

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ®

№ 8



НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ ИЗДАЕТСЯ С 1955 г. WWW.RIFSM.RU WWW.JOURNAL-CM.RU АВГУСТ 2021 г. (794)

ГИПС НАША ПРОФЕССИЯ

www.alphaplatre.com

Ваш надежный партнер – лидер в топ списке поставщиков

Гипсоварочное оборудование



- ✓ Оборудование для гипсовой промышленности и модернизации существующих технологических линий
- ✓ Индивидуальные технические решения и адаптированный уровень автоматизации
- ✓ Изготовление оборудования в Европе
Реактивность. Качество. Надежность
- ✓ Инновационные решения для удовлетворения ваших потребностей (сокращение энергопотребления, обслуживания, времени монтажа и уменьшение рисков)
- ✓ Высокие стандарты качества при разумной стоимости инвестиций
- ✓ Обучение обслуживающего персонала
- ✓ Помощь на любом этапе вашего проекта



АНЖЕ

15 rue du Moulin des Landes
CS 50159 - Saint Sylvaïn d'Anjou
49481 Verrières en Anjou Cedex
T : + 33 (0)2 41 21 19 40
F : + 33 (0)2 41 21 19 59
ФРАНЦИЯ

Париж Головной офис

140 bis rue de Rennes
75006 PARIS
T : + 33 (0)1 53 90 22 40
F : + 33 (0)1 53 90 22 24
ФРАНЦИЯ

МОСКВА

20, Daev pereulok
Daev plaza - office 512
T : + 7 495 604 81 86
F : + 7 495 604 81 73
РОССИЯ

ЦИНДАО

№612, Qiganshi
Economic development zone
Rushan City 264500, Shandong
T : + 86 13 701 883 087
КИТАЙ



marianna.d@alphaplatre-france.com



KNAUF

РЕКЛАМА

НЕМЕЦКИЙ СТАНДАРТ. ЕДИНОЕ КАЧЕСТВО ДЛЯ ВСЕХ СТРАН

Высокие корпоративные принципы и традиции производства материалов КНАУФ — это залог качества в строительстве и ремонте!

 www.knauf.ru

ООО «КНАУФ ГИПС»

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

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ®

№ 8

Основан в 1955 г.

(794) Август 2021 г.

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

**К проведению 10-й Международной научно-практической конференции
«Повышение эффективности производства и применения гипсовых материалов и изделий»,
8–9 сентября 2021 г., г. Воронеж**

А.Н. ГУМЕНЮК, И.С. ПОЛЯНСКИХ, М.А. ХОДЫРЕВА, Ф.Е. ШЕВЧЕНКО, И.А. ПУДОВ, Г.Н. ПЕРВУШИН, Г.И. ЯКОВЛЕВ Композиционный материал на основе фторангидрита и технической серы	4
В.Б. ПЕТРОПАВЛОВСКАЯ, М.Ю. ЗАВАДЬКО, Т.Б. НОВИЧЕНКОВА, К.С. ПЕТРОПАВЛОВСКИЙ Применение метаксаолина и золы гидроудаления в безобжиговых гипсовых композитах	11
И.В. БЕССОНОВ, А.Д. ЖУКОВ, Э.А. ГОРБУНОВА Гипсодержащие модифицированные материалы	18
Д.А. КАЛАБИНА, Г.И. ЯКОВЛЕВ, Ю.М. ВАСИЛЬЧЕНКО, Н.В. КУЗЬМИНА, А.Ф. ГОРДИНА Модификация углеродсодержащими добавками фторангидритовой композиции для устройства полов	27
Новинки ВОЛМА 2021 (Информация)	32
А.Ф. БУРЬЯНОВ, Х.-Б. ФИШЕР, Н.А. ГАЛЬЦЕВА, Е.Н. БУЛДЫЖОВА Исследование роли сульфата калия при проектировании активатора твердения	34
А.Н. РЯЗАНОВ, Р.И. ШИГАПОВ, Д.А. СЕНИЦИН, Д.Ф. КИНЗЯБУЛАТОВА, И.В. НЕДОСЕКО Использование гипсовых композиций в технологиях строительной 3D-печати малоэтажных жилых зданий. Проблемы и перспективы	39
Н.В. ЧЕРНЫШЕВА, В.С. ЛЕСОВИК, М.Ю. ДРЕБЕЗГОВА, Д.А. МОТОРЫКИН, Е.Н. ЛЕСНИЧЕНКО, А.Л. БОЧАРНИКОВ Состав и реологические свойства формовочных смесей на композиционном гипсовом вяжущем	45

