механические свойства автоклавного пенобетона (табл. 6). Согласно матрице планирования были составлены соответствующие составы (табл. 7), заформованы и автоклавированы образцы пенобетона и испытаны их основные физико-механические характеристики (табл. 8 и 9).

На основе экспериментальных данных получены уравнения регрессии и построены номограммы зависимости прочности при сжатии и коэффициента теплопроводности.

Уравнение регрессии в случае стеклянной фибры для предела прочности при сжатии имеет следующий вид:

Таблица 7

Составы пенобетона согласно матрице планирования, кг/м^3

№ точки плана	Вяжущее ТМЦ–70	Состав вяжущего		Известь	Песок	Фибра	Пенообразователь	Вода
		Цемент	Кремнеземистый компонент					
Контрольный	–	190	–	40	290	0,50	2	200
1	118	82,5	35,5	82,5	319,5	0,75	2,3	210
2	157	110	47	55	306	0,75	2,3	210
3	188,5	132	56	33	298,5	0,75	2,3	210
4	118	82,5	35,5	82,5	319,5	0,5	2,3	210
5	157	110	47	55	306	0,5	2,3	210
6	188,5	132	56	33	298,5	0,5	2,3	210
7	118	82,5	35,5	82,5	319,5	0,25	2,3	210
8	157	110	47	55	306	0,25	2,3	210
9	188,5	132	56	33	298,5	0,25	2,3	210

Таблица 8

Физико-механические свойства пенобетона с использованием стеклянной фибры

№ точки плана	Предел прочности при сжатии, МПа	Плотность, кг/м^3	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°С)
Контрольный	1,91	512	0,11
1	1,82	502	0,085
2	2,44	520	0,097
3	2,42	511	0,091
4	1,77	509	0,082
5	2,4	527	0,111
6	2,52	526	0,107
7	1,72	513	0,088
8	2,33	515	0,102
9	2,4	520	0,102

Таблица 9

Физико-механические свойства пенобетона с использованием базальтовой фибры

№ точки плана	Предел прочности при сжатии, МПа	Плотность, кг/м^3	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°С)
Контрольный	1,91	512	0,110
1	2,11	507	0,082
2	2,66	526	0,090
3	2,93	524	0,106
4	1,94	525	0,101
5	2,54	512	0,091
6	2,79	502	0,096
7	1,77	504	0,087
8	2,38	512	0,102
9	2,61	525	0,106

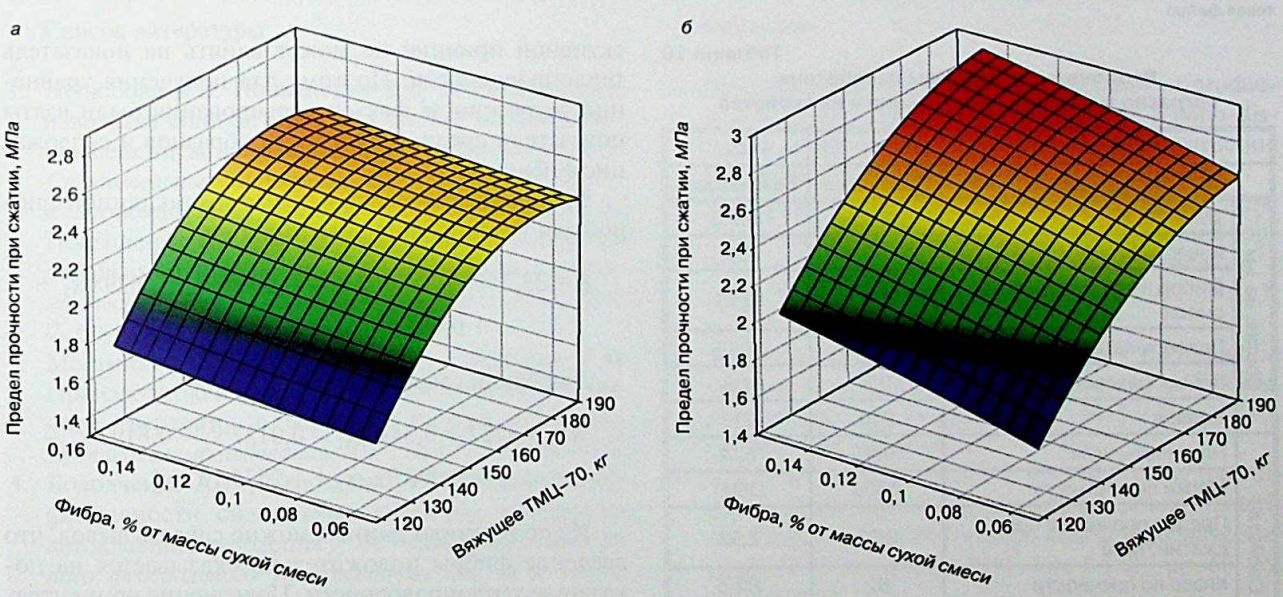


Рис. 1. Зависимости предела прочности при сжатии пенобетона от расхода вяжущего и содержания минерального волокна: *а* – стеклянная фибра; *б* – базальтовая фибра

$$R = -3{,}8493 + 0{,}0706 \cdot x_1 - 0{,}0033 \cdot x_2 - 0{,}0002 \cdot x_1^2 + 0{,}0028 \cdot x_1 \cdot x_2 + 3{,}33 \cdot x_2^2.$$

Для базальтовой фибры:

$$R = -2{,}1116 + 0{,}0431 \cdot x_1 + 4{,}7141 \cdot x_2 - 0{,}0001 \cdot x_1^2 - 0{,}0033 \cdot x_1 \cdot x_2 - 5{,}33 \cdot x_2^2.$$

По полученным уравнениям регрессии построены номограммы зависимостей прочности при сжатии и коэффициента теплопроводности в случае с базальтовой и стеклянной фиброй (рис. 1, 2).

Согласно полученным данным, максимальные прочности при сжатии пенобетона достигаются с применением базальтовой фибры (рис. 1, *б*). Анализ прочностных свойств показывает, что при минимальном количестве базальтовой фибры 0,1% от массы сухой смеси в системе предел прочности при сжатии на 28-е сут составляет 2,4–2,5 МПа, что идентично и для пенобетона с применением стеклянной фибры (рис. 1, *а*). Однако в случае с базальтовой фиброй небольшое увеличение ее концентрации способствует росту прочности образцов. Так, при концентрации фибры 0,15% от массы вяжущего прочность образцов растет до 2,6–2,9 МПа (рис. 1, *б*). Это говорит о том, что базальтовая фибра участвует в процессах набора прочности пенобетона, так как растворенные алюмосиликатные фазы достаточно активно вступают в кислотно-основном взаимодействии при гидратации.

При увеличении концентрации стеклянной фибры рост величины прочности не наблюдается, присутствует некоторая тенденция на увеличение проч-

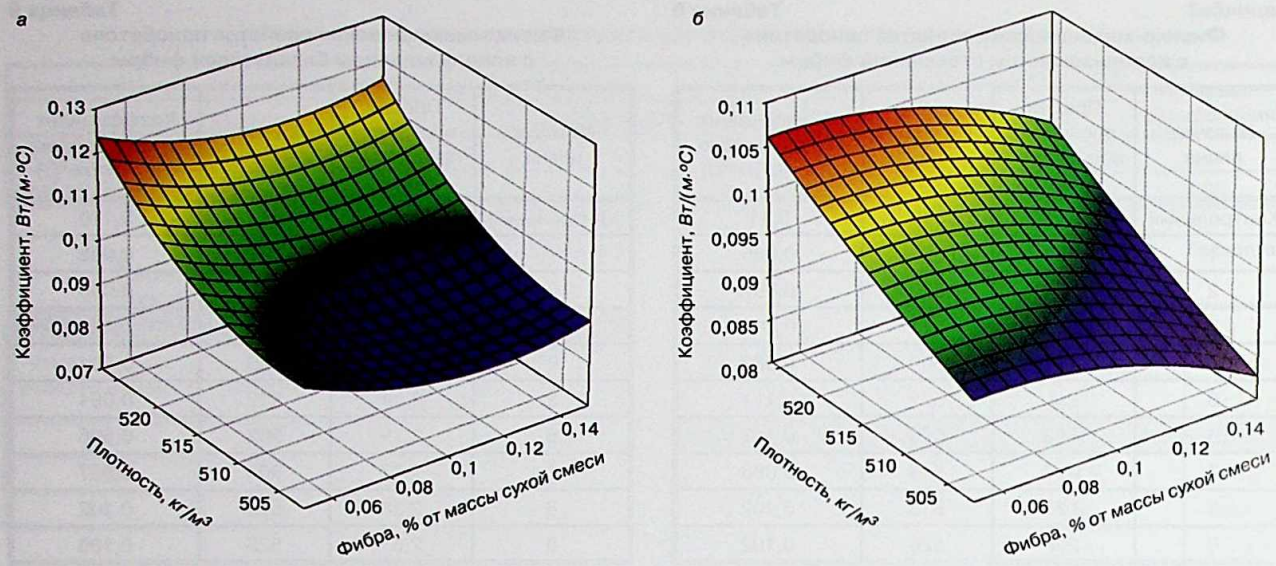


Рис. 2. Зависимости теплопроводности пенобетона от расхода вяжущего и содержания минерального волокна: *а* – стеклянная фибра; *б* – базальтовая фибра

Таблица 10

Рациональные составы пенобетона согласно матрице планирования и их свойства

	№ образца	6	3
	Вид фибры	Стеклянная	Базальтовая
Состав, на 1 м³	ТМЦ–70, кг	185,5	185,5
	Известь, кг	33	33
	Фибра, % от массы сухой смеси	0,1	0,15
	Полевошпатовый песок, кг	298,5	298,5
	Пенообразователь, л	2,3	2,3
	Вода, л	210	210
Свойства	Плотность, кг/м³	526	524
	Марка по плотности	D500	D500
	Предел прочности при сжатии, МПа	2,52	2,93
	Класс по прочности	В2	В2,5
	Теплопроводность, Вт/(м·°С)	0,107	0,106

ности в пределах 0,1 МПа, которую, однако, можно списать на погрешность (рис. 1, *а*).

При всем вышеизложенном вяжущее ТМЦ–70 является основным носителем прочности. При содержании ТМЦ–70 – 118 кг/1 м³ пенобетона образцы обладают довольно низкой прочностью – 1,8 МПа; при 157 кг, как и при 188,5 кг/1 м³, она составляет 2,6 МПа, что является максимумом при минимальной концентрации фибры. Однако, как было отмечено ранее, при добавлении базальтовой фибры от 0,15% от массы вяжущего увеличивается прочность и достигает максимума в 2,9 МПа.

Математическое планирование проводилось с двумя выходными параметрами: прочностью и теплопроводностью. Однако фактор варьирования – соотношения вяжущих ТМЦ–70 и извести – по объективной причине не может влиять на показатель теплопроводности. Поэтому для получения уравнений регрессии за фактор варьирования были взяты показатели средней плотности образцов и содержание фибры.

Уравнение регрессии в случае со стеклянной фиброй для теплопроводности имеет вид:

$$R = 23{,}2506 - 2{,}5652 \cdot x_1 - 0{,}0906 \cdot x_2 + 2{,}6298 \cdot x_1^2 + 0{,}0038 \cdot x_1 \cdot x_2 + 8{,}8664 \cdot 10^{-5} \cdot x_2^2.$$

Для базальтовой фибры:

$$R = 3{,}3222 + 0{,}3414 \cdot x_1 - 0{,}0127 \cdot x_2 - 0{,}8192 \cdot x_1^2 - 0{,}0005 \cdot x_1 \cdot x_2 + 1{,}2575 \cdot 10^{-5} \cdot x_2^2.$$

Из полученных данных можно сделать вывод, что введение фибры положительно сказывается на показателе теплопроводности. Повышение концентрации стеклянной фибры с 0,05 до 0,15%, равно как и базальтовой, снижает теплопроводность в среднем на 5% (рис. 1). Лучший полученный показатель по теплопроводности – 0,08 Вт/(м·°С) с применением как базальтовой, так и стеклянной фибры, что на 27% ниже, чем у контрольного образца.

Снижение показателя теплопроводности обосновывается тем, что дисперсное армирование пенобетона способствует уменьшению среднего размера пор в матрице пенобетона с сохранением средней плотности. При этом воздух внутри поры, отвечающий за теплоизоляцию, обладает тем меньшей теплопроводностью, чем меньше размер поры [11, 12].

В табл. 10 отображены рациональные составы согласно матрице планирования. Данные составы по своим техническим характеристикам соответствуют ГОСТ 31359–2007 «Бетоны ячеистые автоклавного твердения. Технические условия».

Выводы

Сравнительная оценка влияния двух видов фибр – термообработанного базальтового волокна и стекловолокна – на изменение показателей предела прочности при сжатии и теплопроводности пенобетона автоклавного твердения показала, что более эффективным является термообработанное базальтовое волокно. Выступая в качестве активной подложки для кристаллизации продуктов гидратации клинкерных минералов, в процессе автоклавирования модифицированное базальтовое волокно в отличие от стеклянного покрывается сеткой из скрытокристаллических новообразований. Данная структура, с одной стороны, препятствует коррозии волокна компонентами цементного камня при эксплуатации, а с другой – приводит к повышению его адгезии к матрице сцементированного вещества и, как следствие, к прочности автоклавного пенобетона. Снижение теплопроводности при введении как стеклянной, так и базальтовой фибры обосновывается тем, что дисперсное армирование пенобетона способствует уменьшению среднего размера пор в матрице пенобетона с сохранением средней плотности. Исходя из перечисленного можно говорить, что наиболее эффективным и рациональным дисперсным волокном является термообработанная базальтовая фибра, которая в совокупности с композиционным вяжущим ТМЦ–70 позволяет повысить класс контрольного состава пенобетона с В1,5 до В2,5.

Таким образом, установлены закономерности влияния рецептурных факторов, а именно количества разработанного композиционного вяжущего и дисперсно-армирующей фибры на физико-механические характеристики пенобетона автоклавного твердения, позволяющие провести многокритериальную оптимизацию и установить рациональные границы варьирования рецептурно-технологических факторов.

Список литературы

1. Нелюбова В.В. Повышение эффективности производства силикатных автоклавных материалов с применением нанодисперсного модификатора // *Строительные материалы*. 2008. № 9. С. 89–92.
2. Сватовская Л.Б., Сычева А.М, Елисеева Н.Н. Повышение качества неавтоклавного пенобетона добавками наноразмера // *Нанотехнологии в строительстве: Научный интернет-журнал*. 2011. № 1. С. 50–62.
3. Местников А.Е., Семенов С.С., Федоров В.И. Производство и применение пенобетона автоклавного твердения в условиях Якутии // *Фундаментальные исследования*. 2015. № 12–3. С. 490–494.
4. Володченко А.Н., Строкова В.В. Повышение эффективности силикатных ячеистых материалов автоклавного твердения // *Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова*. 2017. № 2 (58). С. 60–69.
5. Кафтаева М.В., Никитин П.Н. К вопросу о выборе песков для автоклавных ячеистых бетонов в Республике Башкортостан // *Технологии бетонов*. 2012. № 1–2 (66–67). С. 12–14.
6. Строкова В.В., Череватова А.В., Нелюбова В.В. Силикатные автоклавные материалы на основе высококонцентрированной вяжущей суспензии // *Строительные материалы*. 2007. № 10. С. 10–16.
7. Попов А.Л., Строкова В.В., Нелюбова В.В. Особенности композиционного вяжущего на кварцполевошпатовом песке // *Строительство и техногенная безопасность*. 2018. № 12 (64). С. 63–70.
8. Попов А.Л., Нелюбова В.В. Особенности проектирования материалов автоклавного твердения с минеральными волокнами. *Современные проблемы строительства и жизнеобеспечения: безопасность, качество, энерго- и ресурсосбережение: Сборник статей V Всероссийской научно-практической конференции*. Якутск. 29 марта 2018. С. 155–158.

References

1. Nelyubova V.V. Improving the efficiency of production of silicate autoclave materials using a nano-dispersed modifier. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2008. No. 9, pp. 89–92. (In Russian).
2. Svatovskaya L.B., Sycheva A.M., Eliseeva N.N. Improving the quality of non-autoclaved foamed concrete with nano-size additives. *Nanotekhnologii v stroitel'stve: a scientific online journal*. 2011. No. 1, pp. 50–62. (In Russian).
3. Mestnikov AE, Semenov S.S., Fedorov V.I. Production and use of autoclaved foamed concrete in Yakutia. *Fundamental'nye issledovaniya*. 2015. No. 12–3, pp. 490–494. (In Russian).
4. Volodchenko A.N., Strokova V.V. Improving the efficiency of autoclave hardening silicate cellular materials. *Vestnik Severo-Vostochnogo federal'nogo universiteta im. M.K. Ammosova*. 2017. No. 2 (58), pp. 60–69. (In Russian).
5. Kaftaeva M.V., Nikitin P.N. On the choice of sand for autoclaved cellular concrete in the Republic of Bashkortostan. *Tekhnologii bettonov*. 2012. No. 1–2 (66–67), pp. 12–14. (In Russian).
6. Strokova V.V., Cherevatova A.V., Nelyubova V.V. Silicate autoclave materials based on highly concentrated binding cement. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2007. No. 10, pp. 10–16. (In Russian).
7. Popov A.L., Strokova V.V., Nelyubova V.V. Features of composite binder on quartz-feldspath sand. *Stroitel'stvo i tekhnogennaya bezopasnost'*. 2018. No. 12 (64), pp. 63–70. (In Russian).
8. Popov A.L., Nelyubova V.V. Features of the design of autoclaved materials with mineral fibers. *Modern problems of construction and life support: safety, quality, energy and resource saving: collection of articles of V All-Russian scientific-practical conference*. Yakutsk. March 29, 2018, pp. 155–158. (In Russian).

9. Клюев С.В., Клюев А.В., Лесовик Р.В. Оптимальное проектирование высококачественного фибробетона // *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова*. 2015. № 6. С. 119–121.
10. Алоян Р.М., Овчинников А.А., Акимов А.В. Исследование влияния кремнеземистого модификатора на минералогический состав и прочностные свойства газобетона // *Научное обозрение*. 2016. № 2. С. 6–13.
11. Овчинников А.А., Акимов А.В., Хозин Р.Р. Порометрические особенности газосиликата и их влияние на свойства ячеистого бетона // *Информационная среда вуза*. 2016. № 1 (23). С. 389–394.
12. Бабаев В.Б., Строкова В.В., Нелюбова В.В., Савгир Н.Л. К вопросу о щелочестойкости базальтовой фибры в цементной системе // *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова*. 2013. № 2. С. 63–66.
13. Бабаев В.Б., Строкова В.В., Нелюбова В.В. Базальтовое волокно как компонент для микроармирования цементных композитов // *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова*. 2012. № 4. С. 58–61.

9. Klyuev S.V., Klyuev A.V., Lesovik R.V. Optimal design of high-quality fiber-reinforced concrete. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2015. No. 6, pp. 119–121. (In Russian).
10. Aloyan R.M., Ovchinnikov A.A., Akimov A.V. Investigation of the influence of the silica modifier on the mineralogical composition and strength properties of gasconcrete. *Nauchnoe obozrenie*. 2016. No. 2, pp. 6–13. (In Russian).
11. Ovchinnikov A.A., Akimov A.V., Khozin R.R. Porometric features of gas silicate and their influence on the properties of cellular concrete. *Informatsionnaya sreda vuza*. 2016. No. 1 (23), pp. 389–394. (In Russian).
12. Babaev V.B., Strokova V.V., Nelyubova V.V., Savgir N.L. On the alkali resistance of basalt fiber in the cement system. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2013. No. 2, pp. 63–66. (In Russian).
13. Babaev V.B., Strokova V.V., Nelyubova V.V. Basalt fiber as a component for micro-reinforcement of cement composites. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2012. No. 4, pp. 58–61. (In Russian).

УДК 666.64
DOI: https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-770-5-45-50

С.Н. ЛЕОНОВИЧ[1], д-р техн. наук (sleonovich@mail.ru); Д.В. СВИРИДОВ[2], д-р хим. наук (sviridov@bsu.by),
А.Л. БЕЛАНОВИЧ[2], канд. хим. наук (lab508@mail.ru),
Л.С. КАРПУШЕНКОВА[2], канд. хим. наук (karpushenkava@bsu.by),
С.А. КАРПУШЕНКОВ[2], канд. хим. наук (karpushenkov@bsu.by)

[1] Белорусский национальный технический университет (220013, Республика Беларусь, г. Минск, пр-т Независимости, 65)
[2] Белорусский государственный университет (220030, Республика Беларусь, г. Минск, пр-т Независимости, 4)

Пористый керамический материал на основе глины и отходов производства гранитного щебня

Предложен способ получения пористого керамического материала из алюмосиликатной смеси отходов производства гранитного щебня и глины без использования газообразователей при пониженной температуре обжига. Установлено, что состав глины различных месторождений (Гайдуковка, Осетки, Кустиха, Лукомль) влияет на способность исходной шихты к вспучиванию. Оптимальным оказалось использование глины месторождения Кустиха, характеризующейся пониженным содержанием оксида алюминия (6–10%) и значительным содержанием свободного кварца (16–22%). Установлено, что вспучивание алюмосиликатной смеси происходит посредством ее активирования раствором гидроксида натрия, причем оптимальная концентрация гидроксида натрия составляет 15 мас. %. Предложен механизм образования пористой керамики при щелочной активации исходной смеси глины и гранитоидного отсева. Ощелачивание смеси за счет добавления гидроксида натрия приводит при нагревании к образованию в составе материала температуроустойчивых структурных гидроксильных групп при дегидроксилировании алюмосиликатной поверхности; далее происходит плавление алюмосиликатов до пиропластического состояния, способствующего спеканию смеси. Содержащаяся в смеси свободная вода, будучи замкнутой в микропорах, при спекании переходит в газообразное состояние, давление газа в порах приводит к их росту и сохранению при обжиге ячеистой структуры. Показано, что оптимальный размер пор керамического материала достигается в процессе вспучивания исходной шихты при температуре обжига 950°С, что примерно на 200°С меньше, чем требуется для производства керамзита, а следовательно, позволяет снизить энергоемкость получения пористого керамического материала.