Материалы и технологии

Н.П. ЛУКУТЦОВА, А.А. ПЫКИН, Г.Н. СОБОЛЕВА, Н.В. ЗОЛОТУХИНА, А.А. ОБЫДЕННАЯ Композиционный наполнитель для легких бетонов с использованием хризотилцементных и золошлаковых отходов	53
Н.Н. ФОМИНА, А.Р. ИСМАГИЛОВ Фасадные краски на основе наполненных стирол-акриловых дисперсий	60
В.П. ВЫЛЕГЖАНИН, В.А. ПИНСКЕР Особенности пористой структуры ячеистых бетонов и ее влияние на теплопроводность	67

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

Monthly scientific-technical and industrial journal

STROITEL'NYE MATERIALY®

№ 8

Founded in 1955 (794) August 2021

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

**To the 10th International Scientific and Practical Conference
"Increasing the efficiency of production and use of gypsum materials and products",
September 8–9, 2021, Voronezh**

A.N. GUMENYUK, I.S. POLYANSKIKH, M.A. KHODYREVA, F.E. SHEVCHENKO, I.A. PUDOV, G.N. PERVUSHIN, G.I. YAKOVLEV Composite Materials Based on Fluoroanhydrite and Industrial Sulfur	4
V.B. PETROPAVLOVSKAYA, M.Y. ZAVADKO, T.B. NOVICHENKOVA, K.S. PETROPAVLOVSKII Application of Metakaolin and Wet Ash Discharge in Non-Fired Gypsum Composites	11
I.V. BESSONOV, A.D. ZHUKOV, E.A. GORBUNOVA Gypsum-Containing Modified Materials	18
D.A. KALABINA, G.I. YAKOVLEV, Yu.M. VASILCHENKO, N.V. KUZMINA, A.F. GORDINA Modification of Fluoroanhydrite Composition for Flooring with Carbon-Containing Additives	27
Novelties VOLMA 2021 (Information)	32
A.F. BURYANOV, H.-B. FISHER, N.A. GALTSEVA, E.N. BYLDIZHOVA Investigation of the Role of Potassium Sulfate in the Design of a Hardening Activator	34
A.N. RYAZANOV, R.I. SHIGAPOV, D.A. SINITSIN, D.F. KINZYABULATOVA, I.V. NEDOSECO The use of Gypsum Compositions in the Technologies of Construction 3D Printing of Low-Rise Residential Buildings. Problems and Prospects	39
N.V. CHERNYSHEVA, V.S. LESOVIK, M.Yu. DREBEZGOVA, D.A. MOTORYKIN, E.N. LESNICHENKO, A.L. BOCHARNIKOV Composition and Rheological Properties of Molding Mixtures on a Composite Gypsum Binder	45
Materials and technologies	
N.P. LUKUTSOVA, A.A. PYKIN, G.N. SOBOLEVA, N.V. ZOLOTUKHINA, A.A. OBYDENNAYA Composite Aggregate for Lightweight Concrete Using Chrysotile Cement and Ash and Slag Waste	53
N.N. FOMINA, A.R. ISMAGILOV Facade Paints Based on Filled Styrene-Acrylic Dispersions	60
V.P. VYLEGZHANIN, V.A. PINSKER Features of the Porous Structure of Cellular Concretes and its Effect on Thermal Conductivity	67

Редакционный совет

Главный редактор:

ЮМАШЕВА Е.И.,

инженер-химик-технолог, почетный строитель России

Председатель редакционного совета:

РЕСИН В.И.,

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

АЙЗЕНШТАДТ А.М.,

д-р хим. наук, профессор (Архангельск)