Ключевые слова: пористый керамический материал, глина, щелочная активация, ячеистая структура, обжиг.

Для цитирования: Леонович С.Н., Свиридов Д.В., Беланович А.Л., Карпушенкова Л.С., Карпушенков С.А. Пористый керамический материал на основе глины и отходов производства гранитного щебня // *Строительные материалы*. 2019. № 5. С. 45–50. DOI: https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-770-5-45-50

S.N. LEONOVICH[1], Doctor of Sciences (Engineering) (sleonovich@mail.ru); D.V. SVIRIDOV[2], Doctor of Sciences (Chemistry) (sviridov@bsu.by),
A.L. BELANOVICH[2], Candidate of Sciences (Chemistry) (lab508@mail.ru), L.S. KARPUSHENKOVA[2], Candidate of Sciences (Chemistry) (karpushenkava@bsu.by),
S.A. KARPUSHENKOV[2], Candidate of Sciences (Chemistry) (karpushenkov@bsu.by)
[1] Belarusian National Technical University (65, Nezavisimosti Avenue, Minsk, 220013, Republic of Belarus)
[2] Belarusian State University (4, Nezavisimosti Avenue, Minsk, 220030, Republic of Belarus)

Porous Ceramic Material Based on Clay And Waste of Production of Granite Rubble

The method of obtaining a porous ceramic material from an aluminosilicate mixture of a waste from the production of granite rubble and clay without the use of blowing agents at a low calcination temperature is proposed. It is shown that the composition of clay from various deposits ("Haidukovka", "Osetki", "Kustiha", "Lukoml") influence the process of expansion. The local clay "Kustiha" in its composition is the most optimal, as it contains a small amount of aluminum oxide (6–10%) and a significant amount of free quartz (16–22%). It has been established that the addition of sodium hydroxide solution to the aluminosilicate mixture leads to its swelling during firing. The optimum concentration of sodium hydroxide to swell the mixture is 15%. A mechanism for the formation of porous ceramics with alkaline activation of the initial mixture of clay and granitoid sifting is proposed. The alkalization of the mixture due to the addition of sodium hydroxide, when heated, results in the formation of temperature-resistant structural hydroxyl groups in the material when the aluminosilicate surface is dehydroxylated, and then the aluminosilicates are melted to a pyroplastic state, promoting sintering of the mixture. The free water, distributed in the mass of the initial mixture, when heated goes into a gaseous state, which leads to the formation of pores that form a cellular structure during calcination. It is shown that the optimal pores size of the ceramic material is reached when the calcination temperature of the charge is 950°C. This calcination temperature is about 200°C lower than the temperature needed for the production of expanded clay, which means obtaining such a porous ceramic material is more energy efficient.

Keywords: porous ceramic material, clay, alkaline activation, cellular structure, calcination.

For citation: Leonovich S.N., Sviridov D.V., Belanovich A.L., Karpushenkova L.S., Karpushenkov S.A. Porous ceramic material based on clay and waste of production of granite rubble. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2019. No. 5, pp. 45–50. (In Russian). DOI: https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-770-5-45-50

Производство пористых керамических неорганических материалов в последние годы вызывает повышенный интерес благодаря их экологичности, безопасности и эффективности использования в качестве теплоизоляционных материалов с малой плотностью [1–3]. К таким материалам традиционно относят керамзит, пеностекло и вспученную пенокерамику, при изготовлении которых можно использовать отходы промышленного производства: шлак, стеклобой, золу и т. п. [4–6].

В настоящее время во многих странах актуальна проблема переработки значительного количества промышленных отходов. В странах Европы образуется около 2,5 млн т отходов в год, из которых около трети являются отходами строительной индустрии [7]. Республика Беларусь также не является исключением

в плане решения проблемы утилизации промышленных отходов, к которым относится гранитоидный отсев Микашевичского РУПП «Гранит», хранящийся в отвалах на территории предприятия. Отсев представляет собой некондиционную фракцию горной массы с размером частиц менее 2 мм и по своему химическому составу сходен с глинистым сырьем. Наиболее практически интересным свойством отсева является близость его температуры плавления к температуре плавления эвтектики кварц-альбит-ортоклаз (около 1000°С). Запесоченные глины и суглинки плавятся при более высокой температуре, т. е. добавление к ним отсева может понизить температуру плавления материала. В связи с этим было бы логично использовать гранитоидный отсев в качестве сырья для производства теплоизоляционных пористых керамических материалов или легких заполнителей для бетона методом вспучивания при температуре до 1000°С. Широко распространенный материал керамзит получают из глинистого сырья во вращающихся трубчатых печах при температуре 1200°С [8], причем к вспучиванию при обжиге пригодны глины далеко не всех месторождений. В большинстве глин, которые хорошо вспучиваются, содержится от 17 до 22% Al_2O_3, в то же время сырье с повышенным содержанием SiO_2 и низким содержанием таких оксидов, как Al_2O_3, Fe_2O_3, MgO, Na_2O и K_2O, непригодно для производства керамзита [8]. С другой стороны, авторы работы [9] утверждают, что поризованную керамику можно получать из местных глин различного состава с добавлением в шихту техногенных отходов производств строительных материалов, стеклобоя и др. При этом получение пористой керамики во многих случаях осуществляется с использованием предварительного измельчения (так называемой механической активации) и термообработки исходного сырья, введения микродобавок [10]. Для глин и материалов с высоким содержанием кремнезема и глинозема широко используется также метод щелочной активации, что позволяет получить так называемые геополимерные материалы, по свойствам сопоставимые с материалами из портландцемента [11, 12]. Термин «геополимер» или «геополимерный гель» обычно используют для описания продуктов реакции, полученных при взаимодействии щелочи со щелочными алюмосиликатами и силикатами при получении геополимерных бетонов. Геополимерные гели также называют низкотемпературным алюмосиликатным стеклом или керамикой на щелочной связке [13]. Применение щелочной активации позволяет получить пористую керамику, аналогичную по свойствам формирующейся в процессах вспучивания смесей из глинистого сырья со стеклобоем, глин с повышенным содержанием силикатов и т. п. [9, 14], что свидетельствует о непосредственном участии щелочи и воды в механизме вспучивания смеси из глинистого сырья и гранитоидного отсева при повышенной температуре. Из анализа литературных данных [15] следует, что сухие смеси на основе глинистого сырья и добавок, содержащих силикатные соединения, вполне пригодны для изготовления пористой керамики, получаемой при температуре обжига до 1000°С.

В представленной статье рассмотрена возможность получения пористого керамического материала из смеси гранитоидного отсева с глинами различных месторождений Республики Беларусь с использованием щелочной активации и последующего высокотемпературного вспучивания без добавления газообразователей.

Методика эксперимента

В качестве объектов исследования для получения пористого керамического материала были опробованы легкоплавкие глины различных месторождений Республики Беларусь (Гайдуковка, Осетки, Кустиха, Лукомль) и гранитоидный отсев Микашевичского РУПП, измельченный до размера частиц 0,06–0,63 мм. Оценка пригодности глин различных месторождений для получения пористых керамических материалов проводилась для образцов, приготовленных из активированной раствором щелочи смеси гранитоидного отсева и глины.

На первом этапе смесь механически активировалась путем сухого помола в шаровой мельнице до остатка на сетке 0,25 мм, затем смешивалась с водным раствором гидроксида натрия до получения пластичного теста с влажностью примерно 20%. Из полученной влажной массы формировались гранулы диаметром около 5–10 мм и высушивались при температуре 60–80°С в течение 1–2 ч до воздушно-сухого состояния. Далее гранулы помещались в муфельную печь, нагревались до температуры 900–1050°С со скоростью 10°С/мин и дополнительно выдерживались 10 мин при максимально достигнутой температуре, а затем постепенно охлаждались в этой же печи до комнатной температуры.

Характеристики полученного продукта оценивались по следующим критериям: средняя плотность гранул после отжига (ГОСТ 9758–2012 «Заполнители пористые неорганические для строительных работ. Методы испытаний»); предел прочности при сжатии полученных пористых керамических гранул (ГОСТ 10180–2012 «Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам»); водопоглощение (ГОСТ 15588–86 «Плиты пенополистирольные. Технические условия»). Исследование микроструктуры поверхности и скола керамических образцов проводили с помощью оптического микроскопа Биолам П1 с цифровой камерой AmScope MD200.

Экспериментальная часть

Использование гранитоидного отсева обусловлено в первую очередь необходимостью его утилизации и возможным снижением энергопотребления в процессе производства легкого теплоизоляционного пористого керамического материала благодаря снижению температуры обжига исходной шихты до 950–1000°С (для керамзита температура обжига составляет около 1200°С).

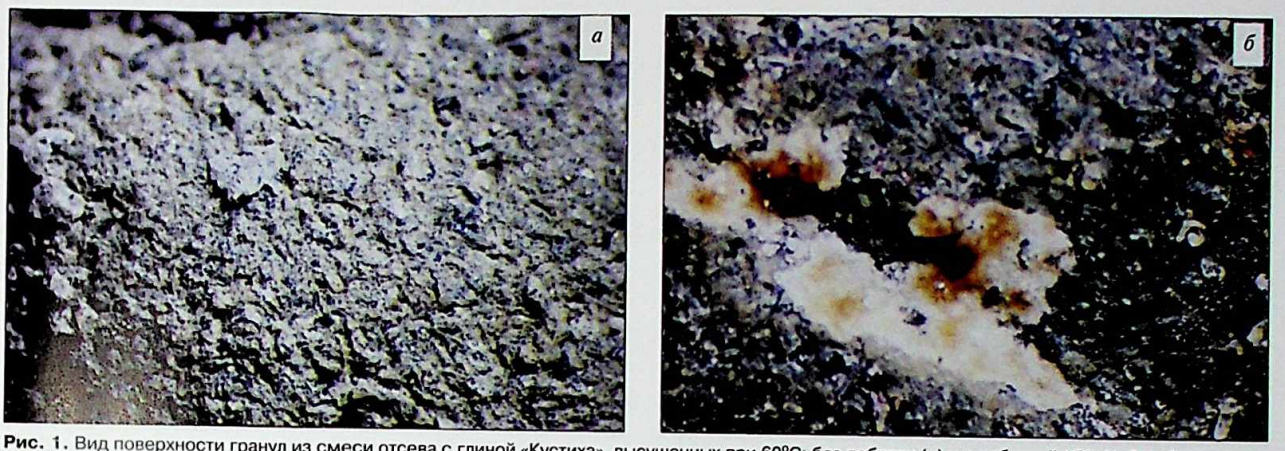


Рис. 1. Вид поверхности гранул из смеси отсева с глиной «Кустиха», высушенных при 60°С: без добавки (*а*) и с добавкой 15% NaOH (*б*). Увеличение ×40 раз

Таблица 1

Химический состав сырьевых материалов

Сырье и месторождение	Массовое содержание, %									
	SiO_2	Al_2O_3	TiO_2	Fe_2O_3	CaO	MgO	Na_2O	K_2O	Прочие	ППП
Глина «Гайдуковка»	56,7	12,28	0,55	4,13	8,59	2,78	0,46	3,05	–	11,46
Глина «Кустиха»	56–60,8	6–10,5	3–4,4	0,4–1	1–1,8	1–1,8	0,2–0,4	1–1,8	16–22 свободный кварц	3–6,7
Глина «Лукомль»	55,21	14,1	0,99	7,5	5,60	3,10	2,27	2,23	–	9
Глина «Осетки»	50,24	18,02	0,21	7,6	6,16	3	1,2	3,72	1,68 FeO	8,17
Гранитоидный отсев Микашевичского РУПП	65,7	15,08	0,45	5,36	4,2	1,6	3,52	2,77	–	1,32

Таблица 2

Составы смесей и результаты вспучивания при температуре обжига 950°С

Смесь	Гранитоидный отсев, мас. ч.	Глина «Гайдуковка», мас. ч.	Глина «Кустиха», мас. ч.	Глина «Лукомль», мас. ч.	Глина «Осетки», мас. ч.	Гидроксид натрия, мас. ч. / мас. %	Вода, мас. ч.	Вспучивание
№ 1	40	40	–	–	–	20/15	30	нет
№ 2	40	–	40	–	–	20/15	30	есть
№ 3	40	–	–	40	–	20/15	30	нет
№ 4	40	–	–	–	40	20/15	30	нет
№ 5	40	–	40	–	–	0/0	30	нет
№ 6	40	–	40	–	–	15/12	30	есть
№ 7	40	–	40	–	–	30/21	30	есть

В качестве основы для вспучивания изготавливали сухие смеси на основе гранитоидного отсева и легкоплавких глин из различных месторождений Республики Беларусь. Химический состав исследуемых глин и гранитоидного отсева представлен в табл. 1. Соотношение сырьевых компонентов шихты и добавок представлено в табл. 2. Состав алюмосиликатной матрицы формировался при соотношении гранитоидного отсева и глины в соотношении 1:1, так как в серии предварительных опытов установлено, что по отдельности ни глина, ни гранитоидный отсев не вспучиваются.

Установлено, что из всех приготовленных смесей на основе разных глин (смеси № 1–4) при обжиге вспучивание наблюдалось только для смеси № 2 (табл. 2), содержащей глину месторождения Кустиха. В случае остальных смесей вспучивания гранул не наблюдалось. Особенностью химического состава глины «Кустиха» среди прочих образцов (табл. 1) является минимальное содержание оксида алюминия (6–10%) и наличие большого количества свободного кварца (16–22%), что в совокупности с щелочной активацией и обеспечивает формирование геополимерного геля в смеси до обжига, который и способствует последующему вспучиванию материала при обжиге.

В дальнейшем для исследования вспучиваемости смеси на основе гранитоидного отсева и глины использовали глинистое сырье месторождения Кустиха (смеси № 5, 6 и 7, табл. 2). Смесь № 5 использовалась как контрольный образец для установления влияния добавки щелочи в исходный состав на вспучивание глины. Следует отметить, что перед началом обжига смеси № 2 с добавкой 15% NaOH на поверхности сформованных гранул не наблюдается особых отличий по сравнению с поверхностью гранул, сфор-

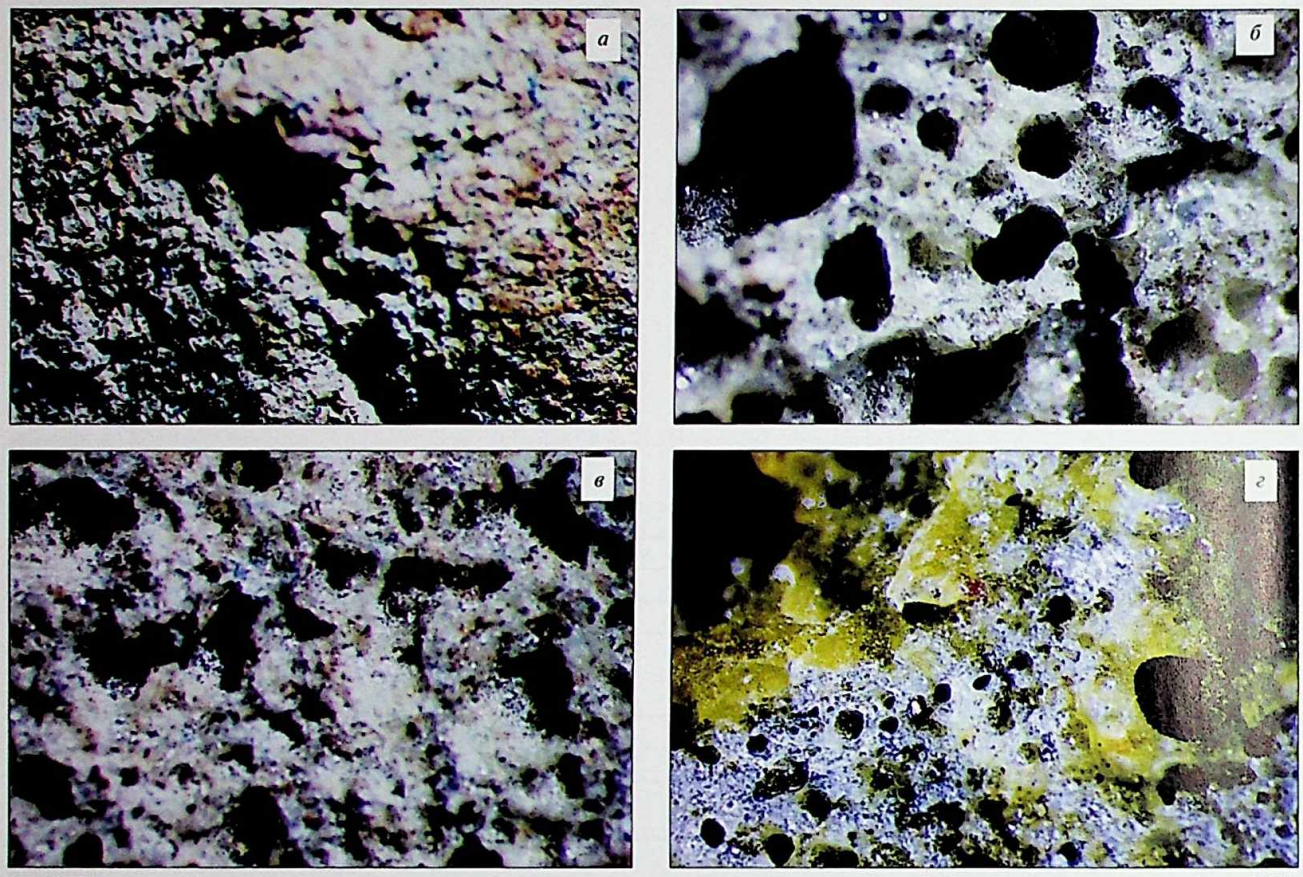


Рис. 2. Вид скола образцов пористого керамического материала, полученного из смеси отсева с глиной «Кустиха» при температуре обжига 950°С в зависимости от концентрации гидроксида натрия: *а* – без NaOH; *б* – 15% NaOH; *в* – 12% NaOH; *г* – 21% NaOH. Увеличение ×40 раз

мированных из смеси № 5 без щелочи (рис. 1, *а*): до обжига любая смесь отсева и глины под действием щелочи не вспучивается. Следовательно, основные процессы протекают при повышенной температуре.

При нагревании образца № 5 было установлено, что он не подвергается вспучиванию вплоть до температуры 950°С (рис. 2, *а*). Очевидно, что наличие щелочи в смеси непосредственно влияет на процесс порообразования в керамическом материале. Из рис. 2, *б*, в следует, что образцы, содержащие щелочь (смеси № 2, 6 и 7), после обжига обладают пористой структурой. Однако при концентрации щелочи 12% (смесь № 6) пористость недостаточно ярко выражена, т. е. процесс формирования пор кажется незавершенным (рис. 2, *в*), а при концентрации 21% (смесь № 7) проявляется тенденция к расплавлению керамического материала (рис. 2, *г*), что подтверждается характерными очагами стеклования (оплавления) вокруг пор. Последнее утверждение подтвердилось тем, что образцы, содержащие более 21% щелочи, при обжиге расплавлялись до состояния жидкой массы. Наиболее оптимальной для получения пористого керамического продукта является концентрация щелочи в исходной смеси 15% (образец № 2), для которого наблюдается характерная относительно однородная пористая структура (рис. 2, *б*).

Проведено также исследование вспучиваемости смеси № 2 в зависимости от температуры. На рис. 3 представлен вид сколов образцов пористого керамического материала в зависимости от температуры обжига. Установлено, что температура обжига 900°С не является достаточной для формирования характерных пор, присущих пористой керамике (рис. 3, *а*). Укрупнение пор в образце и практически полное исчезновение мелких (возможно, в том числе за счет слияния) происходит при температуре обжига 1000–1050°С (рис. 3, *в, г*). С другой стороны, укрупнение пор приводит к снижению прочности керамического материала. Дальнейшее повышение температуры до 1100°С приводит к расплавлению смеси, в результате чего получить пористый керамический материал не представляется возможным. Таким образом, именно температура 950°С является наиболее оптимальной температурой обжига для смеси № 2. Поверхность скола такого образца (рис. 3, *б*) характеризуется содержанием как более крупных пор, так и мелких с наличием между ними характерных массивных перемычек, обеспечивающих достаточную конечную прочность, необходимую для пористого керамического материала.

Предварительное исследование физико-механических свойств вспученных при 950°С гранул из смеси № 2 показало, что средняя плотность гранул составляет 265 кг/м^3, прочность при сжатии – 3,8 МПа, а водопоглощение 3–4%. Данные показатели вполне коррелируют с уже известными стеклокерамическими пористыми материалами [3].