АСКАДСКИЙ А.А.,

д-р хим. наук, профессор (Москва)

БУРЬЯНОВ А.Ф.,

д-р техн. наук, директор Российской гипсовой ассоциации (Москва)

ВЕРЕЩАГИН В.И.,

д-р техн. наук, профессор (Томск)

ГОРИН В.М.,

канд. техн. наук, президент Союза производителей керамзита и керамзитобетона (Самара)

ЕРОФЕЕВ В.Т.,

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

КОРОЛЕВ Е.В.,

д-р техн. наук, профессор (Санкт-Петербург)

КОТЛЯР В.Д.,

д-р техн. наук, профессор (Ростов-на-Дону)

КРИВЕНКО П.В.,

д-р техн. наук, профессор (Украина)

ЛЕОНОВИЧ С.Н.,

д-р техн. наук, профессор (Беларусь)

ЛЕСОВИК В.С.,

д-р техн. наук, профессор, член-корреспондент РААСН (Белгород)

МУРТАЗАЕВ С.-А.Ю.,

д-р техн. наук, профессор (Грозный)

НЕДОСЕКО И.В.,

д-р техн. наук (Уфа)

ПИЧУГИН А.П.,

д-р техн. наук, профессор (Новосибирск)

ПУХАРЕНКО Ю.В.,

д-р техн. наук, профессор, член-корреспондент РААСН (Санкт-Петербург)

ТРАВУШ В.И.,

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

ФЕДОСОВ С.В.,

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

ФИШЕР Х.-Б.,

доктор-инженер (Германия)

ХОЗИН В.Г.,

д-р техн. наук, профессор (Казань)

ЧЕРНЫШОВ Е.М.,

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

ШЕБЛ С.М.,

д-р наук, профессор (Египет)

ШЛЕГЕЛЬ И.Ф.,

канд. техн. наук (Омск)

ШТАКЕЛЬБЕРГ Д.И.,

д-р техн. наук, профессор (Израиль)

ЯКОВЛЕВ Г.И.,

д-р техн. наук, профессор (Ижевск)

Ю ЖЯНГМЯО,

д-р философии (Китай, Гуанчжоу)

Editorial Board

Editor-in-chief

YUMASHEVA E.,

engineer-chemist-technologist, Honorary Builder of Russia

Chairman of Editorial Board

RESIN V.,

Doctor of Science (Economy), Professor (Moscow)

AYZENSHTADT A.,

Doctor of Sciences (Chemistry), Professor (Arkhangelsk)

ASKADSKIY A.,

Doctor of Science (Chemistry), Professor (Moscow)

BURYANOV A.,

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

VERESHCHAGIN V.,

Doctor of Science (Engineering), Professor (Tomsk)

GORIN V.,

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

EROFEEV V.,

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

KOROLEV E.,

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

KOTLYAR V.,

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

KRIVENKO P.,

Doctor of Science (Engineering), Professor (Ukraine)

LEONOVICH S.,

Doctor of Science (Engineering), Professor (Belarus, Minsk)

LESOVIK V.,

Doctor of Science (Engineering), Corresponding Member of RAACS (Belgorod)

MURTAZAEV S.-A.,

Doctor of Science (Engineering), Professor (Grozniy)

NEDOSEKO I.,

Doctor of Science (Engineering) (Ufa, Bashkortostan)

PICHUGIN A.,

Doctor of Science (Engineering), Professor, Member of the Russian Academy of Natural Science (Novosibirsk)

PUKHARENKO Yu.,

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

TRAVUSH V.,

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

FEDOSOV S.,

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

FISHER H.-B.,

Doctor-Engineer (Germany, Weimar)

KHOZIN V.,

Doctor of Science (Engineering), Professor (Kazan)

CHERNYSHOV E.,

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

SHEBL S.M.,

Doctor of Science, Professor (Egypt)

SHLEGEL I.,

Candidate of Science (Engineering), OOO «INTA-Stroy» (Omsk)

SHTACKELBERG D.,

Doctor of Science (Engineering), Professor (Israel)

YAKOVLEV G.,

Doctor of Science (Engineering), Professor (Izhevsk)

YU JIANGMIAO,

PhD / Associate Professor (China, Guangzhou)



К 70-летию

Григория Ивановича ЯКОВЛЕВА

доктора технических наук, профессора Ижевского государственного технического университета им. М.Т. Калашникова, лауреата премии Правительства РФ в области науки и техники, заслуженного работника высшей школы Российской Федерации

Григорий Иванович Яковлев родился 1 сентября 1951 г. в д. Артемьевцы Старо-Зятцинского района Удмуртской АССР. Окончив школу с серебряной медалью, он поступил в Казанский инженерно-строительный институт, где получил специальность инженера-строителя. Молодой специалист был направлен в Ижевский механический институт (ныне ИжГТУ им. М.Т. Калашникова) для работы на вновь созданном инженерно-строительном факультете. С тех пор трудовая жизнь Григория Ивановича неразрывно связана с вузом, ставшим для него родным. Он налаживал учебный процесс и организовывал лабораторию строительных материалов, поставил курс «Строительные материалы» и обеспечил оснащение оборудованием и приборами для проведения лабораторных работ и организации НИР со студентами.

Научная и педагогическая деятельность Г.И. Яковлева всегда была направлена на образование тесной связи науки с производством. На базе комбината производственных предприятий крупного жилищно-строительного треста он проводил исследования тепловых полей при сушке крупногабаритных гипсобетонных панелей, предложил новый состав гипсобетона с использованием золошлака ТЭЦ-1, который успешно использовался до полной выработки золоотвалов в Ижевске.

После службы в армии Г.И. Яковлев вернулся на преподавательскую работу в ИМИ и вплотную занялся научной работой. С 1987 по 1991 г. он учился в заочной аспирантуре Челябинского политехнического института и стажировался в Институте «Теплоизоляция» в Вильнюсе (Литва), где в 1994 г. защитил диссертацию, получив степень доктора-инженера. В этом же году он нострифицировал диплом доктора-инженера и получил российскую ученую степень кандидата технических наук.

Докторскую диссертацию Григорий Иванович защитил в 2004 г. в Ижевском государственном техническом университете. В 2005 г. ему присвоено звание профессора.

С 2005 г. Г.И. Яковлев заведует кафедрой «Геотехника и строительные материалы». При кафедре создана лаборатория физико-химических исследований, оснащенная уникальным научно-исследовательским оборудованием, используемым для подготовки докторских, кандидатских, магистерских диссертаций, выпускных квалификационных работ бакалавров. Кафедра ежегодно участвует в выполнении госбюджетных заданий, параллельно проводя хозяйственные работы не только с предприятиями Удмуртской Республики, но и с Северо-Восточным федеральным университетом им. М.К. Аммосова, а также с Египетским промышленным холдингом СМВ-group.

Научные разработки Г.И. Яковлева по нанотехнологиям в строительном материаловедении признаны как российским научным сообществом, так и зарубежными исследователями. Более 250 статей опубликовано в высокорейтинговых российских и зарубежных журналах, получено 22 авторских свидетельства и патента, в том числе два международных. Например, в 2015 г. в рамках выполнения работы с «МРСК Центра и Поволжья» освоено массовое производство железобетонных опор линий передачи, выпускаемых с использованием технологии модифицирования бетона углеродными наносистемами. Технология защищена патентом. В 2019 г. под руководством Г.И. Яковлева выигран грант РФФИ совместно с учеными Технического университета г. Брно (Чехия) по созданию силикатных композитов повышенной электропроводности.

Много душевных сил и энергии отдает Григорий Иванович своим ученикам. Неоднократно его магистранты и аспиранты становились стипендиатами Президента УР и Президента РФ, выигрывали внутренние университетские гранты для проведения научных исследований. Под руководством Г.И. Яковлева защищено 11 кандидатских диссертаций. Часть молодых ученых продолжают успешно работать в ИжГТУ им. М.Т. Калашникова. Аспирант из Египта, защитивший кандидатскую диссертацию в 2016 г., работает в Египетско-Российском университете (Египет).

Григорий Иванович Яковлев является ответственным организатором с российской стороны Международной конференции по устойчивому развитию и нанотехнологиям в строительстве, которая ежегодно проходит в Египте.