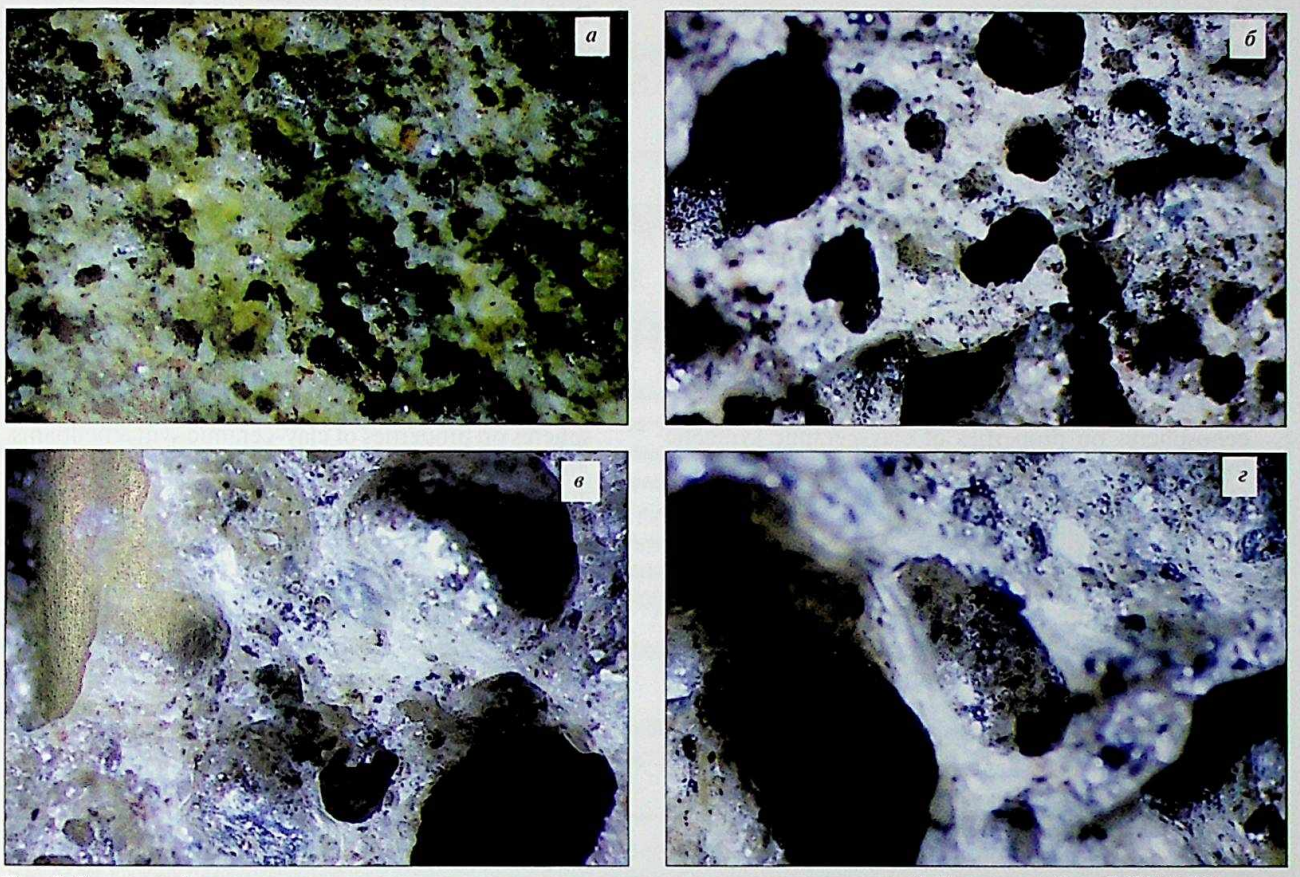


Рис. 3. Вид скола образцов пористого керамического материала, полученного из смеси отсева с глиной «Кустиха» с добавкой 15% NaOH, в зависимости от температуры обжига: *а* – 900°С; *б* – 950°С; *в* – 1000°С; *г* – 1050°С. Увеличение ×40 раз

На основании экспериментальных исследований можно предложить следующий механизм образования пористой керамики при щелочной активации исходной смеси глины и гранитоидного отсева. Ощелачивание смеси за счет добавления гидроксида натрия приводит при нагревании к образованию в составе материала температуроустойчивых структурных гидроксильных групп при дегидроксилировании алюмосиликатной поверхности; далее происходит плавление алюмосиликатов до пиропластического состояния, способствующего спеканию смеси. Содержащаяся в смеси свободная вода, будучи замкнутой в микропорах, при спекании переходит в газообразное состояние, давление газа в порах приводит к их росту и сохранению при обжиге ячеистой структуры.

Выводы. Показано, что смесь из отходов гранитоидного отсева и глины месторождения Кустих» перспективна для изготовления пористого керамического материала при температуре обжига менее 1000°С.

Установлено, что вспучивание смеси из гранитоидного отсева и глины без использования дополнительных добавок (газообразователей) возможно посредством активирования смеси перед обжигом раствором гидроксида натрия. Увеличение концентрации активатора – гидроксида натрия более 16% приводит к снижению пористой структуры с предпочтительным формированием крупных пор, что отрицательно сказывается на прочности керамического материала. Концентрация щелочи менее 10% недостаточна для вспучивания смеси и образования пористой керамики.

Также показано, что пористый керамический материал формируется при температуре обжига 950°С, что примерно на 200°С меньше, чем требуется для производства керамзита, а следовательно, позволяет снизить энергоемкость процесса получения пористой теплоизоляционной керамики.

Список литературы

1. Сиразин М.Г. Теплая керамика – перспективный материал для жилищного строительства в России // *Строительные материалы*. 2006. № 4. С. 18–19.
2. Абдрахимова Е.С., Абдрахимов В.З. Оптимизация содержания золы легкой фракции в составах масс керамических плиток // *Стекло и керамика*. 2006. Т. 63. № 3–4. С. 95–96.

References

1. Sirazin M.G. Warm ceramics – a promising material for housing in Russia. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2006. No. 4, pp. 18–19. (In Russian).
2. Abdarakhimova E.S., Abdarakhimova V.Z. Optimization of the continent of light fraction ASH in ceramic tile mixtures. *Glass and Ceram*. 2006. Vol. 63. No. 3–4, pp. 95–96. (In Russian).

3. Rashad A.M. Lightweight expanded clay aggregate as a building material – An overview // *Construction and Building Materials*. 2018. Vol. 170, pp. 757–775. DOI: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.009
4. Казанцева Л.К., Верещагин В.И., Овчаренко Г.И. Вспененные керамические теплоизоляционные материалы из природного сырья // *Строительные материалы*. 2001. № 4. С. 33–35.
5. Кузьмина О.В., Верещагин В.И., Абияка А.Н. Расширение сырьевой базы для получения пенокристаллических материалов // *Строительные материалы*. 2009. № 7. С. 54–56.
6. Rugele K., Lehmhus D., Hussainova I., Peculevica J., Lisnanskis M., Shishkin A. Effect of fly-ash cenospheres on properties of clay-ceramic syntactic foams // *Materials (Basel)*. 2017. No. 10 (7). 828. DOI: https://doi.org/10.3390/ma10070828
7. Puertas F., Santos R., Alonso M.M., del Rio M. Alkali-activated cement mortars containing recycled clay-based construction and demolition waste // *Ceramics-Silikaty*. 2015. No. 59 (3), pp. 202–210.
8. Торопков Н.Е., Кутугин В.А. Зависимость физико-химических свойств глинистого сырья в технологии керамзитов // *Международный научно-исследовательский журнал*. 2014. № 11. С. 52–54.
9. Дамдинова Д.Р., Хардаев П.К., Анчилоев Н.Н., Токуренов Б.В. Исследование возможности получения пенокерамики с использованием местных глин и стеклобоя. *Строительный комплекс России. Наука. Образование. Практика: Материалы междунар. науч.-практ. конф.* Улан-Удэ: ВСГУТУ, 2012. С. 203–205.
10. Дамдинова Д.Р., Хардаев П.К., Карпов Б.А., Зонхиев М.М. Технологические приемы получения пеностекол с регулируемой поровой структурой // *Строительные материалы*. 2007. № 6. С. 68–69.
11. Prud'homme E., Michaud P., Joussein E., Peyratout C., Smith A., Rossignol S. In situ inorganic foams prepared from various clays at low temperature // *Applied Clay Science*. 2011. Vol. 51. No. 1–2, pp. 15–22. DOI: https://doi.org/10.1016/j.clay.2010.10.016
12. Bai C., Colombo P. Processing, properties and applications of highly porous geopolymers: A review // *Ceramics International*. 2018. Vol. 44. No. 14, pp. 16103–16118. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.05.219
13. Duxson P., Fernandez-Jimenez A., Provis J.L., Lukey G.C., Palomo A., van Deventer J.S.J. Geopolymer technology: the current state of the art // *Journal of Materials Science*. 2007. Vol. 42. No. 9, pp. 2917–2933. DOI: 10.1007/s10853-006-0637-z
14. Kazantseva L.K., Rashchenko S.V. Chemical processes during energy-saving preparation of lightweight ceramics // *Journal of the American Ceramic Society*. 2014. Vol. 97. No. 6, pp. 1743–1749. DOI: https://doi.org/10.1111/jace.12980
15. Верещагин В.И., Соколова С.Н. Гранулированный пеностеклокристаллический теплоизоляционный материал из цеолитосодержащих пород // *Строительные материалы*. 2007. № 3. С. 66–67.

3. Rashad A.M. Lightweight expanded clay aggregate as a building material – An overview. *Construction and Building Materials*. 2018. Vol. 170, pp. 757–775. DOI: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.009
4. Kazantseva L.K., Vereshchagin V.I., Ovcharenko G.I. Foamed ceramic insulation materials from natural raw materials. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2001. No. 4, pp. 33–35. (In Russian).
5. Kuzmina O.V., Vereshchagin V.I., Abiyaka A.N. Expansion of the raw material base for the production of foam-crystalline materials. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2009. No. 7, pp. 54–56. (In Russian).
6. Rugele K., Lehmhus D., Hussainova I., Peculevica J., Lisnanskis M., Shishkin A. Effect of fly-ash cenospheres on properties of clay-ceramic syntactic foams. *Materials (Basel)*. 2017. No. 10 (7). 828. DOI: https://doi.org/10.3390/ma10070828
7. Puertas F., Santos R., Alonso M.M., del Rio M. Alkali-activated cement mortars containing recycled clay-based construction and demolition waste. *Ceramics-Silikaty*. 2015. No. 59 (3), pp. 202–210.
8. Toropkov N.E., Kutugin V.A. The dependence of the physico-chemical properties of clay raw materials in the technology of expanded clay. *Mezhdunarony nauchno-issledovatel'skyzhurnal*. 2014. No. 11, pp. 52–54 (In Russian).
9. Damdinova D.R., Hardaev P.K., Anchiloev N.N., Tokurenov B.V. Study of the possibility of obtaining foam ceramics using local clay and cullet. *Building complex of Russia. The science. Education. Practice: materials of the international scientific-practical conference*. Ulan-Ude. 2012, pp. 203–205. (In Russian).
10. Damdinova D.R, Hardaev P.K., Karpov B.A., Zonhiev M.M. Technological methods for obtaining foam glass with adjustable pore structure. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2007. No. 6, pp. 68–69. (In Russian).
11. Prud'homme E., Michaud P., Joussein E., Peyratout C., Smith A., Rossignol S. In situ inorganic foams prepared from various clays at low temperature. Applied Clay Science. 2011. Vol. 51. No. 1–2, pp. 15–22. DOI: https://doi.org/10.1016/j.clay.2010.10.016
12. Bai C., Colombo P. Processing, properties and applications of highly porous geopolymers: A review. *Ceramics International*. 2018. Vol. 44. No. 14, pp. 16103–16118. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.05.219
13. Duxson P., Fernandez-Jimenez A., Provis J.L., Lukey G.C., Palomo A., van Deventer J.S.J. Geopolymer technology: the current state of the art. *Journal of Materials Science*. 2007. Vol. 42. No. 9, pp. 2917–2933. DOI: 10.1007/s10853-006-0637-z
14. Kazantseva L.K., Rashchenko S.V. Chemical processes during energy-saving preparation of lightweight ceramics. *Journal of the American Ceramic Society*. 2014. Vol. 97. No. 6, pp. 1743–1749. DOI: https://doi.org/10.1111/jace.12980
15. Vereshchagin V.I., Sokolova S.N. Granulated foam glass-insulating insulation material of zeolite rocks. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2007. No. 3, pp. 66–67. (In Russian).

УДК 625.855.53
DOI: https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-770-5-51-56

Ю.Г. БОРИСЕНКО, канд. техн. наук (borisenko2005@yandex.ru),
Р.М. АЗАН, инженер (rayanazzan2014@gmail.com), Д.П. ШВАЧЁВ, инженер (dsh-92@mail.ru),
Д.А. ВОРОБЬЕВ, инженер (vorobev_d@mail.ru)
Северо-Кавказский федеральный университет (355009, г. Ставрополь, ул. Пушкина, 1)

Битумоминеральные композиции для дорожного строительства с использованием бытовых отходов стекла (стеклобоя)

Показано, что перспективным направлением утилизации бытовых отходов стекла (стеклобоя) является его использование в составах битумоминеральных композиций для дорожного строительства. Предложены составы мелкозернистых битумоминеральных композиций с включением стеклобоя фракций 20–5 мм и проведен сравнительный анализ влияния различного содержания фракций стеклобоя на физико-механические свойства предложенных композиций. Выявлено, что применение стеклобоя существенно снижает битумоемкость и плотность битумоминеральных композиций. Установлены рациональные пределы содержания стеклобоя в мелкозернистых битумоминеральных композициях, которые составляют не более 36–40 мас. %. Показано, что сдвигоустойчивость и трещиностойкость битумоминеральных композиций с рациональным содержанием стеклобоя в смеси удовлетворяют требованиям ГОСТа.

Ключевые слова: битумоминеральная композиция, битумоемкость, стеклобой, физико-механические свойства, сдвигоустойчивость, трещиностойкость.

Для цитирования: Борисенко Ю.Г., Азан Р.М., Швачёв Д.П., Воробьев Д.А. Битумоминеральные композиции для дорожного строительства с использованием бытовых отходов стекла (стеклобоя) // *Строительные материалы*. 2019. № 5. С. 51–56. DOI: https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-770-5-51-56

Yu.G. BORISENKO, Candidate of Sciences (Engineering) (borisenko2005@yandex.ru),
R.M. AZAN, Engineer (rayanazzan2014@gmail.com), D.P. SHVACHEV, Engineer, (dsh-92@mail.ru),
D.A. VOROBIEV, Engineer (vorobev_d@mail.ru)
North-Caucasus Federal University (1, Pushkina Street, Stavropol, 355009, Russian Federation)

Bitumen-Mineral Compositions for Road Construction with the Use of Household Waste Glass (Cullet)

It is shown that the promising direction of recycling of household waste glass (cullet) is its use in the compositions of bitumen-mineral compositions for road construction. The compositions of fine-grained bitumen-mineral compositions with the inclusion of cullet fractions of 20-5 mm are proposed, and a comparative analysis of the influence of different content fractions of cullet on physical and mechanical properties of the proposed compositions is made. It is revealed that the use of cullet significantly reduces the bitumen content and density of bitumen-mineral compositions. Rational limits of cullet content in fine-grained bitumen-mineral compositions, which make up no more than 36–40% of the mass, have been established. It is shown that the shear resistance and crack resistance of bitumen-mineral compositions with rational content of cullet in the mixture meet the requirements of GOST.

Keywords: bitumen-mineral composition, bitumen content, cullet, physical-mechanical properties, shear resistance, crack resistance.

For citation: Borisenko Yu.G., Azan P.M., Shvachev D.P., Vorobiev D.A. Bitumen-mineral compositions for road construction with the use of household waste glass (cullet). *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2019. No. 5, pp. 51–56. (In Russian). DOI: https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-770-5-51-56

Дефицит качественных инертных материалов для производства дорожных бетонов и асфальтобетонов во многих регионах России является одной из актуальных проблем. Поиск альтернативного сырья с использованием местных материалов, отходов промышленности или бытовых отходов может отчасти решить эту задачу.

Ценным материалом, направляемым на свалки, является стекло (бутылочный стеклобой, отходы стекольного производства и т. д.). Как известно, стеклобой – неразлагающийся отход, засоряющий почвенный слой земли, подлежащий переработке или соответствующему захоронению (электронные или фторсодержащие стекла). Так, согласно статистическим данным [1], ежегодно образующееся количество стеклобоя для западноевропейских стран оценивается в миллионы тонн, однако процент его вторичного использования в различных странах неодинаков. В Российской Федерации ситуация со стеклобоем не менее драматична – только из Московской области ежегодно вывозится на полигоны бытовых отходов для захоронения 13 млн т твердых бытовых отходов, в которых порядка 25% (около 3,25 млн т) объема составляет стеклобой [2]. Анализ ситуации с образованием и утилизацией стеклобоя за последние десятилетия в развитых странах мира показал, что общее количество стеклобоя там составляет от 10 до 75% всего ежегодно производимого стекла [3, 4], а в России – этот показатель значительно выше (в отдельных регионах близок к 100%).

В соответствии с современным опытом утилизации стеклобоя и согласно многочисленным исследованиям ученых определены следующие отрасли

Таблица 1

Зерновые составы исследуемых битумоминеральных композиций, мас. %

Состав	Фракция стеклобоя (СБ*) и щебня (Щ**) в составе смеси			Размер зерен, мм, не более									
	20–15	15–10	10–5	20	15	10	5	2,5	1,25	0,63	0,315	0,16	0,071
1	СБ	Щ	Щ	100	91,6	86,5	56	43,8	33,6	24,4	18,3	13,2	5,1
2	Щ	СБ	Щ	100	89,9	85,5	55,3	43,2	33,2	24,1	18,1	13,1	5
3	Щ	Щ	СБ	100	90	85	55,2	43,1	33,1	24,1	18,1	13	5
4	СБ	СБ	Щ	100	91,6	87	56,3	44	33,8	24,6	18,4	13,3	5,1
5	Щ	СБ	СБ	100	90	85,4	55,5	43,4	33,3	24,2	18,2	13,1	5
6	СБ	СБ	СБ	100	92	87	56,5	44,2	33,9	24,6	18,5	13,3	5,1
7	Щ	Щ	Щ	100	90	85	55	43	33	24	18	13	5

Примечание. СБ* – бутылочный стеклобой, Щ** – гранитный щебень.

народного хозяйства, направления и пути его использования: стекольная промышленность, промышленность строительных материалов, дорожное строительство и прочие области применения (электротехническая промышленность, наполнители, огнеупоры и т. д.) [5–8].

В настоящее время имеется определенный опыт использования стеклобоя в дорожном строительстве. Так, одним из направлений утилизации стеклобоя является использование его в качестве подстилающей основы для дорожного полотна (основа для дорог, дренажей в земле и др.) [9].

Стеклобой возможно использовать для изготовления минерального порошка для асфальтобетонов и битумоминеральных материалов. Минеральный порошок из стеклобоя обладает развитой поверхностью и отсутствием пористости [5].

Перспективным является возможность применения стеклобоя в качестве инертного заполнителя для асфальтобетонных и битумоминеральных смесей [10–14].

Измельченный стеклобой возможно использовать как в качестве заполнителя в асфальтобетонных дорожных покрытиях, так и в дорожных битумных эмульсиях для поверхностной обработки асфальтобетонных покрытий [12]. Добавка стекла в дорожные эмульсии улучшает торможение и продлевает сроки службы дороги при условии замены заполнителя стеклом на 50% и более.

В Великобритании разработанные на основе стеклобоя материалы представляют собой композиции стеклосмола и стеклоцемент [13]. Так, смесь стекла с асфальтом (гласасфальт), содержащую 45–73% дробленого стекла, применяют в дорожном строительстве. Гласасфальт имеет ряд преимуществ перед обычным асфальтом [13]: укладывается при более низкой температуре, хорошо виден за счет отражения света фар автомобиля от микросфер стекла; на нем лучше торможение, дольше срок службы дороги.

Известен опыт применения в США асфальтобетона, содержащего 60% молотого стекла, 33% каменной муки и 5% битума [14]. При его изготовлении возможно применять и несортированный стеклобой.

Промышленный или бытовой стеклобой по прочности и зерновому составу близок к минеральным материалам, применяемым в асфальтобетонных смесях, и может заменить их. Применение стеклобоя способствует снижению расхода битума в битумоминеральной смеси и позволяет получать покрытия с высокими рефлектирующими свойствами [5, 11]. Согласно некоторым исследованиям, наибольший размер зерен стеклобоя для битумоминеральных смесей не должен превышать 15 мм, потеря массы при испытании на дробимость должна быть не более 15%, а содержание стеклобоя не должно превышать 50% массы смеси [5]. Установлено, что введение в асфальтобетонную смесь до 10% стеклобоя не снижает ее качества; большее количество заметно ухудшает прочность при 50°С (теплостойкость), водо- и морозостойкость [5].

Однако, несмотря на актуальность проблемы утилизации стеклобоя и имеющийся положительный опыт применения отходов стекла в асфальтобетонах, битумоминеральные материалы с использованием стеклобоя в настоящее время не получили широкого внедрения и требуют дальнейшего изучения и развития. Исходя из вышеперечисленных фактов были проведены исследования возможности и перспективности эффективного использования стеклобоя, в частности бытовых отходов бутылочного стекла – наименее востребованных для вторичной переработки стеклоотходов, как заполнителя для битумоминеральных композиций.