Г.И. Яковлев проводит совместные исследования со многими зарубежными университетами и организациями: Вильнюсским техническим университетом им. Гедиминаса (Литва), Строительным институтом Технического университета Дрездена, Веймарским университетом (Германия), Техническим университетом Брно (Чехия), Египетско-Российским университетом, Белорусским национальным техническим университетом, Венским техническим университетом (Австрия), французской корпорацией «Аркема», египетским промышленным холдингом СМВ-group и др.

Глубокие знания и принципиальность снискали Григорию Ивановичу Яковлеву высокий авторитет профессионального сообщества — он федеральный эксперт научно-технической сферы (свидетельство № 04-05829), проводит экспертизы в строительной отрасли.

Заслуги Григория Ивановича Яковлева высоко оценены правительствами республики и России, ему присвоено звание «Заслуженный строитель УР», «Почетный работник Высшего профессионального образования РФ», «Заслуженный работник высшей школы РФ». За цикл работ по разработке и применению эффективных гипсовых материалов и изделий Г.И. Яковлеву присуждена премия Правительства РФ в области науки и техники.

Г.И. Яковлев — член диссертационных советов на базе Казанского государственного архитектурно-строительного университета и Института механики Уральского отделения АН СССР.

Григорий Иванович Яковлев многие годы работает в редакционном совете журнала «Строительные материалы»®. Он активный автор, непревзойденный принципиальный рецензент и научный консультант редакции. Благодаря ему развитию получила тема наноматериалов и нанотехнологии в строительстве.

Редакционный совет, редакция, коллеги и ученики сердечно поздравляют Григория Ивановича Яковлева с 70-летием, желают крепкого здоровья, благополучия, новых научных достижений и их востребованности в реальном секторе экономики.

УДК 691.311

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-794-8-4-10>

А.Н. ГУМЕНЮК, инженер (ассистент) (gumeniuk.an@gmail.com),
 И.С. ПОЛЯНСКИХ, канд. техн. наук (irina_maeva@mail.ru),
 М.А. ХОДЫРЕВА, студентка (khodyreva.masha@mail.ru),
 Ф.Е. ШЕВЧЕНКО, инженер (аспирант) (gism56@mail.ru),
 И.А. ПУДОВ, канд. техн. наук (PudovIA@yandex.ru),
 Г.Н. ПЕРВУШИН, д-р техн. наук, профессор, директор института (pervushin61@yandex.ru),
 Г.И. ЯКОВЛЕВ, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой (gyakov@istu.ru)

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

Композиционный материал на основе фторангидрита и технической серы

Представлены результаты исследования в области создания композиционного материала на основе фторангидрита, модифицированного отходом нефтеперерабатывающего производственного кластера в виде технической серы. Установлено, что применение в качестве модификаторов 15% технической серы и 2% сульфата натрия (Na_2SO_4) от массы вяжущего позволяет получить композиционный материал с повышенными физико-механическими характеристиками. Применение в качестве активатора 2% сульфата натрия способствует формированию кристаллической структуры материала, на следующем этапе в процессе термообработки в течение 60 мин при 180°C происходит формирование искусственного камня за счет полимеризации серы. Исследования физико-механических показателей разработанного композиционного материала показали повышение прочности при сжатии в два раза по сравнению с контрольным составом (фторангидрит, активированный 2% сульфата натрия), при этом также наблюдается прирост водостойкости композита на 22,2%.

Ключевые слова: фторангидрит, техническая сера, композиционные материалы, физико-технические свойства, утилизация.

Исследование выполнено при финансовой поддержке ИжГТУ им. М.Т. Калашникова в рамках научного проекта ПИА/20-67-04.