Исследовали горячие мелкозернистые битумоминеральные композиции. Были разработаны составы непрерывной гранулометрии типа Б, в которых заменяли те или иные фракции плотного за-

Таблица 2

Свойства щебня (ГУП СК «Кочубеевский карьер», Ставропольский край)

Показатели	Фактические показатели	Требования ГОСТ 8267–93*
Марка по дробимости	1000	Не менее 1000
Марка по истираемости	И1	И1
Марка по морозостойкости	F150	Не ниже F50
Примечание. * ГОСТ 8267–93 «Щебень и гравий из плотных горных пород для строительных работ. Технические условия».		

полнителя на аналогичные фракции стеклобоя (составы № 1–6, табл. 1). В предложенных составах (№ 1–6) варьировали содержание крупных фракций (20–5 мм) стеклобоя. Замену фракции плотного заполнителя на стеклобой осуществляли исходя из равенства объемов долей проектируемых зерновых составов и зернового состава-прототипа на плотном заполнителе (состав № 7, табл. 1). Для этого определяли насыпную плотность каждой фракции щебня и соответствующей фракции стеклянного боя. В качестве состава-прототипа использовали стандартную мелкозернистую асфальтобетонную смесь типа Б (ГОСТ 9128–2013 «Смеси асфальтобетонные, полимерасфальтобетонные, асфальтобетон, полимерасфальтобетон для автомобильных дорог и аэродромов. Технические условия») на плотном минеральном заполнителе (состав № 7, табл. 1).

В предложенных составах битумоминеральных смесей использовали: бытовые отходы стекла – несортированный бой бутылочного стекла (бесцветный (полубелый) и темный (зеленое и коричневое стекло)) фракции 20–5 мм; гранитный щебень и отсевы его дробления фракции 20–0,16 мм; активированный известняковый минеральный порошок МП-1.

Таблица 3

Свойства битума марки БНД 60/90

Показатель	Фактическое значение	Требования ГОСТ 22245–90*
Глубина проникновения иглы, 0,1 мм: при 25°С при 0°С	 65 23	 61–90 Не менее 20
Температура размягчения по КиШ, °С	49	Не ниже 47
Растяжимость, см: при 25°С при 0°С	 125 3,5	 Не менее 55 Не менее 3,5
Температура хрупкости, °С	-22	Не выше -15
Температура вспышки, °С	287	Не ниже 230
Примечание. * ГОСТ 22245–90 «Битумы нефтяные дорожные вязкие. Технические условия».		

В качестве вяжущего применяли дорожный нефтяной битум марки БНД 60/90. Свойства щебня и битума представлены в табл. 2 и 3.

Из битумоминеральных смесей изготавливали образцы-цилиндры 71,4×71,4 мм, испытывали согласно ГОСТ 12801–98 «Материалы на основе органических вяжущих для дорожного и аэродромного строительства. Методы испытаний» и ориентировались на нормативные требования к асфальтобетонным смесям типа Б, I марки применительно к местным условиям Юга России (IV и V климатических зон). При подборе оптимального содержания битума в композициях ориентировались на максимальные прочностные характеристики (R_0, R_{20} и R_{50}) и показатели водостойкости ($k_в$, $k_{вд}$ и W). Физико-механические свойства предложенных битумоминеральных композиций и состава-прототипа на плотном заполнителе с оптимальным содержанием битума представлены в табл. 4.

Таблица 4

Физико-механические свойства битумоминеральных композиций

Составы	Фракции стеклобоя в смеси, мм	Содержание стеклобоя в смеси $C_{сб}$, мас. %	Содержание битума в смеси C, мас. %	Плотность ρ, кг/м³	Прочность при сжатии, МПа			Коэффициенты водостойкости		Водонасыщение W, %
					R_0	R_{20}	R_{50}	$k_в$	$k_{вд}$	
1	20–15	8,4	4,5	2,41	9,2	4,6	2,2	0,94	0,87	3,4
2	15–10	4,4	5	2,42	10,4	4,9	2,4	0,96	0,9	2,6
3	10–5	29,8	5	2,38	8,1	4,2	2	0,92	0,84	2,6
4	20–10	13	4,5	2,39	8,5	4,3	2,1	0,93	0,85	4
5	15–5	34,5	5	2,36	8,1	3,6	1,5	0,92	0,82	2,1
6	20–5	45	5	2,34	6,3	2,6	1	0,92	0,79	1,9
7	–	–	5,5	2,43	10,75	4,5	2,2	0,91	0,87	1,6
Требования ГОСТ 9128–2013 для асфальтобетона типа Б, I марки, IV, V дорожно-климатические зоны			5–6,5	–	≤13	≥2,5	≥1,3	≥0,85	≥0,75	1,5–4

Таблица 5

Сдвигоустойчивость и трещиностойкость битумоминеральных композиций

№ состава	Фракции стеклобоя в смеси, мм	Содержание стеклобоя в смеси $C_{сб}$, мас. %	Содержание битума в смеси C, мас. %	Коэффициент внутреннего трения tgφ	Сцепление при сдвиге $C_{п}$, МПа	Предел прочности на растяжение при расколе R_p, МПа
№ 5	15–5	34,5	5	0,93	0,54	4,11
№ 7	–	–	5,5	0,96	0,41	5,2
ГОСТ 9128–2013 для асфальтобетона типа Б, I марки, IV, V дорожно-климатические зоны			5–6,5	≥0,83	≥0,38	4–6,5

Результаты экспериментальных исследований

Включение в состав битумоминеральных композиций стеклобоя приводит к снижению битумоемкости смесей. Применение стеклобоя снижает оптимальное содержание битума в композициях на 0,5–1 мас. % в сравнении с оптимальным содержанием битума C в составе-прототипе на плотном заполнителе (состав № 7, табл. 4). Это связано с особенностями поверхности стеклобоя, обусловленными менее развитой поверхностью частиц и более низкой удельной поверхностью соответствующих его фракций в композиции в сравнении с традиционным плотным заполнителем (гранитным или известняковым щебнем). Минимальное содержание битума, которое составило 4,5 мас. %, выявлено в композициях с замещением стеклобоем одной или двух наиболее крупных фракций щебня в смеси – фракции 20–15, 20–10 мм (составы № 1 и 4, табл. 4).

Плотность ρ битумоминеральных композиций с включением стеклобоя несколько ниже плотности состава-прототипа и с увеличением содержания стеклобоя $C_{сб}$ в смеси устойчиво снижается. Максимальное снижение плотности – на 3,7% зафиксировано у состава с заменой всех трех наиболее крупных фракций плотного заполнителя (20–15, 15–10 и 10–5 мм) на стеклобой (состав № 6, табл. 4).

Прочность и теплостойкость разработанных композиций оценивались по показателям прочности при сжатии при 20°С (R_{20}) и прочности при сжатии при 50°С (R_{50}), имеют достаточно высокие значения и удовлетворяют требованиям ГОСТ 9128–2013. Необходимо отметить следующее: замена отдельных крупных фракций плотного заполнителя на стеклобой (20–15 мм, состав № 1; 15–10 мм, состав № 2) приводит к некоторому увеличению прочностных показателей и теплостойкости в сравнении с аналогичными показателями состава-прототипа (при этом количество в смеси заменяемого на стеклобой плотного заполнителя невелико). С дальнейшим увеличением содержания стеклобоя в композициях показатели прочности и теплостойкости снижаются. При замене трех фракций плотного заполнителя на стеклобой (фракции 20–15, 15–10 и 10–5 мм) показатель прочности при сжатии при 50°С R_{50} не удовлетворяет требованиям ГОСТ 9128–2013 (состав № 6, табл. 4).

Выявлено, что небольшое содержание стеклобоя в смеси (4–9%, составы № 1, 2) мало влияет на свойства получаемых композиций. Полученные результаты хорошо согласуются с ранее проведенными исследованиями других авторов [11].

С увеличением содержания стеклобоя в составах битумоминеральных композиций показатели прочности при сжатии при 0°С (R_0) устойчиво снижаются, что свидетельствует о хорошей деформативной устойчивости материала при низкой температуре эксплуатации.

Водостойкость предложенных композиций оценивали по коэффициенту водостойкости $k_в$, коэффициенту водостойкости при длительном водонасыщении $k_{вд}$ и водонасыщению W. В соответствии с полученными результатами показатели водостойкости предложенных композиций соответствуют требованиям ГОСТа к горячим плотным асфальтобетонам. С увеличением содержания стеклобоя в композициях показатели коэффициентов водостойкости $k_в$ и $k_{вд}$ снижаются, в то время как показатели водонасыщения улучшаются. Снижению водонасыщения способствует наличие в смеси стеклобоя, в частицах которого практически отсутствуют макро- и микропоры.

Исследования свойств предложенных составов битумоминеральных композиций на основе заполнителя из несортированного стеклобоя показали, что наиболее оптимальной композицией по совокупности физико-механических показателей и максимально возможного при этом содержания отходов бытового стекла является состав № 5 с содержанием в смеси стеклобоя фракций 15–5 мм – 34,5 мас. %.

Были проведены сравнительные исследования влияния стеклобоя на эксплуатационные свойства (трещиностойкость и сдвигоустойчивость) битумоминеральных композиций. Испытывали согласно ГОСТ 12801–98 образцы-цилиндры композиции с оптимальным количеством стеклобоя (состав № 5) и стандартного мелкозернистого асфальтобетона на плотном заполнителе (состав № 7). Сдвигоустойчивость композиций оценивали по показателям коэффициента внутреннего трения tgφ и сцепления при сдвиге $C_{п}$, трещиностойкость – по пределу прочности на растяжение при расколе R_p. Результаты испытаний представлены в табл. 5.

Сдвигоустойчивость предложенной битумоминеральной композиции на основе стеклобоя удовлетворяет требованиям ГОСТ 9128–2013 для асфальтобетона типа Б, I марки для IV и V дорожно-климатических зон. Присутствие стеклобоя в композиции несколько снижает показатель внутреннего трения материала tgφ, что связано с более сглаженной поверхностью крупных частиц стеклобоя (фракции 15–10 мм) в сравнении с поверхностью аналогичных фракций асфальтобетона из дробленого щебня плотных горных пород. С другой стороны, более высокий показатель сцепления при сдвиге C_{π} свидетельствует о более устойчивой к деформациям структуре битумоминерального материала на основе отходов стекла.

Трещиностойкость R_p предложенной композиции хоть и несколько ниже трещиностойкости мелкозернистого асфальтобетона на плотном заполнителе, но полностью удовлетворяет требованиям ГОСТа.

Выводы

В результате проведенных исследований применения бытовых отходов стекла (несортированного бутылочного стеклобоя) в битумоминеральных композициях установлено:

1. Применение бытовых отходов стекла (боя бутылочного стекла) в качестве инертного заполнителя для битумоминеральных композиций является перспективным направлением их утилизации.
2. Использование несортированного боя бутылочного стекла фракций 20–5 мм в мелкозернистых битумоминеральных смесях снижает их битумоемкость на 0,5–1 мас.%.
3. Плотность ρ битумоминеральных композиций с увеличением содержания стеклобоя в смеси устойчиво снижается.
4. Получаемые на основе стеклобоя битумоминеральные композиции не уступают по своим физико-механическим показателям традиционным плотным мелкозернистым асфальтобетонам, применяемым в дорожном строительстве для покрытий автомобильных дорог.
5. Рациональным следует считать содержание стеклобоя $C_{сб}$ фракций 15–5 мм в предложенных мелкозернистых битумоминеральных композициях не более 36–40 мас. %. Дальнейшее повышение содержания стеклобоя в композиции способствует резкому снижению теплостойкости и ухудшению водостойкости.
6. Сдвигоустойчивость и трещиностойкость битумоминеральных композиций с рациональным содержанием стеклобоя в смеси удовлетворяет требованиям действующих нормативов.

Список литературы

1. Cocking R. The challenge for glass recycling. *Sustainable Waste Management: Proceedings of the International Symposium*. 9–11 September 2003. Dundee UK, pp. 73–78.
2. Егоров К.И., Мамина Н.А. Отходы стекла – экология, информация, бизнес // *Строительные материалы*. 1998. № 10. С. 33.
3. Glusing A.K., Conradt R. Dissolution kinetics of impurities in recycled cullet. *Recycling and Reuse of glass Cullet: Proceedings of International Symposium*. 19–20 March 2001. Dundee UK, pp. 29–41.
4. Meyer C. Recycled glass – from waste material to valuable resource. *Recycling and Reuse of glass Cullet: Proceedings of International Symposium*. 19–20 March 2001. Dundee UK, pp. 1–10.
5. Мелконян Р.Г., Власова С.Г. Экологические и экономические проблемы использования стеклобоя в производстве стекла. Екатеринбург: Издательство Уральского университета. 2013. 100 с.
6. Беляев И.Д. Утилизация и переработка стеклобоя. *Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2017. С. 36–38.
7. Кетов П.А., Пузанов С.И., Корзанов В.С. Использование вяжущих свойств дисперсных силикатных стекол при утилизации стеклобоя // *Строительные материалы*. 2007. № 5. С. 66–67.
8. Россомагина А.С., Пузанов И.С. Разработка процессов утилизации стеклобоя путем создания

References

1. Cocking R. The challenge for glass recycling. *Sustainable Waste Manage: Proceedings of the International Symposium*. 9–11 September 2003. Dundee UK, pp. 73–78.
2. Yegorov K.I., Mamina N.A. Glass waste – ecology, information, business. *Stroitel'nye Materialy*. [Construction Materials]. 1998. No. 10, pp. 33. (In Russian).
3. Glusing A.K., Conradt R. Dissolution kinetics of recycled crops in recycled cullet. *Recycling and Reuse of Glass: Proceedings of International Symposium*. 19–20 March 2001. Dundee UK, pp. 29–41.
4. Meyer C. Recycled glass – from waste material to valuable resource. *Recycling and Reuse of glass Cullet: Proceedings of International Symposium*. 19–20 March 2001. Dundee UK, pp. 1–10.
5. Melkonyan R.G., Vlasova S.G. Ecologicheskie y economicheskie problem ispol'zovania stekloboya v proizvodstve stekla [Environmental and economic problems of the use of cullet in the production of glass]. Ekaterinburg: Publishing house Ural. University, 2013. 100 p.
6. Belyaev I.D. Disposal and recycling of cullet. *International Scientific and Technical Conference of Young Scientists BSTU named after V.G. Shukhov*. 2017, pp. 36–38. (In Russian).
7. Ketov P.A., Puzanov S.I., Koranov V.S. The use of the binding properties of dispersed silicate glasses in the recycling of cullet. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2007. No. 5, pp. 66–67. (In Russian).

композиционных материалов. *Эколого-экономические проблемы освоения минерально-сырьевых ресурсов: Тезисы докладов Международной научной конференции*. 2005. С. 83–84.
9. Meland I., Dahl P.A., Recycling glass cullet as concrete aggregates, applicability and durability // *Recycling and Reuse of glass Cullet: Proceedings of International Symposium*. 19–20 March 2001. Dundee UK, pp. 167–177.
10. Павлушкин Т.К., Киселенко Н.Г. Использование стекольного боя в производстве строительных материалов // *Стекло и керамика*. 2011. № 5. С. 27–34.
11. Минько Н.И., Калатози В.В. Использование стеклобоя в технологии материалов строительного назначения // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2018. № 1. С. 82–86.
12. Chuprova L.V., Mishurina O.A. Ecological and economic aspects of waste recycling of glass. *International Journal of Applied and Fundamental Research*. 2016. No. 11, pp. 222–225.
13. Зайцев Е.И. Строительные безобжиговые композиты на основе боя технических стекол // *Российский химический журнал*. 2003. Т. XLVII. № 4. С. 26–31.
14. Miller I.J., Bailey M.D. Uses for waste glass a survey. *Report*. 1981. No. 2289, p. 33.

8. Rossomagina A.S., Puzanov I.S. Development of stack loboy recycling processes by creating composite materials. *Ecological and economic problems of mineral resources development Abstracts of the International Scientific Conference*. 2005, pp. 83–84. (In Russian).
9. Meland I., Dahl P.A., Recycling glass cullet as concrete aggregates, applicability and durability. *Recycling and Reuse of Glass Cullet: Proceedings of International Symposium*. 19–20 March 2001. Dundee UK, pp. 167–177.
10. Pavlushkin T.K., Kiselenko N.G. The use of glass breakage in the production of building materials. *Steklo I Keramika*. 2011. No. 5, pp. 27–34. (In Russian)
11. Minko N.I., Kalatozi V.V. The use of cullet in the technology of materials for construction purposes. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2018. No. 1, pp. 82–86. (In Russian).
12. Chuprova L.V., Mishurina O.A. Ecological and economic aspects of waste recycling of glass. *International Journal of Applied and Fundamental Research*. 2016. No. 11, pp. 222–225.
13. Zaitsev E.I. Construction unburned composites based on the cullet of technical glasses. *Rossiiskii khimicheskii zhurnal*. 2003. Vol. XLVII. No. 4, pp. 26–31. (In Russian).
14. Miller I.J., Bailey M.D. Uses for waste glass a survey. *Report*. 1981. No. 2289. p. 33.

УДК 666.973.2
DOI: https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-770-5-57-61

Г.И. ЯКОВЛЕВ[1], д-р техн. наук (gyakov@istu.ru), Д.А. КАЛАБИНА[1], магистр (4450539@gmail.com), В.П. ГРАХОВ[1], д-р экон. наук (rector@istu.ru); А.Ф. БУРЬЯНОВ[2], д-р техн. наук (rga-service@mail.ru); А.Ф. ГОРДИНА[1], канд. техн. наук (gism56@mail.ru), К.А. БАЖЕНОВ[1], магистрант (Kirillbazhenov100@gmail.com); С.В. НИКИТИНА[3], инженер (nisv@palitra.udm.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)
[3] ООО «Новый дом» (426053, г. Ижевск, ул. Салютовская, 31)

Фторангидритовые композиции с легким заполнителем на основе вспученного перлитового песка

Изучена зависимость физико-механических свойств композиции на основе высокопрочного ангидритового вяжущего от концентрации легкого заполнителя, в качестве которого использовался вспученный перлитовый песок. Определено оптимальное соотношение заполнителя и вяжущего по совокупности трех основных показателей: прочность образца при сжатии, средняя плотность и коэффициент теплопроводности. Проведена оценка влияния на физико-механические характеристики композиции использования трех модифицирующих компонентов: воздухововлекающей добавки, грунтовки с нанодобавкой и смачивателя. Исследования показали, что существенное влияние на свойства композиции оказало введение воздухововлекающей добавки, повысившей прочность при сжатии в возрасте 7 сут с 1,34 до 2,07 МПа, а также смачивателя, который позволил добиться снижения плотности материала с 891 до 695 кг/м^3. Разработанная фторангидритовая композиция с легким заполнителем на основе вспученного перлитового песка с учетом ее физико-механических показателей может быть использована в качестве эффективного конструкционно-теплоизоляционного материала при производстве пазогребневых плит, блоков для возведения конструкций внутри зданий и сооружений.

Ключевые слова: фторангидрит, вспученный перлит, смачиватель, легкий заполнитель, дисперсионный анализ, композиционный материал.

Исследование выполнено в рамках государственного задания по заказу Министерства образования Российской Федерации (проект № 16.7823.2017/7.8) при финансовой поддержке со стороны Ижевского государственного технического университета им. М.Т. Калашникова (08.06.01/18YGI).

Для цитирования: Яковлев Г.И., Калабина Д.А., Грахов В.П., Бурьянов А.Ф., Гордина А.Ф., Баженов К.А., Никитина С.В. Фторангидритовые композиции с легким заполнителем на основе вспученного перлитового песка // *Строительные материалы*. 2019. № 5. С. 57–61. DOI: https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-770-5-57-61

G.I. YAKOVLEV[1], Doctor of Sciences (Engineering) (gyakov@istu.ru), D.A. KALABINA[1], graduate student (4450539@gmail.com), V.P. GRAKHOV[1], Doctor of Sciences (Economics) (rector@istu.ru); A.F. BURYANOV[2], Doctor of Sciences (Engineering) (rga-service@mail.ru); A.F. GORDINA[1], Candidate of Sciences (Engineering) (gism56@mail.ru), K.A. BAZHENOV[1], Student (Kirillbazhenov100@gmail.com); S.V. NIKITINA[3], Engineer (nisv@palitra.udm.ru)

[1] Kalashnikov Izhevsk State Technical University (7, Studencheskaya Street, Izhevsk, 426069, Russian Federation)
[2] National Research Moscow State University of Civil Engineering (26, Yaroslavskoe Highway, Moscow, 129337, Russian Federation)
[3] "Novi Dom" OOO (31, Salutovskaya Street, Izhevsk, 426053, Russian Federation)

Fluoro-Anhydrite Compositions with a Light Filler Based on Expanded Perlite Sand

The dependence of the physical and mechanical properties of the composition on the basis of high-strength anhydrite binder on the concentration of light filler, as which the expanded perlite sand was used, was studied. The optimal ratio of filler and binder is determined by the combination of three main parameters: the compressive strength of the sample, the average density and the thermal conductivity coefficient. The assessment of the influence of the use of three modifying components: air-entraining admixture, primer with nano-additive and wetting agent on the physical and mechanical characteristics of the composition is carried out. Studies have shown that a significant impact on the properties of the composition had the introduction of an air entraining admixture, which increased the compressive strength at the age of 7 days from 1.34 to 2.07 MPa, as well as a wetting agent, which made it possible to reduce the density of the material from 891 to 695 kg/m^3. The fluoro-anhydrite composition developed with a light filler on the basis of expanded perlite sand, with due regard for its physical and mechanical characteristics, can be used as an effective structural and thermal insulation material in the production of tongue-and-groove slabs, blocks for the construction of structures inside buildings and structures.

Keywords: fluoro-anhydrite, expanded perlite, wetting agent, light filler, disperse analysis, composite material.

The study was carried out within the framework of the state task commissioned by the Ministry of Education of the Russian Federation (project № 16.7823.2017/7.8) with financial support of Kalashnikov Izhevsk State Technical University (08.06.01/18YGI).

For citation: Yakovlev G.I., Kalabina D.A., Grakhov V.P., Buryanov A.F., Gordina A.F., Bazhenov K.A., Nikitina S.V. Fluoro-anhydrite compositions with a light filler based on expanded perlite sand. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2019. No. 5, pp. 57–61. (In Russian). DOI: https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-770-5-57-61

Задачей современного строительного материаловедения является наращивание объемов использования вторичного сырья при производстве строительных материалов для улучшения экологической обстановки в местах отвалов и снижения себестоимости готового продукта. Дешевой заменой природного гипса являются отходы различных производств, таких как фосфогипс [1–4]; красный гипс [5, 6]; гипс, образующийся при десульфуризации дымовых газов [7, 8], и фторангидрит, образующийся при производстве плавиковой кислоты. Несмотря на экологичность гипса, его применение в строительстве остается достаточно узким. Чаще всего он используется в виде внутренних штукатурок, гипсокартонных плит

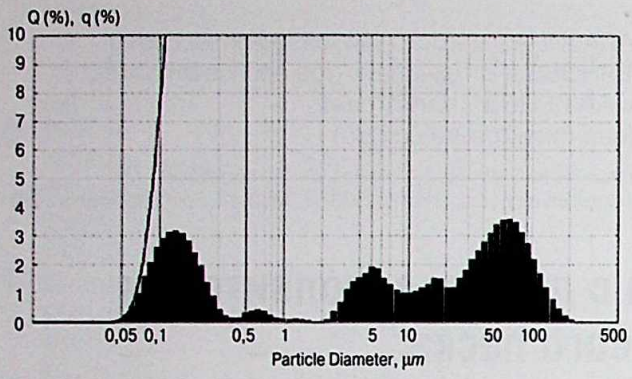


Рис. 1. Дисперсионный анализ фторангидрита

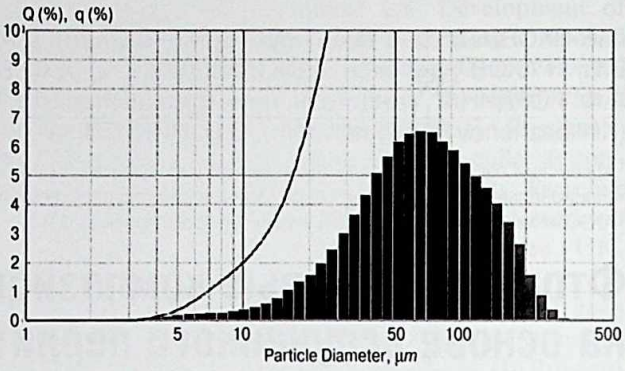


Рис. 2. Дисперсионный анализ вспученного перлита

и блоков для устройства перегородок. Однако потенциал применения гипса намного шире. Гипсовые блоки могут также использоваться в качестве наружных несущих элементов при надлежащей гидрофобизации [9, 10]. Другим перспективным способом применения является разработка композиций из поризованного гипса, который может быть получен как вспененный или вспученный гипсовый раствор, в котором пористая структура формируется химическими добавками [11, 12], или с использованием легких заполнителей [13, 14].

Для достижения поставленной задачи при исследовании вспененных гипсовых смесей [11] применялся сульфат алюминия в качестве газообразующей добавки. При этом средняя плотность составила 694 кг/м^3, прочность при сжатии 0,63 МПа. Вспученный гипс с бикарбонатом аммония имел объемную плотность 756 кг/м^3 и прочность при сжатии 0,35 МПа.

В работе [12] приведена информация о разработке поризованных гипсовых материалов со средней плотностью от 200 до 700 кг/м^3. Состав при плотности 500 кг/м^3 обеспечил теплопроводность 0,16 Вт/м·°С и прочность при сжатии 0,7 МПа.

В статье [15] приводится решение для производства легких гипсовых композитов на основе матрицы высокой плотности со вспученным перлитом в качестве сверхлегкого заполнителя. Вяжущее изготавливалось на основе гипсового отхода, образующегося при десульфуризации дымовых газов. В качестве кислотного газообразующего компонента использовали жидкий кислотный агент, полученный из сульфата алюминия и лимонной кислоты, растворенной в воде [16]. При добавлении 20% перлита от массы гипса средняя плотность материала снизилась до 300 кг/м^3, коэффициент теплопроводности – до 0,08 Вт/м·К, при этом прочность при сжатии уменьшилась до 0,3 МПа. При добавлении 5% перлита от массы гипса средняя плотность материала составила 547 кг/м^3 при прочности 2 МПа и коэффициенте теплопроводности 0,12 Вт/м·К.

Задачей данного исследования являлось изучение зависимости физико-механических свойств фторангидритовой композиции от содержания вспученного перлитового песка, оптимизация состава композиции при использовании трех типов добавок, модифицирующих поверхность перлитового песка: воздухововлекающей добавки, смачивателя и грунтовки с нанодобавкой.

Характеристики используемых материалов

Композиции выполнялись на основе высокопрочного ангидритового вяжущего, приготавливаемого в соответствии с работой [17] при добавлении 45, 65 и 85% вспученного перлитового песка по объему сухого вещества в качестве сверхлегкого заполнителя.

Высокопрочное вяжущее изготавливалось из порошкообразного фторангидрита – отхода производства плавиковой кислоты компании «ГалоПолимер», соответствующего ТУ 5744-132-05807960–98. Для активации процессов структурообразования фторангидрита использовался 3% водный раствор фосфата натрия Na_3PO_4.

Химический состав фторангидрита представлен в табл. 1.

Анализ дисперсности фторангидрита, проведенный на лазерном анализаторе SALD-7500nano Shimadzu, показал, что средний диаметр частиц составляет 10,5 мкм (рис. 1). Необходимо отметить наличие в составе фторангидрита нанодисперсной составляющей со средним размером частиц 140 нм.

В качестве сверхлегкого заполнителя использовался вспученный перлитовый песок (ГОСТ 10832–2009 «Песок и щебень перлитовые вспученные. Технические условия») с насыпной плотностью 98,9 кг/м^3. Химический состав вспученного перлитового песка приведен в табл. 2.

Таблица 1

Химический состав фторангидрита, % (Сертификат качества № 921/2/124398. Фторангидрит. Компания «ГалоПолимер»)

CaO	SO_3	CaF_2	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3
35–36,5	Не менее 45	2,2–5	2,6–3,4	0,5–0,7	0,2–0,95

Таблица 2

Химический состав вспученного перлитового песка, %

SiO_2	Al_2O_3	K_2O	TiO_2	$CaO + Mg_2O + Fe_2O_3$
73	15	4,7	5	2,3

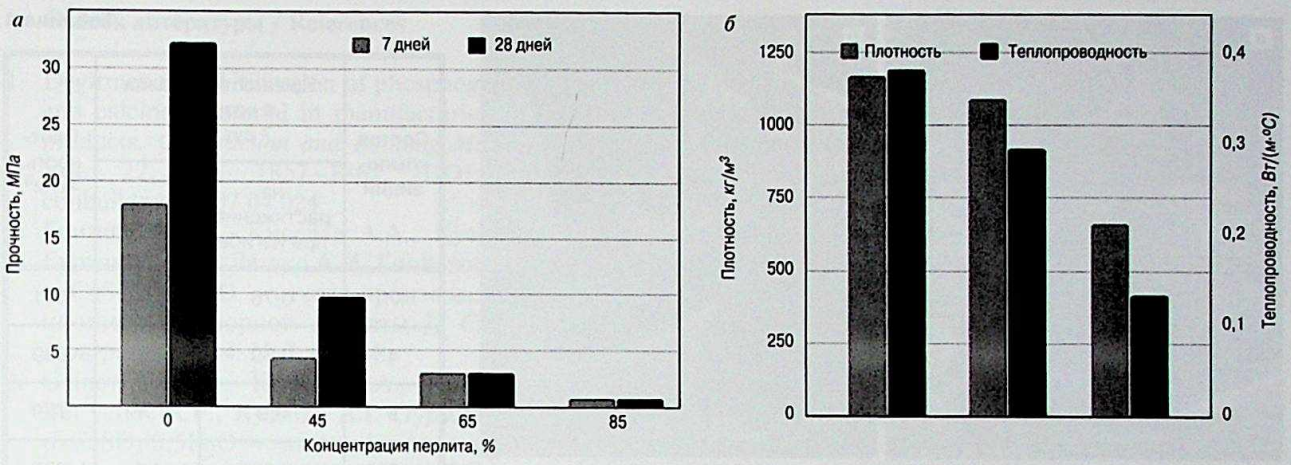


Рис. 3. Зависимость прочности при сжатии от концентрации перлита (*а*); зависимость плотности и теплопроводности от концентрации перлита (*б*)

Таблица 3

Состав композиции	Прочность, МПа				Плотность, кг/м³	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°С)
	на растяжение при изгибе		при сжатии			
	7 сут	28 сут	7 сут	28 сут		
К	5,92	9,66	18,99	32,4	2023	0,725
1	1,2	2,92	4,29	9,83	1170	0,382
2	1,26	1,27	3,04	–*	1090	0,295
3	0,37	0,43	0,77	–*	660	0,134

Примечание. * Прочность не установлена вследствие формования очень жесткой смеси.

По результатам дисперсионного анализа (рис. 2) было установлено, что средний размер частиц вспученного перлитового песка составляет 65 мкм, до 72% частиц вспученного песка имеют размеры до 100 мкм.

Результаты исследований и их обсуждение

Оптимизация состава композиции с заполнителем на основе вспученного перлитового песка. Для изучения зависимости физико-механических свойств материала от концентрации перлита и подбора оптимального соотношения заполнитель/вяжущее приготавливались три композиции на основе высокопрочного фторангидритового вяжущего с добавлением 45 (композиция № 1), 65 (композиция № 2) и 85% (композиция № 3) вспученного перлита (по объему сухого вещества), а также контрольный образец вяжущего (К) (табл. 3). Повышение концентрации вспученного перлита сверх 85% является нецелесообразным, так как приводит к разрушению образцов при их распалубке.

С целью обеспечения лучшего сцепления вспученный перлитовый песок вводился в предварительно приготовленный раствор на основе фторангидрита, затворенного 3% водным раствором фосфата натрия Na_3PO_4. Полученная смесь укладывалась в формы с размерами 40×40×160 мм и твердела на воздухе. В процессе твердения структура композиции формировалась за счет гидратации фторангидрита с образованием вяжущей матрицы на основе двуводного гипса.

Результаты физико-механических испытаний приведены в табл. 3.

Зависимость физико-механических характеристик разработанных композиций от содержания вспученного перлита приведена на диаграммах (рис. 3, *а, б*).

Следовательно, можно сделать вывод, что оптимальное соотношение легкого заполнителя и фторангидритового вяжущего находится в диапазоне содержания вспученного перлита между 65 и 85%. При содержании вспученного перлита 85% и выше показатели теплопроводности улучшаются, однако при этом значительно снижается прочность материала при сжатии. При содержании перлитового песка ниже 65% композиции обладают лучшими прочностными показателями, в то же время показатели средней плотности и теплопроводности соответствуют требованиям нормативных документов на конструкционно-теплоизоляционные материалы (ГОСТ 31913–2011 «Материалы и изделия теплоизоляционные. Термины и определения»), которым отвечает состав с содержанием перлитового песка в количестве 45% от объема сухого вещества.

Анализ микроструктуры образца № 1 с содержанием перлита 45% по объему сухого вещества, выполненный на микроскопе MIRA3 TESCAN в исследовательском центре AdMaS Технического университета Брно, позволил установить взаимосвязь между вяжущей матрицей и поверхностью вспученного перлита (рис. 4, *а*) при наличии физико-химического

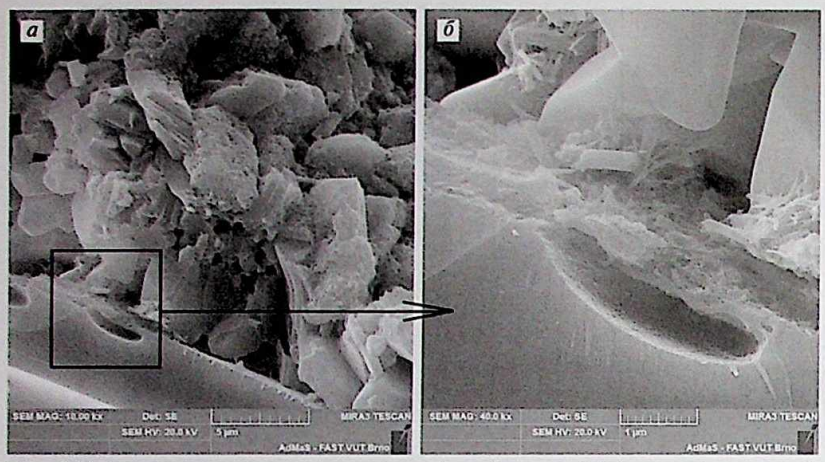


Рис. 4. Микроструктура композиции в зоне межфазной границы (*а*); формирование новообразований на поверхности вспученного перлита (*б*)

Таблица 4

Состав композиции	Прочность образца в возрасте 7 сут, МПа		Плотность, кг/м^3
	на растяжение при изгибе	при сжатии	
К1	0,76	1,34	891
4	0,79	2,07	889
5	0,9	1,49	729
6	0,62	1,2	695

взаимодействия между ними. На рис. 4, *б* отмечено химическое взаимодействие вяжущего на межфазной границе между перлитом и фторангидритовой матрицей с формированием новообразований игольчатого типа [19].

Легкие фторангидритовые композиции с модификацией поверхности вспученного перлита. Для улучшения физико-механических показателей композиции производилась модификация поверхности вспученного перлитового песка с использованием поверхностно-активных веществ производства чешской фирмы Stachema: воздухововлекающая добавка Poralan STA; смачиватель Altarau S8; грунтовка с нанодобавкой марки Peneco Nano. По результатам оптимизации исследования был выбран диапазон оптимального соотношения между вспученным перлитом и фторангидритом 70:30% соответственно.

Воздухововлекающая добавка в количестве 0,5% от общей массы вводилась непосредственно во фторангидритовое тесто. Смачиватель (1% раствор) и грунтовка (50% раствор) использовались в виде водного раствора, напыляемого на поверхность частиц перлита с последующей сушкой в сушильной печи при температуре +65°С.

Наименование композиций:

К1 – контрольный состав композиции, содержащий 70% вспученного перлита, введенного во фторангидритовое вяжущее (фторангидрит, затворенный 3% водным раствором фосфата натрия);

№ 4 – композиция К1 с введением воздухововлекающей добавки;

№ 5 – композиция К1 с использованием грунтовки;

№ 6 – композиция К1 с использованием смачивателя.

Результаты испытаний образцов приведены в табл. 4.

Из представленных в табл. 4 данных можно заключить, что воздухововлекающая добавка, несмотря на воздухововлечение в структуру вяжущей фторангидритовой матрицы, одновременно пластифицировала раствор, обеспечив повышение прочности материала при сжатии на 54,5%. Введение грунтовки понизило плотность образца на 18,2% и повысило прочность композиции на растяжение при изгибе на 18,4% в сравнении с контрольным составом. Использование смачивателя позволило снизить плотность композиции на 22%.

Рис. 5. Влияние модифицирующих добавок на свойства композиции

Влияние модифицирующих добавок на физико-механические характеристики полученного материала представлено на диаграмме (рис. 5).

Заключение

Таким образом, разработанная фторангидритовая композиция с легким заполнителем на основе вспученного перлитового песка по физико-механическим показателям может быть использована в качестве эффективного конструкционно-теплоизоляционного материала при производстве пазогребневых плит, блоков для возведения конструкций внутри зданий и сооружений. При этом характеристики композиции можно значительно улучшить использованием модифицирующих поверхностно-активных веществ в виде воздухововлекающей добавки, существенно повысившей прочность при сжатии образца в возрасте 7 сут и смачивателя, способствующего снижению плотности материала.

Список литературы / References

1. Degirmenci N. Utilization of phosphogypsum as raw and calcined material in manufacturing of building products. *Construction and Building Materials*. 2008. Vol. 22, pp. 1857–1862. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2007.04.024
2. Гриневич А.В., Киселев А.А., Кузнецов Е.М., Бурьянов А.Ф., Ряшко А.И. Гипсовое вяжущее из α-$CaSO_4 \cdot 0{,}5H_2O$ – отхода производства экстракционной фосфорной кислоты // *Строительные материалы*. 2014. № 7. С. 4–8.
2. Grinevich A.V., Kiselev A.A., Kuznetsov E.M., Bur'yanov A.F., Ryashko A.I. Gypsum binder from α-$CaSO_4 \cdot 0{,}5H_2O$ – waste of extraction phosphoric acid production. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2014. No. 7, pp. 4–8. (In Russian).
3. Garg M, Jain N, Singh M. Development of alpha plaster from phosphogypsum for cementitious binders. *Construction and Building Materials*. 2009. Vol. 23 (10), pp. 3138–3143. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2009.06.024
4. Орешкин Д.В. Экологические проблемы комплексного освоения недр при масштабной утилизации техногенных минеральных ресурсов и отходов в производстве строительных материалов // *Строительные материалы*. 2017. № 8. С. 55–63.
4. Oreshkin D.V. Environmental problems of comprehensive exploitation of mineral resources when largescale utilization of manmade mineral resources and waste in the production of building materials. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2017. No.8, pp.55–63. DOI: https://doi.org/10.31659/0585-430X-2017-751-8-55-63 (In Russian).
5. Hughes P., Glendinning S. Deep dry mix ground improvement of a soft peaty clay using blast furnace slag and red gypsum. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*. 2004. Vol. 37 (3), pp. 205–216. DOI: 10.1144/1470-9236/04-003
6. Fauziah I., Zauyah S., Jamal T. Characterization and land application of red gypsum: a waste product from the titanium dioxide industry. *Science of Total Environment*. 1996. Vol. 188, pp. 243–251. DOI: 10.1016/0048-9697(96)05179-0
7. Tesárek Pavel, Drchalová Jaroslava, Kolísko Jiří, Rovnaníková Pavla, Černý Robert. Flue gas desulfurization gypsum: study of basic mechanical, hydric and thermal properties. *Construction and Building Materials*. 2007. Vol. 21, pp. 1500–1509. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2006.05.009
8. Xiao Lu Guo, Hui Sheng Shi Thermal treatment and utilization of flue gas desulphurization gypsum as an admixture in cement and concrete. *Construction and Building Materials*. 2008. Vol. 22, pp. 1471–1476. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2007.04.001
9. Tesárek P., Rovnaníková P., Kolísko J., Černý R. Właściwości hydrofobowego gipsu z odsiarczania spalin [Properties of hydrophobized FGD gypsum]. *Cement-wapno-beton*. 2005. Vol. 5, pp. 255–264 (In Polish)
10. Гордина А.Ф., Яковлев Г.И., Полянских И.С., Керене Я., Фишер Х.Б., Рахимова Н.Р., Бурьянов А.Ф. Гипсовые композиции с комплексными модификаторами структуры // *Строительные материалы*. 2016. № 1–2. С. 90–95.
10. Gordina A.F., Yakovlev G.I., Polyanskikh I.S., Kerene Ya., Fisher Kh.B., Rakhimova N.R., Bur'yanov A.F. Gypsum compositions with complex modifiers of structure. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2016. No. 1–2, pp. 90–95. https://doi.org/10.31659/0585-430X-2016-733-734-1-2-90-95
11. Colak A. Density and strength characteristics of foamed gypsum. *Cement & Concrete Composites*. 2000. Vol. 22, pp. 193–200.
12. Skujans J., Vulans A., Iljins U., Aboltins A. Measurements of heat transfer of multi-layered wall construction with foam gypsum. *Applied Thermal Engineering*. 2007. Vol. 27, pp. 1219–1224. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2006.02.047
13. Sayil B., Gurdal E. The physical properties of polystyrene aggregated gypsum blocks. Edited by Lacasse M.A., Vainer D.J. *Proceedings of 8th international conference on durability of building materials and components*. Canada: Vancouver. 1999, pp. 496–504 http://www.irbnet.de/daten/iconda/CIB1966.pdf
14. Santos A.G. PPF-reinforced, ESP-lightened gypsum plaster. *Materiales de Construccion*. 2009. Vol. 59, pp. 105–124. https://doi.org/10.3989/mc.2009.41107
15. Vimmrová Alena, Keppert Martin, Svoboda Luboš, Černý Robert Lightweight gypsum composites: Design strategies for multi-functionality. *Cement and Concrete Composites*. 2011. Vol. 33, Iss. 1, pp. 84–89. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2010.09.011
16. Svoboda L., Vimmrová A. Acid agent for preparation of foamed gypsum. Czech utility design no. 17844. Prague. 2007.
17. Yakovlev G.I.,Tulegenova A.V., Pervushin G.N., Keriene J., Gordina A.F., Bazhenov K.A., Ali Elsayed Elrefaei. Multifunctional admixture used for activating fluoroanhydrite. *20th International Building Materials Conference «Ibausil»*. 12–14 September 2018. Weimar, Germany. Band 2, pp. 559–568.
18. Яковлев Г.И., Первушин Г.Н., Грахов В.П., Калабина Д.А., Гордина А.Ф., Гинчицкая Ю.Н., Баженов К.А., Трошкова В.В., Дрохитка Р., Хозин В.Г. Конструкционно-теплоизоляционный материал на основе высокопрочного ангидритового вяжущего // *Интеллектуальные системы в производстве*. 2019. Т. 17. № 1. С. 144–151. DOI: 10.22213/2410-9304-2019-1-144-151
18. Yakovlev G.I., Pervushin G.N., Grakhov V.P., Kalabina D.A., Gordina A.F., Ginchitskaya Yu.N., Bazhenov K.A., Troshkova V.V., Drokhitka R., Khozin V.G. Constructional and thermal insulation material based on high-strength anhydrite binder. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve*. 2019. Vol. 17. No. 1, pp. 144–151. DOI: 10.22213/2410-9304-2019-1-144-151 (In Russian).