Для цитирования: Гуменюк А.Н., Полянских И.С., Ходырева М.А., Шевченко Ф.Е., Пудов И.А., Первушин Г.Н., Яковлев Г.И. Композиционный материал на основе фторангидрита и технической серы // *Строительные материалы*. 2021. № 8. С. 4–10. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-794-8-4-10>

A.N. GUMENIUK, assistant (gumeniuk.an@gmail.com), I.S. POLYANSKIKH, PhD, Assoc. Prof. (irina_maeva@mail.ru), M.A. KHODYREVA, student (khodyreva.masha@mail.ru), F.E. SHEVCHENKO, graduate student, (gism56@mail.ru), I.A. PUDOV, PhD, Assoc. Prof. (PudovIA@yandex.ru), G.N. PERVUSHIN, Dr. Sc. Engineering, Prof. (pervushin61@yandex.ru), G.I. YAKOVLEV, Doctor of Sciences (Engineering) (gyakov@istu.ru)
 Kalashnikov Izhevsk State Technical University (ISTU) (7, Studencheskaya Street, Izhevsk, 426069, Russian Federation)

Composite Materials Based on Fluoranhidrite and Industrial Sulfur

This article shows the results of fluoranhidrite and industrial sulfur composite research. 15% of industrial sulfur and 2% of sodium sulfate are the key components for a composite material with high performance properties. 2% of sodium sulphate is required to form the required structure of the composite. The heat treatment (60 min, 180°C) is the next stage and there an engineered stone is finally formed due to a sulfur polymerization. Physical-mechanical properties of modified composite, including compressive strength, are significantly increased (2 times) in comparison with the reference specimen (fluoranhidrite activated by 2% of sodium sulphate). The increase of water resistance properties up to 22,2% has also been established.

Keywords: fluoroanhidrite, industrial sulfur, composite materials, properties, utilization, recycling.

The work was carried out at the financial support by Kalashnikov Izhevsk State Technical University within the framework of the grant no PIA/20-67-04.

For citation: Gumeniuk A.N., Polyanskikh I.S., Khodyreva M.A., Shevchenko F.E., Pudov I.A., Pervushin G.N., Yakovlev G.I. Composite materials based on fluoranhidrite and industrial sulfur. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2021. No. 8, pp. 4–10. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-794-8-4-10>

На сегодняшний день нарастающий объем техногенных отходов является главным драйвером исследований в области разработки новых технологий утилизации [1–4], направленных на применение различных отходов производств в материалоемких отраслях промышленности. Одним из подобных отходов производства является фторангидрит, который представляет собой побочный продукт производства фтороводорода в твердой гранулообразной форме, получаемый в результате сернокислотного разложения плавикового шпата CaF_2 с образованием безводного сульфата кальция CaSO_4 [5]:



Данный способ получения фторангидрита реализован на большинстве предприятий по производству плавиковой кислоты [6, 7].

Во многих работах отечественных [8–10] и зарубежных авторов [11–13] предлагаются различные варианты применения вяжущего на его основе.

Молотый фторангидрит является воздушным вяжущим веществом, ключевым компонентом которого является безводный сернокислый кальций, получаемый при температуре $600\text{--}750^\circ\text{C}$. При этом

мелкодисперсный фторангидрит не обладает достаточной активностью для присоединения кристаллизационной воды, что препятствует его применению в чистом виде [8, 14]. Решение данного вопроса было подробно рассмотрено в исследовательских работах по теории твердения ангидритовых вяжущих [5, 15]. В работах [8, 15] были рассмотрены варианты активации вяжущих свойств молотого фторангидрита, в том числе исследованы варианты механоактивации, а также введение в смесь на стадии смешивания компонентов катализаторов твердения в виде первичных неустойчивых гидратов (солей). В свою очередь, получаемый материал на основе фторангидрита обладает потенциалом создания на его основе композиционных материалов строительного назначения с повышенными эксплуатационными характеристиками за счет дополнительной модификации.

По определению, композиционными материалами называются минеральные матрицы, в состав которых входят два или более компонента, значительно отличающихся по физическим и химическим свойствам. В результате полученный материал приобретает уникальные характеристики, которыми каждый отдельный компонент не обладает [16].

Примером формирования композиционных материалов строительного назначения являются полимерцементные матрицы на основе термопластичных отходов антропогенного происхождения и портландцемента [17]. Применение термопластов в качестве модификаторов минеральных матриц является достаточно распространенным методом [18–20]. Наибольшее внимание в строительном материаловедении получил такой термопласт, как техническая сера [21, 22]. Распространение данного материала обусловлено значительными объемами накопившейся технической серы [23].