УДК 676.022
DOI: https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-770-5-62-66

А.А. АСКАДСКИЙ[1, 2], д-р хим. наук (andrey@ineos.ac.ru),
Т.А. МАЦЕЕВИЧ[1], д-р физ.-мат. наук (tmats@rambler.ru);
В.И. КОНДРАЩЕНКО[3], д-р техн. наук (kondrashchenko@mail.ru)

[1] Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (129337, г. Москва, Ярославское ш., 26)
[2] Институт элементоорганических соединений им. А.Н. Несмеянова РАН (119991, г. Москва, ул. Вавилова, 28)
[3] Российский университет транспорта (127994, г. Москва, ул. Образцова, 9, стр. 9)

Водопоглощение древесно-полимерных композитов на основе ПВХ с частичной заменой древесного наполнителя на минеральный

Получены материалы древесно-полимерных композитов (ДПК) в виде террасных досок, в которых древесный наполнитель частично заменен на минеральный. Материалы из ДПК с использованием матричного полимера поливинилхлорида (ПВХ) обладают хорошими механическими свойствами, малой истираемостью и устойчивостью к климатическим воздействиям. Однако они обладают относительно большим водопоглощением, задача снижения которого является актуальной не только в России, но и в других странах, где идет строительство сооружений, работающих в наружных условиях окружающей среды. Модификация таких материалов в данной работе осуществлялась путем замены части древесного наполнителя на минеральный наполнитель $CaCO_3$ (мел). Частичная замена древесной муки на мел привела к заметному снижению набухания от 1,25 до 0,01%. При этом модуль упругости повышается от 2260 до 2880 МПа, прочность при растяжении изменяется от 30,5 до 16,7–32 МПа. Удельная ударная вязкость несколько снижается от 8,9 до 7,74 кДж/м^2. Оптимальное соотношение древесного и минерального наполнителей составляет 60/40%.

Ключевые слова: древесно-полимерные композиты, террасные доски, механические свойства, термические свойства, водопоглощение.

Для цитирования: Аскадский А.А., Мацеевич Т.А., Кондращенко В.И. Водопоглощение древесно-полимерных композитов на основе ПВХ с частичной заменой древесного наполнителя на минеральный // *Строительные материалы*. 2019. № 5. С. 62–66. DOI: https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-770-5-62-66

A.A. ASKADSKII[1, 2], Doctor of Sciences (Chemistry) (andrey@ineos.ac.ru), T.A. MATSEEVICH[1], Doctor of Sciences (Physics and Mathematics) (tmats@rambler.ru); V.I. KONDRASHCHENKO[3], Doctor of Sciences (Engineering) (kondrashchenko@mail.ru)
[1] National Research Moscow State University of Civil Engineering (26, Yaroslavskoe Highway, Moscow, 129337, Russian Federation)
[2] A.N. Nesmeyanov Institute of Organoelement Compounds of Russian Academy of Sciences (INEOS RAS) (28, Vavilova Street, Moscow, 119991, Russian Federation)
[3] Russian University of Transport (9, Build. 9, Obraztsova Street, 127994, Moscow, Russian Federation)

Water Absorption of Wood-Polymer Composites Based on PVC with Partial Replacement of Wood Filler by Mineral One

The materials of wood-polymer composites (WPC) in the form of terrace boards, in which the wood filler is partially replaced by mineral one, are obtained. Materials from WPC with the use of matrix polymer (polyvinyl chloride) (PVC) have good mechanical properties, low abradability and resistance to climatic impacts. However, they have a relatively large water absorption, the task of reducing which is relevant not only in Russia but also in other countries where constructing facilities operating under the external environmental conditions. Modification of such materials in this work was carried out by replacing part of the wood filler by a mineral filler $CaCO_3$ (chalk). Partial replacement of wood flour with chalk led to a noticeable decrease in swelling from 1.25 to 0.01%. Herewith, the modulus of elasticity is increased from 2260 to 2880 MPa, tensile strength varies from 30.5 to 16.7–32 MPa. The specific impact viscosity is slightly reduced from 8.9 to 7.74 kJ/m^2. The optimal ratio of wood and mineral fillers is 60/40%.

Keywords: wood-polymer composites, decking boards, mechanical properties, thermal properties, water absorption.

For citation: Askadskii A.A., Matseevich T.A., Kondrashchenko V.I. Water absorption of wood-polymer composites based on PVC with partial replacement of wood filler by mineral one. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2019. No. 5, pp. 62–66. (In Russian). DOI: https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-770-5-62-66

Древесно-полимерные композиты (ДПК) находят все большее применение для изготовления изделий строительного назначения. Из них изготавливают полы террасных помещений, сайдинг, декоративные ограждения, заборные системы, ступени, универсальные профили, разные аксессуары и комплектующие. Все эти материалы работают в условиях климатических воздействий окружающей среды. Один из известных российских производителей изделий из ДПК в качестве матричного полимера использует поливинилхлорид (ПВХ), а в качестве наполнителя до последнего времени использует древесную муку. Исследование свойств этих материалов проводится совместно с Институтом элементо-органических соединений им. А.Н. Несмеянова РАН и Институтом химической физики им. Н.Н. Семенова РАН.

Свойства террасных досок изучены в работах [1–6]. Рассмотрены механические свойства – модуль упругости, прочность при растяжении, сжатии и изгибе, стойкость к растрескиванию, твердость и удельная ударная вязкость. В ряде работ исследованы ДПК на основе ПВХ [7–11], а способы изготовления ДПК изложены в работах [12–14]. Свойства в широком интервале температуры изложены в работе [15], а термические свойства, водопоглощение, твердость, истираемость, устойчивость к климатическим воздействиям, использование вторичных полимеров отражены в работе [16].

Сначала рассмотрим механические и термические свойства, а также водопоглощение стандартных

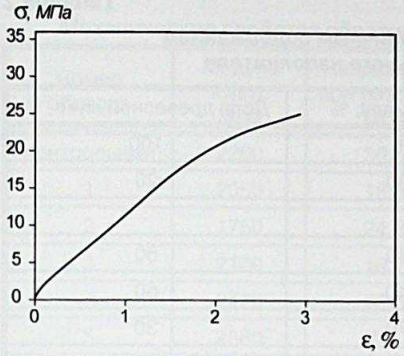


Рис. 1. Усредненная кривая растяжения стандартного образца ДПК, производимого компанией Savewood на основе матричного полимера ПВХ

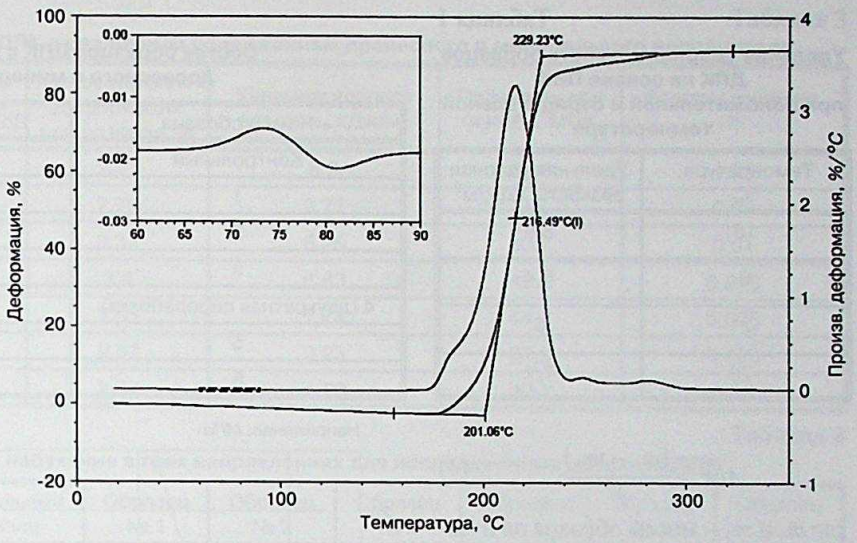


Рис. 2. Термомеханическая кривая и производная по деформации стандартного образца, производимого компанией Savewood. В верхнем левом углу показана производная по деформации в интервале температуры 60–90°C

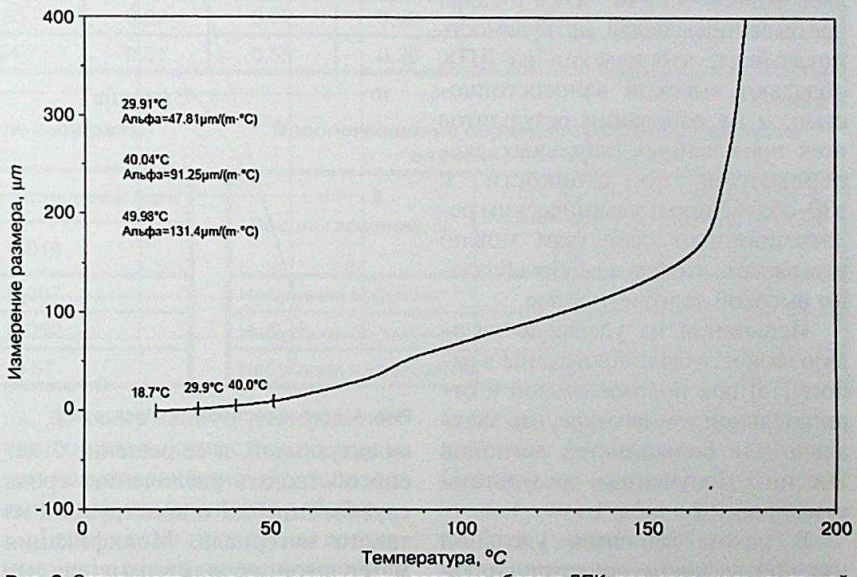


Рис. 3. Зависимость изменения размера стандартного образца ДПК, производимого компанией Savewood, от температуры и величины КЛТР в разных интервалах температуры

образцов ДПК. Ранее были проведены испытания и сравнение образцов ДПК [15, 16] разных отечественных и зарубежных производителей. Измеряли механические свойства (модуль упругости и прочность при растяжении и изгибе, удельную ударную вязкость, истираемость, твердость, термические характеристики, устойчивость к климатическим воздействиям). Среди термических характеристик температурные зависимости деформации при действии небольшой нагрузки на образец (термомеханические кривые), коэффициенты термического расширения и релаксационные переходы в широком интервале температуры. Среди климатических воздействий – действие УФ-облучения и влаги. Приведем краткое описание этих характеристик.

На рис. 1 показана усредненная кривая растяжения одного из образцов, производимых компанией Savewood. Измерение проводилось на универсальной испытательной машине LLOID Instrument LR5K Plus при комнатной температуре и скорости растяжения 50 мм/мин. Определенный по начальному участку кривой растяжения модуль упругости составлял 1520 МПа; прочность при разрыве – 25 МПа; удлинение при разрыве – 2,9%.

Измерения термомеханических кривых проводились в работе [16] на приборе TMA Q400 (TAInstruments). Определялась зависимость деформации от температуры в условиях пенетрации пуансона в цилиндрический образец при росте температуры 5 град/мин. Диаметр пуансона составлял 2,5 мм, нагрузка на пуансон 10 г. На рис. 2 показана термомеханическая кривая стандартного образца, производимого компанией Savewood. Наблюдается релаксационный переход при 75°C, связанный с расстекловыванием ПВХ. Второй переход наблюдается при температуре около 200°C, связанный с размягчением лигнина, входящего в состав древесного наполнителя.

Для детального анализа коэффициента линейного термического расширения (КЛТР) на приборе TMA Q400 (TAInstruments) проводилось измерение размера образца при очень малой нагрузке на пуансон, равной 0,05 г [16]. Температурная зависимость изменения размеров стандартного образца показана на рис. 3 во всем исследованном интервале температуры. В интервале рабочей температуры от -30 до 50°C коэффициент термического расширения имеет значение от 63 до 120 мкм/(м·град), характерное для материалов, в которых полимер находится в стеклообразном или в частичнокристаллическом состоянии. Значения КЛТР приведены на рис. 3.

Истираемость в работе [16] определялась на машине барабанного типа, построенной в ИНЭОС РАН. Величина истираемости *Abr* оценивалась потерей первоначальной массы образца, отнесенной к площади поверхности истирания F:

Таблица 1

Удельная ударная вязкость образцов ДПК на основе ПВХ при положительной и отрицательной температуре

Температура, °С	Удельная ударная вязкость, кДж/м^2
18	8,9
0	6,4
-21	6
-70	7,1

$$Abr = \frac{(m_1 - m_2)}{F}, \qquad (1)$$

где m_1 и m_2 – массы образца до и после истирания соответственно.

Величина истираемости оказалась равной $9{,}29 \cdot 10^{-5}$ г/см^2. Такая чрезвычайная малая истираемость показывает, что изделия из ДПК обладают высокой износостойкостью, и на основании результатов всех проделанных остальных экспериментов по стойкости к УФ-облучению и механическим релаксационным свойствам можно утверждать, что эти изделия обладают высокой долговечностью.

Испытания на удельную ударную вязкость были проведены в работе [15] при положительной и отрицательной температуре, что актуально для большинства регионов России. Полученные результаты суммированы в табл. 1.

В целом величина удельной ударной вязкости при отрицательной температуре показывает, что разрушение при ударе не является хрупким и находится на уровне большого количества полимерных материалов. Даже при -70°С сохраняется достаточно высокая удельная ударная вязкость, равная 7,1 кДж/м^2, практически сопоставимая со значениями при 0°С и -21°С, т. е. материал не обладает хрупкостью даже при такой низкой температуре.

Таким образом, ДПК на основе ПФХ обладают хорошими механическими свойствами, малой истираемостью и устойчивостью к климатическим воздействиям. Однако, как будет видно в дальнейшем, они обладают относительно большим водопоглощением. Поэтому задача снижения водопоглощения является актуальной, и ее решение будет способствовать увеличению срока службы изделий и конструкций из такого материала. Модификация материалов, используемых для исследований в данной работе, осуществлялась заменой части древесного наполнителя на минеральный, в качестве которого был выбран $CaCO_3$ (мел). Действительно, древесина заметно набухает при воздействии воды, что приводит к набуханию изделий из ДПК. Частичная замена древесной муки на минеральный наполнитель может привести к заметному снижению набухания, что и было подтверждено в данной работе. При этом могут ухудшаться некоторые механические свойства. Поэтому актуальной задачей является установление оптимального соотношения древесного и минерального наполнителей, что является основной задачей данной работы.

Таблица 2

Состав образцов ДПК с различным содержанием древесного и минерального наполнителя

Номер образца	Доля мела, %	Доля древесной муки, %
Контрольный	0	100
1	80	20
2	–	–
3	40	60
4 (двукратная переработка)	40	60
5	70	30
6	30	70

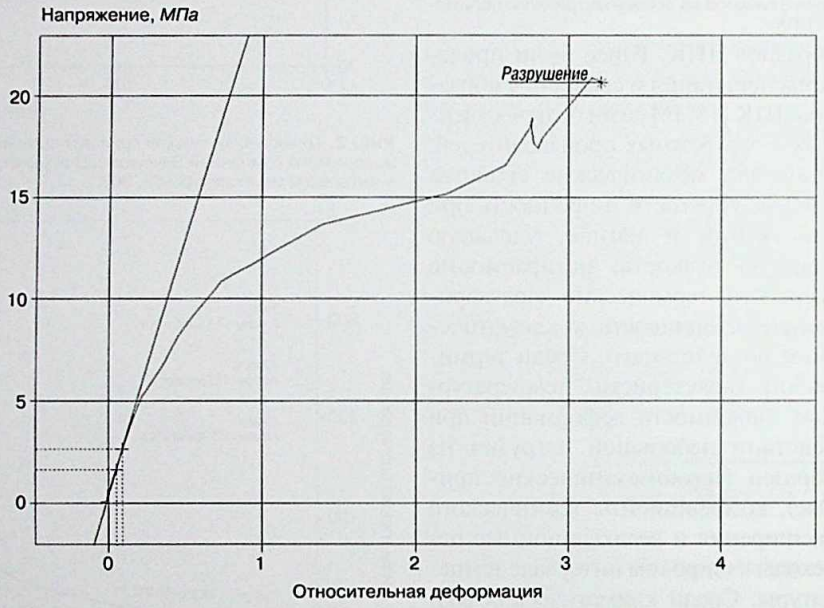


Рис. 4. Кривая растяжения образца № 3

Экспериментальная часть

Дальнейшее рассмотрение проведем путем сопоставления свойств стандартного образца ДПК (контрольный образец) со свойствами модифицированных образцов, полученных и исследованных в данной работе. В табл. 2 приведены составы образцов ДПК с различным содержанием древесного и минерального наполнителя.

Механические свойства

Получены кривые сжатия для всех образцов, представленных в табл. 2. В качестве примера кривая сжатия для образца № 3 показана на рис. 4.

Механические свойства образцов 1–6 приведены в табл. 3.

Водопоглощение

Исследование проводилось согласно ГОСТ 4650–80 «Пластмассы. Методы определения водопоглощения». Были изготовлены образ-

Таблица 3

Механические свойства образцов ДПК с различным содержанием древесного и минерального наполнителя

Номер образца	Модуль Юнга, МПа	Напряжение при разрыве, МПа	Относительная Деформация при разрыве, %	Удельная ударная вязкость, кДж/м^2	Прочность при изгибе, МПа	Водопоглощение, %
Контрольный	2260	30,5	2,47	8,9	63,9	1,25
1	2050	18,8	2,73	3,71	25	0,08
2	1750	24,8	3,37	6,25	43,7	0,01
3	2160	16,7	3,4	6,83	48,1	0,013
4	2420	23,5	2,65	7,74	64,8	0,005
5	2880	32	2,57	3,23	31,8	0,025
6	2680	26	2,07	4,23	42,7	0,98

Таблица 4

Значения водопоглощения и набухания в трех направлениях для исследованных образцов ДПК

Водопоглощение, %	Контрольный образец	Образец № 1	Образец № 2	Образец № 3	Образец № 4	Образец № 5	Образец № 6
	1,25	0,08	0,01	0,013	0,005	0,025	0,98
Набухание по длине, %	0,12	0,02	0,04	0,02	0,004	0,014	0,06
Набухание по ширине, %	0,165	0,02	0,02	0,02	0,008	0,018	0,12
Набухание по толщине, %	0,94	0,31	0,55	0,28	0,47	0,11	0,68

Таблица 5

Водопоглощение образцов ДПК после выдержки в течение 84 ч (3,5 сут)

Водопоглощение, %	Образец № 4 толщиной 5 мм
	0,016
Набухание по длине	0,007
Набухание по ширине	0,052
Набухание по толщине	0,67

Таблица 6

Водопоглощение образцов ДПК после выдержки в течение 264 ч (11 сут)

Водопоглощение, %	Образец № 3 толщиной 3 мм	Образец № 4 толщиной 5 мм
	0,06	0,03
Набухание по длине	0,10	0,01
Набухание по ширине	0,10	0,06
Набухание по толщине	0,84	0,87

цы в форме квадрата со стороной 50±1 мм и толщиной, равной толщине материала. Поверхность срезов была гладкой.

Перед испытанием образцы высушивали при 50±2°С в течение 24±1 ч, а затем охлаждали в эксикаторе над осушителем при 23±2°С. После охлаждения образцы были вынуты из эксикатора, взвешены, измерены длина, ширина и толщина. Затем образцы были погружены в дистиллированную воду и выдержаны при 23±2°С в течение 24±1 ч. После этого образцы были извлечены из воды, протерты чистой сухой тканью и снова взвешены и измерены по длине, ширине и толщине.

Результаты проведенных испытаний приведены в сравнительной табл. 4

Выводы

Первый вывод заключается в том, что общая величина водопоглощения для контрольного образца, не содержащего минерального наполнителя, существенно выше, чем водопоглощение образцов, содержащих минеральную добавку.

Были также проведены детальные измерения водопоглощения по длине, ширине и толщине. Во всех случаях водопоглощение по различным направлениям, оцененное по изменению размеров образца после выдержки в воде, всегда меньше у образцов, содержащих минеральные добавки.

Проведены также эксперименты по водопоглощению и набуханию в течение различного времени. Результаты измерений сведены в табл. 5 и 6. Видно, что длительное водопоглощение и набухание существенно меньше у модифицированных образцов, содержащих минеральный наполнитель, чем у стандартного образца при кратковременной выдержке в воде.

При оценке качества материалов необходимо учитывать не только величину водопоглощения, но и изменение других свойств в результате введения минеральной добавки. Согласно нашим измерениям, наилучшее сочетание механических свойств (модуль упругости, прочность при растяжении и изгибе, удлинение при разрыве, удельная ударная вязкость) и водопоглощения обнаруживает образец № 3. Этот образец содержит в качестве наполнителя 40% мела и 60% древесной муки. Данный образец обладает очень малым водопоглощением, превосходя по этой характеристике другие исследованные образцы или практически не уступая им.

Таким образом, для оптимизации эксплуатационных свойств ДПК на основе ПВХ при производстве можно рекомендовать соотношение компонентов наполнителя в виде 40% мела и 60% древесной муки, обеспечивающее существенное уменьшение водопоглощения при сохранении хороших механических характеристик.

Список литературы

1. Мороз П.А., Аскадский Ал.А., Мацеевич Т.А., Соловьева Е.В., Аскадский А.А. Применение вторичных полимеров для производства древесно-полимерных композитов // *Пластические массы*. 2017. № 9–10. С. 56–61.
2. Мацеевич Т.А., Аскадский А.А. Механические свойства террасной доски на основе полиэтилена, полипропилена и поливинилхлорида // *Строительство: Наука и образование*. 2017. Т. 7. Вып. 3 (24). С. 48–59.
3. Абушенко А.В., Воскобойников И.В., Кондратюк В.А. Производство изделий из ДПК // *Деловой журнал по деревообработке*. 2008. № 4. С. 88–94.
4. Ершова О.В., Чупрова Л.В., Муллина Э.Р., Мишурина О.А. Исследование зависимости свойств древесно-полимерных композитов от химического состава матрицы // *Современные проблемы науки и образования*. 2014. № 2. С. 26. https://www.science-education.ru/ru/article/view?id=12363
5. Клесов А.А. Древесно-полимерные композиты / Пер. с англ. А. Чмеля. СПб.: Научные основы и технологии. 2010. 736 с.
6. Walcott M.P., Englund K.A. A technology review of wood-plastic composites; 3 ed. N.Y.: Reihold Publ. Corp., 1999. 151 p.
7. Руководство по разработке композиций на основе ПВХ / Под. ред. Р.Ф. Гроссмана / Пер. с англ. под ред. В.В. Гузеева. СПб: Научные основы и технологии, 2009. 608 с.
8. Kickelbick G. Introduction to hybrid materials // Hybrid Materials: Synthesis, Characterization, and Applications / G. Kickelbick (ed.). Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2007. 498 p.
9. Уилки Ч., Саммерс Дж., Даниелс Ч. Поливинилхлорид / Пер. с англ. под ред. Г.Е. Заикова. СПб.: Профессия, 2007. 728 с.
10. Kokta B.V., Maldas D., Daneult C., Bland P. Composites of polyvinyl chloride-wood fibers // *Polymer-plastics Technology Engineering*. 1990. V. 29, pp 87–118.
11. Низамов Р.К. Поливинилхлоридные композиции строительного назначения с полифункциональными наполнителями. Дис. ... д-ра техн. наук. Казань, 2007. 369 с.
12. Stavrov V.P., Spiglazov A.V., Sviridenok A.I. Rheological parameters of molding thermoplastic composites high-filled with wood particles // *International Journal of Applied Mechanics and Enginnering*. 2007. Vol. 12. No. 2, pp 527–536.
13. Бурнашев А.И. Высоконаполненные поливинилхлоридные строительные материалы на основе наномодифицированной древесной муки. Дис. ... канд. техн. наук. Казань, 2011. 159 с.
14. Figovsky O., Borisov Yu., Beilin D. Nanostructured binder for acid-resisting building materials // *Scientific Israel – Technological Advantages*. 2012. Vol. 14. No. 1, pp. 7–12.
15. Мацеевич Т.А., Аскадский А.А. Террасные доски: состав, изготовление, свойства. Часть 1. Механические свойства // *Строительные материалы*. 2018. № 1–2. С. 101–105. DOI: https://doi.org/10.31659/0585-430X-2018-756-1-2-101-105
16. Мацеевич Т.А., Аскадский А.А. Террасные доски: состав, изготовление, свойства. Часть 2. Термические свойства, водопоглощение, истираемость, устойчивость к климатическим воздействиям, использование вторичных полимеров // *Строительные материалы*. 2018. № 3. С. 55–61. DOI: https://doi.org/10.31659/0585-430X-2018-757-3-55-61

References

1. Moroz P.A., Askadskiy Al.A., Matseyevich T.A., Solovyova E.V., Askadskiy A.A. Use of secondary polymers for production of wood and polymeric composites. *Plasticheskie massy*. 2017. No. 9–10, pp. 56–61. (In Russian).
2. Matseyevich T.A., Askadskiy A.A. Mechanical properties of a terrace board on the basis of polyethylene, polypropylene and polyvinylchloride. *Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie*. 2017. T. 7. No. 3, pp. 48–59. (In Russian).
3. Abushenko A.V., Voskoboinikov I.V., Kondratyuk V.A. Production of products from WPC. *Delovoi zhurnal po derevoobrabotke*. 2008. No. 4, pp. 88–94 (In Russian).
4. Yershova O.V., Chuprova L.V., Mullina E.R., Mishurina O.A. Research dependence of properties the wood and polymeric composites from the chemical composition of a matrix. Sovremennye problem nauki i obrazovaniya. 2014. No. 2, p. 26. https://www.science-education.ru/ru/article/view?id=12363 (In Russian).
5. Klesov A.A. Drevesno-polimernye kompozity / per. s angl. A.Chmelya. [Wood and polymeric composites / translation from English A.Chmel.]. Saint Petersburg. Scientific bases and technologies. 2010. 736 p.
6. Walcott M.P., Englund K.A. A technology review of wood-plastic composites; 3 ed. N.Y.: Reihold Publ. Corp., 1999. 151 p.
7. Under edition. R.F. Grossman; translation from English under the editorship of V.V. Guzeev. Rukovodstvo po razrabotke kompozitsii na osnove PVKh. [The guide to development of compositions on the basis of PVC]. Scientific bases and technologies. 2009. 608 p.
8. Kickelbick G. Introduction to hybrid materials. Hybrid Materials: Synthesis, Characterization, and Applications / G. Kickelbick (ed.). Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2007. 498 p.
9. Wilkie Ch., Summers J., Daniyels of H. Polivinilkhlorid / per. s angl. pod red. G.E. Zaikova. [The polyvinylchloride / translation from English under the editorship of G.E. Zaikov]. Saint Petersburg. Professiya. 2007. 728 p.
10. Kokta B.V., Maldas D., Daneult C., Bland P. Composites of polyvinyl chloride-wood fibers. *Polymer-plastics Technology Engineering*. 1990. Vol. 29, pp. 87–118.
11. Nizamov R.K. Polyvinylchloride compositions of construction appointment with multifunctional fillers. Diss. Doct. (Engineering). Kazan. 2007. 369 p. (In Russian).
12. Stavrov V.P., Spiglazov A.V., Sviridenok A.I. Rheological parameters of molding thermoplastic composites high-filled with wood particles. *International Journal of Applied Mechanics and Enginnering*. 2007. Vol. 12. No. 2, pp. 527–536.
13. Burnashev A.I. The high-filled polyvinylchloride construction materials on the basis of the nano-modified wood flour. Diss. Cand. (Engineering). Kazan. 2011. 159 p. (In Russian).
14. Figovsky O., Borisov Yu., Beilin D. Nanostructured binder for acid-resisting building materials. *Scientific Israel – Technological Advantages*. 2012. Vol. 14. No. 1, pp. 7–12.
15. Matseyevich T.A., Askadskiy A.A. Terrace boards: structure, production, properties. Part 1. Mechanical properties. *Stroitel'nye materialy* [Construction Materials]. 2018. No. 1–2, pp. 101–105. (In Russian). DOI: https://doi.org/10.31659/0585-430X-2018-756-1-2-101-105
16. Matseyevich T.A., Askadskiy A.A. Terrace boards: structure, production, properties. Part 2. Thermal properties, water absorption, abrasion, hardness, resistance to climatic influences, the use of recycled polymers. *Stroitel'nye materialy* [Construction Materials]. 2018. No. 3, pp. 55–61. (In Russian). DOI: https://doi.org/10.31659/0585-430X-2018-757-3-55-61

УДК 691.328.1
DOI: https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-770-5-67-72

Е.Е. ШАЛЫЙ[1], инженер (john_shamali@mail.ru);
С.Н. ЛЕОНОВИЧ[2], д-р техн. наук, иностранный академик РААСН (sleonovich@mail.ru);
Л.В. КИМ[1], канд. техн. наук (kimlv2@yandex.ru)

[1] Дальневосточный федеральный университет (690091, г. Владивосток, пос. Аякс, корп. 12, каб. Е920)
[2] Белорусский национальный технический университет (220013, Республика Беларусь, г. Минск, пр. Независимости, 65)

Деградация железобетонных конструкций морских сооружений от совместного воздействия карбонизации и хлоридной агрессии

Коррозия арматуры морских и прибрежных гидротехнических сооружений вследствие хлоридной агрессии и карбонизации бетона ведет к резкому снижению безопасности сооружения. Существующие методики проектирования не в полном объеме отражают реальные условия эксплуатации гидротехнических сооружений. Это особенно ярко проявляется в районах, где одновременное воздействие таких факторов, как низкая температура воздуха и большое число ясных дней в зимнее время при сильной солнечной радиации, приводит к резкому изменению реальных условий эксплуатации по сравнению с расчетными. Бетоны многих сооружений и конструкций испытывают большее число агрессивных воздействий, чем это предусматривается нормами проектирования. Вследствие таких воздействий арматура подвергается процессу депассивации, как только концентрация хлорида на ее поверхности превысит пороговую концентрацию, либо значение pH в защитном слое бетона уменьшится до порогового значения в результате карбонизации. При проникновении кислорода до поверхности арматуры реализуются электрохимические реакции с образованием продуктов коррозии. Это приводит к растрескиванию защитного слоя бетона, уменьшению площади сечения арматуры. В работе предложен метод прогнозирования комплексной деградации железобетонных конструкций прибрежных сооружений с учетом различных механизмов коррозионного износа, что позволяет разработать эффективные способы повышения долговечности и ремонтопригодности конструкций, эксплуатируемых в морской среде.

Ключевые слова: гидротехническое сооружение, бетон, карбонизация, хлоридная агрессия.

Для цитирования: Шалый Е.Е., Леонович С.Н., Ким Л.В. Деградация 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

E.E. SHALYI[1], Engineer (john_shamali@mail.ru); S.N. LEONOVICH[2], Doctor of Sciences (Engineering) (sleonovich@mail.ru);
L.V. KIM[1], Candidate of Sciences (Engineering) (kim_lvl@dvfu.ru)
[1] Far Eastern Federal University (E920, 12, Ajax Bay, Russky Island, Vladivostok, 690091, Russian Federation)
[2] Belarusian National Technical University (220013, Belarus, Minsk, Nezavisimosty Ave., 65)

Degradation of Reinforced Concrete Structures of Marine Works from the Combined Impact of Carbonation and Chloride Aggression

Corrosion of reinforcement of marine and coastal hydraulic structures due to chloride aggression and carbonation of concrete leads to a sharp decrease in the safety of the structure. The existing design methods do not fully reflect the actual operating conditions of hydraulic structures. This is particularly evident in areas where the simultaneous impact of such factors as low air temperatures and a large number of clear days in the winter with strong solar radiation, leads to a sharp change in the actual operating conditions compared to the calculated. Concretes of many structures and installations experience a greater number of aggressive impacts than provided for by the design standards. As a result of these effects, the reinforcement is subjected to the depassivation process as soon as the chloride concentration on its surface exceeds the threshold concentration, or the pH value in the protective layer of concrete decreases to the threshold value as a result of carbonation. When oxygen penetrates to the surface of the reinforcement, electrochemical reactions are implemented with formation of corrosion products. This leads to cracking of the protective layer of concrete, reducing the cross-sectional area of the reinforcement. The paper proposes a method for predicting the complex degradation of reinforced concrete structures of coastal structures with due regard for the various mechanisms of corrosion wear, which makes it possible to develop effective ways to improve the durability and maintainability of structures operated in the marine environment.

Keywords: hydraulic structures, concrete, carbonization, chloride aggression.

For citation: 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

Влияние морской среды на интенсивность коррозии требует дополнительных исследований, так как хлоридная агрессия и карбонизация бетона значительно ускоряют процесс деградации [1]. Коррозия арматуры, вызванная исключительно хлоридом, достаточно хорошо изучена, и для моделирования этого процесса доступен ряд моделей. Одни модели изучают транспортный механизм ионов хлорида с поверхности железобетонных элементов, другие [2–7] изучают влияние начальных трещин в бетоне [8–10] и влияние нагрузки на транспортный механизм хлоридов [11, 12].

В [13] было предложено численное моделирование процесса коррозионного повреждения бетона, в котором физическая и электрохимическая модели связаны с механической моделью образования тре-

щины. Известны работы по изучению совместных факторов среды: хлоридной агрессии и карбонизации [14–16]. Отмечено, что влияние карбонизации на коэффициент диффузии ионов хлорида зависит от типов и пропорций смеси бетонов. В [15, 16] описан переменный тест с хлоридным воздействием и карбонизацией, где концентрация ионов хлорида была максимальной вблизи фронта карбонизации.

Несмотря на то что в условиях морской среды одновременно происходят карбонизация и хлоридная агрессия, следует отметить, что диффузия ионов хлорида идет намного быстрее, чем процесс карбонизации. До карбонизации бетон обычно содержит соль Фриделя из-за хлоридного иона, связанного внутри бетона. Когда соль Фриделя реагирует с двуокисью углерода, ионы хлорида высвобождаются в поровую воду [17, 18]:

$$3CaO{\cdot}Al_2O_3{\cdot}CaCl_2{\cdot}10H_2O+3CO_2\rightarrow$$
$$\rightarrow 3CaCO_3+2Al(OH)_3+CaCl_2+7H_2O. \quad (1)$$

Высвобожденные ионы увеличивают концентрацию свободного хлорида, значительно превышающую концентрацию хлоридных ионов, которые транспортируются с поверхности во внутреннюю среду. Поэтому для анализа и прогнозирования комбинированного действия карбонизации и проникновения хлоридов необходимо моделировать, как карбонизация взаимодействует с хлоридным переносом без карбонизации. Авторами предложена комплексная модель комбинированного действия карбонизации и хлоридной агрессии, которая сравнивается с хлоридным переносом без карбонизации и проверяется экспериментально.

Модель карбонизации

Эффект карбонизации заключается в уменьшении щелочности пористой среды в бетоне, что позволяет разрушать пассивную пленку на арматуре и тем самым инициировать коррозию, приводя к сколам защитного слоя бетона и снижению прочности [19–21]. Таким образом, карбонизация бетона представляет собой сложный физико-химический процесс, и в основе его описания лежит дифференциальное уравнение первого закона А. Фика [2]:

$$J=-D\frac{dc}{dx}. \quad (2)$$

Если рассматривать карбонизацию как устойчивый постоянный процесс, описанный этим законом, то детерминистическая модель глубины прохождения фронта карбонизации для сооружения записывается следующим образом [2]:

$$x_c(t)=\sqrt{\frac{2D(t)}{a}\int_1^t f_T(t)\cdot f_W(t)\cdot k\cdot C_{CO_2}(t)dt\cdot\left(\frac{t_0}{t}\right)^n}, \quad (3)$$

где t – время эксплуатации в годах; t_0 – 1 год; n – возрастной фактор; k – коэффициент, учитывающий повышенное содержание углекислого газа в больших городах; $f_T(t)$ и $f_W(t)$ – функции изменения температуры и влажности во времени соответственно; $C_{CO_2}(t)$ – функция изменения концентрации CO_2 во времени; $D(t)$ – коэффициент диффузии углекислого газа в бетоне как функция времени; a – количество CO_2, необходимое для превращения всех способных карбонизироваться продуктов гидратации, определяется по формуле [19]:

$$a=0{,}75\cdot CaO\cdot b\cdot a_H\cdot\frac{M_{CO_2}}{M_{CaO}}, \quad (4)$$

где CaO – содержание оксида кальция в цементе; b – количество цемента; M_{CO_2} – молярная масса углекислого газа; M_{CaO} – молярная масса оксида кальция; a_H – степень гидратации цемента.

Исходные данные

Параметр	Значение
Средняя температура наиболее теплого месяца, T_{max}	17,7°С
Средняя температура наиболее холодного месяца, T_{min}	2,4°С
Средняя влажность наиболее влажного месяца, W_{max}	0,85
Средняя влажность наиболее сухого месяца, W_{min}	0,71
Водовяжущее отношение, W/B	0,4
Расход цемента, b	350 кг/м^3

По предложенной модели проведены расчеты глубины карбонизации защитного слоя бетона железобетонного шельфового сооружения, отстоящего от береговой черты на расстоянии 10 м и затапливаемого только в период штормов. Конструкция эксплуатируется на юге острова Сахалин, выполнена из железобетона. Класс бетона В22,5 с расходом цемента 350 кг/м^3 и водовяжущим отношением 0,4. Проектный срок эксплуатации конструкции 50 лет. Исходные данные модели приведены в таблице.

Модель (3) рассчитывалась в программе Mathcad. Результаты моделирования приведены на рис. 1.

Из графика видно, что за 50 лет (600 мес) эксплуатации глубина карбонизации бетона составит 30 мм, или 60%. Степень карбонизации в данном случае a_c=0,6.

Модель диффузии хлоридов

В основе описания процесса диффузии хлоридов в защитный слой бетона лежит уравнение второго закона Фика [2]:

$$\frac{dc}{dt}=D\frac{d^2c}{dx^2}. \quad (5)$$

При учете связывающей способности уравнение диффузии (5) принимает вид [2]:

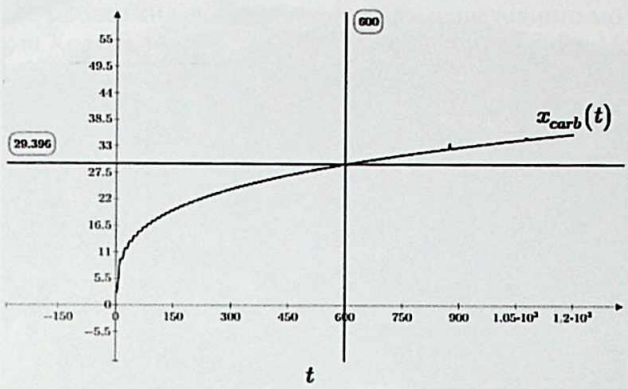


Рис. 1. График изменения глубины карбонизации бетона защитного слоя во времени: t – время, мес; $x_{carb}(t)$ – глубина карбонизации

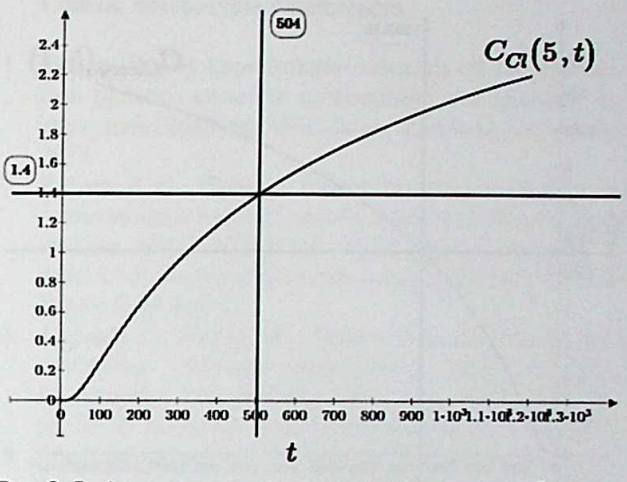


Рис. 2. График изменения хлоридов во времени (месяцы) без учета карбонизации на глубине защитного слоя 5 см: t – время (мес); $C_{Cl}(x,t)$ – концентрация ионов хлорида на глубине защитного слоя X см в зависимости от времени t, кг/м^3. Критическая концентрация хлоридов принята 0,4%, или 1,4 кг/м^3 по массе вяжущего

$$\frac{dCf}{dt} = \frac{D_{Cl}}{1+\left(\frac{1}{w_e}\right)\cdot\left(\frac{\partial C_b}{\partial C_f}\right)}\,\frac{d^2C_f}{dx^2}, \qquad (6)$$

где C_f – концентрация свободных хлоридов в бетоне; C_b – концентрация связанных хлоридов в бетоне; D_{Cl} – эффективный коэффициент диффузии хлоридов в бетоне; w_e – свободная поровая влага; $\frac{\partial C_b}{\partial C_f}$ – связывающая способность бетона.

Связывающая способность негазированного бетона часто определяется наклоном связующей изотермы. В данном исследовании используется модель изотермы Ленгмюра [2]:

$$\frac{\partial C_b}{\partial C_f} = \frac{\infty_L}{\left(1+\beta_L\cdot\frac{C_f}{b}\right)^2}. \qquad (7)$$

Эффективный коэффициент диффузии хлоридов рассчитывается как [22, 17]:

$$D_{Cl} = D_{cl.0}\cdot f_T(t)\cdot f_W(t)\cdot f_t(t), \qquad (8)$$

где $f_T(t), f_W(t), f_t(t)$ – соответственно функции влияния температуры, влажности и времени на коэффициент диффузии; $D_{cl.0}$ – начальный коэффициент диффузии хлоридов.

Подставляя уравнения (7) и (8) в уравнение (6), определяющее уравнение диффузии модифицируется следующим образом:

$$\frac{d}{dt}C_{Cl} = \frac{D_{cl.0}\cdot f_T(t)\cdot f_W(t)\cdot f_t(t)}{1+\left(\frac{1}{w_e}\right)\cdot\left(\frac{\infty_L}{\left(1+\beta_L\cdot\frac{C_{Cl}}{b}\right)^2}\right)}\,\frac{d^2}{dx^2}C_{Cl}. \qquad (9)$$

По предложенной модели проводится расчет концентрации хлоридов на глубине защитного слоя бетона рассматриваемого железобетонного шельфового сооружения. Модель (9) также рассчитывалась в программе Mathcad (рис. 2)

Из графика на рис. 2 видно, что уровень содержания хлоридов в приарматурной зоне достигнет критической концентрации через 504 мес эксплуатации, или примерно 42 г.

Модель комбинированного воздействия карбонизации и хлоридной агрессии

Предполагается, что уравнение переноса ионов хлорида после карбонизации по-прежнему соответствует второму закону диффузии Фика (6). Общее количество хлорида в единице объема бетона состоит из свободного хлорида в поровом растворе и связанного хлорида (соль Фриделя) [17, 22, 23]:

$$C_{Cl,carb} = w_e C_{fc} + C_{bc}, \qquad (10)$$

где $C_{Cl,carb}$ – общая концентрация хлорида с учетом карбонизации; C_{fc} – содержание свободных хлоридов в бетоне; C_{bc} – содержание связанных хлоридов в бетоне; w_e – поровая влага.

Так как в конкретном случае взаимодействие бетона с окружающей средой сопровождается не толь-

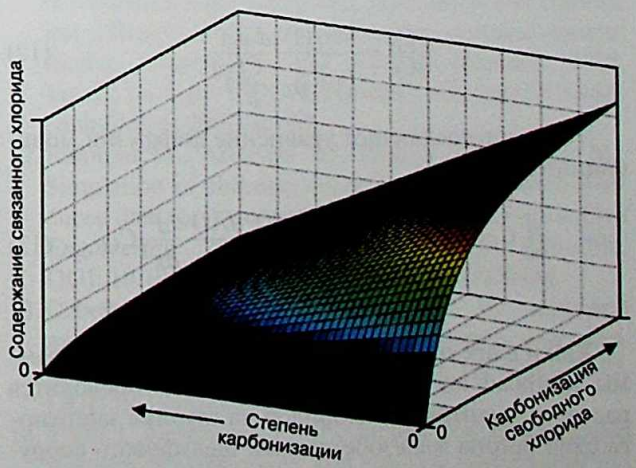


Рис. 3. Изменение содержания связанного хлорида в зависимости от концентрации свободного хлорида и степени карбонизации [17]

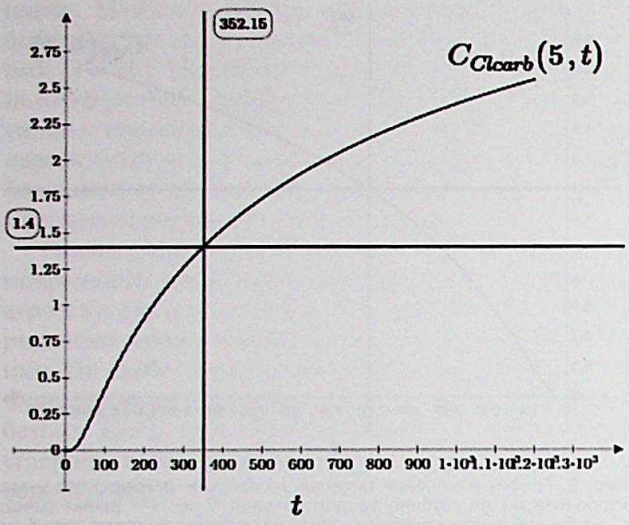


Рис. 4. График изменения хлоридов во времени (месяцы) с учетом карбонизации на глубине защитного слоя 5 см: t – время (мес); $C_{Clcarb}(x,t)$ – концентрация ионов хлорида на глубине защитного слоя X см в зависимости от времени t, кг/м^3. Критическая концентрация хлоридов принята 0,4%, или 1,4 кг/м^3 по массе вяжущего

ко проникновением ионов хлорида, но и карбонизацией, остаточная связывающая способность бетона после карбонизации снижается.

На основе экспериментальных исследований [17] количество связанного хлорида зависит не только от концентрации свободного хлорида в поровом растворе, но и от степени карбонизации, как показано на рис. 3, поэтому предлагается заменить ∞_L на ∞_{Lc} для бетона после полной карбонизации [17]:

$$\infty_{Lc} = \infty_L (1 - d \cdot a_c), \qquad (11)$$

где d – коэффициент уменьшения связывающей способности ионов хлорида за счет карбонизации, принимаемый равным 0,88 на основании исследований [17].

Принимая во внимание уравнение (11), закон Ленгмюра (7) с учетом карбонизации выглядит следующим образом:

$$\frac{\partial C_b}{\partial C_f} = \frac{\infty_L(1-d\cdot a_c)}{\left(1+\beta_L\cdot\frac{C_f}{b}\right)^2}. \qquad (12)$$

Тогда определяющее уравнение диффузии модифицируется:

$$\frac{d}{dt}C_{Cl} = \frac{D_{cl.0}\cdot f_T(t)\cdot f_W(t)\cdot f_t(t)}{1+\left(\frac{1}{w_e}\right)\cdot\left(\frac{\infty_L(1-d\cdot a_c)}{\left(1+\beta_L\cdot\frac{C_{Cl}}{b}\right)^2}\right)}\frac{d^2}{dx^2}C_{Cl}. \qquad (13)$$

Как и в предыдущем случае, с помощью программы Mathcad по предложенной модели проводится расчет концентрации хлоридов на глубине защитного слоя бетона железобетонного шельфового сооружения, отстоящего от береговой черты на расстоянии 10 м и затапливаемого только в период штормов.

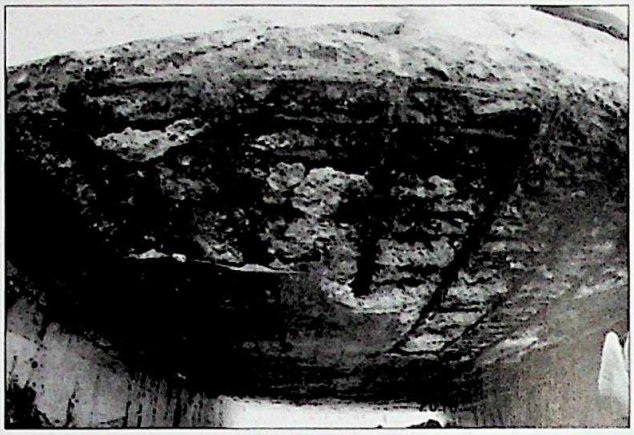


Рис. 5. Пролет пешеходного моста Холмского морского торгового порта

Исходные данные в таблице. Результаты моделирования приведены на рис. 4.

Как видно из графика на рис. 4, уровень содержания хлоридов в приарматурной зоне достигнет критической концентрации через 352 мес эксплуатации, или примерно через 29 лет, что разительно отличается от случая без учета карбонизации, где критическая концентрация достигалась через 42 года.

Верификация модели совместного действия карбонизации и хлоридной агрессии

Для оценки результатов модели совместного действия карбонизации и хлоридной агрессии в 2016 г. проведено натурное обследование портовых сооружений на юге острова Сахалин. Комбинированное

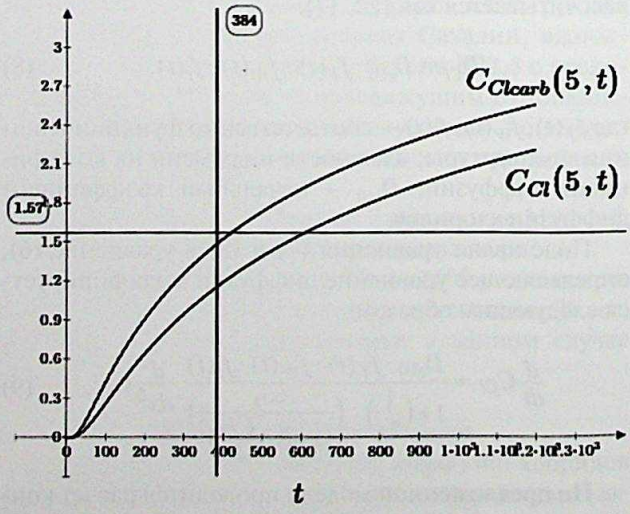


Рис. 6. График сравнения изменения хлоридов во времени (мес) с учетом и без учета карбонизации на глубине защитного слоя 5 см: t – время (мес); $C_{Cl}(x,t)$ – концентрация ионов хлорида на глубине защитного слоя X см в зависимости от времени t без учета карбонизации, кг/м^3; $C_{Clcarb}(x,t)$ – концентрация ионов хлорида на глубине защитного слоя X см в зависимости от времени t для бетона вследствие комбинированного действия карбонизации и хлоридной агрессии, кг/м^3. Критическая концентрация хлоридов принята 0,4%, или 1,4 кг/м^3 по массе вяжущего

действие хлоридов и углекислого газа наиболее хорошо прослеживалось в конструкции пешеходного моста Холмского морского торгового порта (рис. 5). На основании паспорта сооружения пешеходный мост был введен в эксплуатацию в 1984 г., т. е. в момент обследования срок его эксплуатации составлял 32 года. Конструкция располагается в 10 м от береговой черты, находится в зоне брызг и периодически затапливается во время штормов.

Результаты замера глубины карбонизации путем фенолфталеиновой пробы показали, что глубина карбонизации составляет примерно 25 мм. Уровень концентрации хлоридов на глубине защитного слоя бетона в данном случае составил 1,57 кг/м^3 по массе вяжущего.

На рис. 6 показано сравнение результатов моделирования изменения хлоридов во времени с учетом и без учета карбонизации с натурными испытаниями. Как видно из графика, для конструкции пешеходного моста со сроком эксплуатации 384 мес, или 32 года, наиболее близка кривая совместного действия, что подтверждает адекватность предложенной модели.

Выводы

1. Выполнен анализ механизма коррозионного разрушения шельфовых конструкций, сформулировано предельное состояние для химической реакции хлорида в защитном слое бетона шельфовых конструкций.

2. Предложена модель деградации защитного слоя бетона прибрежных сооружений от совместного действия карбонизации и хлоридной агрессии.

3. Проведена верификация модели на портовых сооружениях о. Сахалин. Выполненные полевые измерения проникновения хлоридов в бетон показали, что при глубине 50 мм в зоне брызг концентрация хлоридов превышает 0,4% веса цемента (порог коррозии) при возрасте конструкции порядка 30 лет.

4. Обследование в порту Холмска подтвердило, что локально, в определенных случаях, в защитном слое бетона возникают области, где наблюдается одновременное действие и карбонизации, и хлоридной агрессии. В этих локальных областях достигается максимальная концентрация хлоридов и возникает коррозия арматуры. Срок службы обследуемых сооружений не достигал проектного срока службы.

5. Моделирование концентрации ионов хлора в бетоне защитного слоя в соответствии с принятыми моделями в зависимости от срока службы, климатических условий и глубины армирования позволило сравнить содержание хлорида на некоторой глубине при расчете с учетом и без учета совместного воздействия карбонизации и хлоридной агрессии.

6. Результаты моделирования хорошо соотносятся с натурными исследованиями, что в дальнейшем позволит разработать эффективные способы повышения долговечности и ремонтопригодности конструкций, эксплуатируемых в морской среде.

Список литературы / References

1. Huang T. The experimental research on the interaction between concrete carbonation and chloride ingress under loading: MSc thesis. Zhejiang University. 2013.
2. Bazant Z.P., Physical model for steel corrosion in concrete sea structures theory. *Journal of the structural division*. ASCE 105 (ST6), 1979: 1137–1153. http://www.civil.northwestern.edu/people/bazant/PDFs/Papers/119.pdf
3. Andrade C., Prieto M., Tanner P. et al. Testing and modelling chloride penetration into concrete. *Construction and Building Materials*. 2011. Vol. 39, pp. 9–18. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2012.08.012
4. Apostolopoulos C., Papadakis V.,Consequences of steel corrosion on the ductility properties of reinforcement bar. *Construction and Building Materials*. 2008. Vol. 22 (12), pp. 2316–2324. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2007.10.006
5. Yuan C., Niu D., Luo D. Effect of carbonation on chloride diffusion in fly ash concrete. *Disaster Advances*. 2012. Vol. 5 (4), pp. 433–436.
6. Cairns J.W. State of the art report on bond of corroded reinforcement. Tech. Report No. CEB-TG-2/5. 1998.
7. Cao C., Cheung M. Non-uniform rust expansion for chloride-induced pitting corrosion in RC structures. Construction and Building Materials. 2014. Vol. 51, pp. 75–81. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.10.042
8. Ho D.W.S., Lewis R.K. Carbonation of concrete and its prediction. *Cement and Concrete Research*. 1987. Vol. 17 (3), pp. 489–504. DOI: 10.1016/0008-8846(87)90012-3
9. Glass G.K., Buenfeld N. The influence of chloride binding on the chloride induced corrosion risk in reinforced concrete. *Corrosion Science*. 2000. Vol. 42 (2), pp. 329–344. DOI: 10.1016/S0010-938X(99)00083-9
10. Böhni H. Corrosion in reinforced concrete structures. England: Woodhead Publishing Limited. 2005. 264 p.
11. Chindaprasirt P., Rukzon S., Sirivivatnanon V. Effect of carbon dioxide on chloride penetration and chloride ion diffusion coefficient of blended portland cement mortar. *Construction and Building Materials*. 2008. Vol. 22. Iss. 8, pp. 1701–1707. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.06.002
12. Rahman M., Al-Kutti W., Shazali M., Baluch M., Simulation of chloride migration in compression-induced damage in concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2012. Vol. 24 (7), pp. 789–796. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000458
13. Ozbolt J., Balabanic G., Kuster M. 3D numerical modelling of steel corrosion in concrete structures. *Corrosion Science*. 2011. Vol. 53 (12), pp. 4166–4177. DOI: 10.1016/j.corsci.2011.08.026
14. Yoon I. Deterioration of concrete due to combined reaction of carbonation and chloride penetration: experimental study. *Key English Materials*. 2007.

Vol. 348–349, pp. 729–732. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.348-349.729
15. Yoon I. Simple approach to calculate chloride diffusivity of concrete considering carbonation. *Computers and Concrete*. 2009. Vol. 6 (1) DOI: 10.12989/cac.2009.6.1.001
16. Backus J., Mcpolin D., Basheer M. et al. Exposure of mortars to cyclic chloride ingress and carbonation. *Advances in Cement Research*. 2013. Vol. 25 (1), pp. 3–11. https://doi.org/10.1680/adcr.12.00029
17. Zhu, X., Zi, G., Cao, Z., & Cheng, X. Combined effect of carbonation and chloride ingress in concrete. *Construction and Building Materials*. 2016. Vol. 110, pp. 369–380. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.034
18. Wan X., Wittmann F., Zhao T., Fan H. Chloride content and pH value in the pore solution of concrete under carbonation. *Journal of Zhejiang University SCIENCE A*. 2013. Vol. 14. Iss. 1, pp. 71–78. https://doi.org/10.1631/jzus.A1200187
19. Алексеев С.Н., Иванов Ф.М., Модры С., Шиссль П. Долговечность железобетона в агрессивных средах. М.: Стройиздат, 1990. 320 с.
19. Alekseev S.N., Ivanov F.M., Modry S., Shissl' P. Dolgovechnost' zhelezobetona v agressivnykh sredakh [The durability of reinforced concrete in aggressive environments]. Moscow: Stroyizdat. 1990. 320 p.
20. Алексеев С.Н., Розенталь Н.К. Коррозионная стойкость железобетонных конструкций в агрессивной производственной среде. М.: Стройиздат, 1976. 205 с.
20. Alekseev S.N., Rozental' N.K. Korrozionnaya stoikost' zhelezobetonnykh konstruktsii v agressivnoi proizvodstvennoi srede [Corrosion resistance of reinforced concrete structures in an aggressive production environment]. Moscow: Stroyizdat, 1976. 205 p.
21. Расчет срока службы железобетонных конструкций в условиях коррозии карбонизации. Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке инженерных кадров: Сб. науч. ст. Гродн. гос. ун-та им. Я. Купалы. Гродно: ГрГУ, 2010. С. 369–375.
21. Calculation of the service life of reinforced concrete structures under carbonization corrosion conditions. *Prospects for the development of new technologies in the construction and training of engineering personnel: A collection of scientific schools of the Grodno State University I. Kupala*. Grodno: GrSU. 2010, pp. 369–375. (In Russian).
22. Aveldano R.R., Ortega N.F. Behavior of concrete elements subjected to corrosion in their compressed or tensed reinforcement. *Construction and Building Materials*. 2013. Vol. 38, pp. 822–828. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2012.09.039
23. Lee M.K., Jung S.H., Oh B.H. Effects of carbonation on chloride penetration in concrete. *Aci Materials Journal*. 2013. 110 (5), pp. 559–566.

Требования к статьям, направляемым для публикации в журнал «Строительные материалы»®

Уважаемые авторы!

Приступая к оформлению статьи для журнала внимательно ознакомьтесь с правилами и рекомендациями, размещенными на сайте издательства.

Как подготовить к публикации научно-техническую статью см. раздел **https://journal-cm.ru/index.php/ru/avtoram**

Статьи, направляемые для опубликования, должны оформляться в соответствии с техническими требованиями издания:

– текст статьи должен быть набран в редакторе Microsoft Word и сохранен в формате *.doc или *.rtf;

– графический материал (графики, схемы, чертежи, диаграммы, логотипы и т. п.) должен быть выполнен в графических редакторах: CorelDraw, Adobe Illustrator и сохранен в форматах *.cdr, *.ai, *.eps соответственно. Сканирование графического материала и импортирование его в перечисленные выше редакторы недопустимо;

– иллюстративный материал (фотографии, коллажи и т. п.) необходимо сохранять в формате *.tif, *.psd, *.jpg (качество «8 – максимальное») или *.eps с разрешением не менее 300 dpi, размером не менее 115 мм по ширине, цветовая модель CMYK или Grayscale.

Материал, передаваемый в редакцию в электронном виде, должен сопровождаться:

– рекомендательным письмом руководителя предприятия (института);

– лицензионным договором о передаче права на публикацию;

– распечаткой, лично подписанной ВСЕМИ авторами;

– рефератом объемом не менее 150 слов на русском и английском языках;

– подтверждением, что статья предназначена для публикации в журнале «Строительные материалы»®, ранее нигде не публиковалась и в настоящее время не передана в другие издания;

– сведениями об авторах с указанием полностью фамилии, имени, отчества, ученой степени, должности, контактных телефонов, почтового и электронного адресов (заполненная информационная карта).

Особое внимание библиографическим спискам!

НЕ РЕКОМЕНДУЕТСЯ:

1. Включать ссылки на федеральные законы, подзаконные акты, ГОСТы, СНиПы и др. нормативную литературу. Упоминание нормативных документов, на которые опирается автор в испытаниях, расчетах или аргументации, лучше делать непосредственно по тексту статьи.
2. Ссылаться на учебные и учебно-методические пособия; статьи в материалах конференций и сборниках трудов, которым не присвоен ISBN и которые не попадают в ведущие библиотеки страны и не индексируются в соответствующих базах.
3. Ссылаться на диссертации и авторефераты диссертаций.
4. Самоцитирование, т. е. ссылки только на собственные публикации автора. Такая практика не только нарушает этические нормы, но и приводит к снижению количественных публикационных показателей автора.

ОБЯЗАТЕЛЬНО следует:

1. Ссылаться на статьи, опубликованные за последние 2–5 лет в ведущих научно-технических и научных изданиях, на которые опирается автор в построении аргументации или постановке задачи исследования.
2. Ссылаться на монографии, опубликованные за последние 5 лет. Более давние источники также негативно влияют на показатели публикационной активности автора.

Несомненно, что возможны ссылки и на классические работы, однако не следует забывать, что наука всегда развивается поступательно вперед и незнание авторами последних достижений в области исследований может привести к дублированию результатов, ошибкам в постановке задачи исследования и интерпретации данных.

Следуйте рекомендациям, и публикация не заставит себя долго ждать!

Подписано в печать 23.05.2019
Формат 60×88 1/8
Бумага «Пауэр»
Печать офсетная
Общий тираж 4000 экз.

Отпечатано в ООО «Полиграфическая компания ЛЕВКО»
Москва, ул. Дружинниковская, д. 15

В розницу цена договорная

Набрано и сверстано в РИФ «Стройматериалы»

Верстка: **Д. Алексеев, Н. Молоканова**

21th
SPECIALIZED EXHIBITION
FOR CONSTRUCTION
MATERIALS

21-я
СПЕЦИАЛИЗИРОВАННАЯ
ВЫСТАВКА «ОТЕЧЕСТВЕННЫЕ
СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ»

ufi Approved Event

ОСМ 2020

28 -31 января

January 28 - 31

Москва, ЦВК «Экспоцентр», пав.№7

Pav. №7, Expocentre Fairgrouds, Moscow

В рамках выставки / In the Frame of Exhibition:

КЕРАМБРИКТЕХ

CERAMBRICKTECH

реклама

16+

Бесплатный пригласительный билет
на **www.osmexpo.ru**

Организатор: ЕВРОЭКСПО EUROEXPO

При поддержке: МИНПРОМТОРГ РОССИИ

Партнеры выставки: АПКСМ

При содействии: ЭКСПОЦЕНТР