Активный экономический рост вызвал значительное ускорение промышленного производства, что, в свою очередь, привело к увеличению потребления объемов нефтепродуктов. Развитие нефтеперерабатывающей промышленности вызвало скачок в производстве отходов нефтепереработки, в особенности технической серы [23].

Известно [24–26], что техническая сера представляет серьезную экологическую проблему, так как хранение осуществляется на открытых полигонах или в отвалах. Хранение сопровождается процессами микробиологического окисления с образованием серной кислоты, а также выветриванием и сублимацией, выделением остатков сероводорода и оксида серы, взаимодействием с углеводородами и образованием серосодержащих органических соединений. Все эти процессы представляют определенную угрозу для окружающей среды [26].

Предложены различные методы применения технической серы при производстве бетонных элементов, используемых при строительстве автодорог, элементов инженерных коммуникаций и конструктив-

ных элементов зданий и сооружений [25, 21]. Кроме того, модифицированные серой покрытия (на основе мастик, битумов и т. д.) обладают большей прочностью, хорошим сцеплением, а также имеют низкое водопоглощение и более долговечны [27].

Исследования также показали, что материалы на основе технической серы обладают защитными свойствами от электромагнитного и радиоактивного излучения, что, в свою очередь, открывает возможность к ее использованию при строительстве объектов электроэнергетики, объектов специального назначения [28]. В современной практике из серных бетонов производят специальные контейнеры для захоронения радиоактивных отходов и токсичных материалов в естественном или капсулированном виде, что повышает надежность захоронения [28]. Также подобные составы используются для изготовления напольной плитки в производственных цехах, подземных инженерных коммуникаций (коллекторы сточных труб, канализационные лотки), а также для морских сооружений и плотин, эксплуатируемых в агрессивной среде [21, 25].

Технология строительных материалов, изготавливаемых на основе технической серы, основывается на тепловых эффектах и структурных переходах серы из орторомбической в моноклинную, на особенностях плавления и полимеризации в температурном интервале от 70 до 206°C (экстремум этого пика наблюдается при 189°C; энергия перехода соответствует ΔE_p полимеризации, равной 19,35 Дж/г). Регулирование данного процесса осуществляется контролем за повышением температуры, длительностью прогрева и температурой остывания [25].

Таким образом, разработка композиционного материала на основе фторангидридной матрицы и технической серы является перспективным направлением, позволяющим решить одновременно проблему загрязнения окружающей среды и получения эффективных энерго- и ресурсосберегающих материалов.

Материалы и методы

На основе анализа литературы были подобраны оптимальные компоненты экспериментальных составов: фторангидрит, производство ООО «Галоген», г. Пермь; техническая сера, производство АО «ТАНЕКО», г. Нижнекамск; сульфат натрия. Изготовление композиционных образцов осуществлялось в соответствии с рационально подобранными экспериментальными составами, представленными в таблице.

Фторангидрит является отходом производства плавиковой кислоты ООО «Галоген», г. Пермь, соответствует ТУ 5744-132-05807960–98.

Сырье представляет собой однородный материал постоянного химического состава с размером частиц 1–20 мм, после помола в лабораторном истирателе ИД-200 остаток на сите 0,315 составляет 12%.

Рецептурные характеристики исследуемых
полимерцементных смесей
Polymer-cement mixtures

Состав	Фтор-ангидрит, г	Техническая сера, %	Na ₂ SO ₄ , %	В/В	П/В
Контрольный	1200	–	2	0,33	0
1		10		0,4	0,1
2		15		0,48	0,15
3		20		0,54	0,2
4		25		0,65	0,25
5		30		0,7	0,3

Активатор твердения сульфат натрия. Процент введения активатора на основе предыдущих результатов [5] принят в количестве 2% от массы вяжущего. Сульфат натрия вводился в воду затворения до полного растворения.

Техническая сера. В качестве полимерного компонента была выбрана техническая сера марки 9998, соответствующая ГОСТ 127.1–93 «Сера техническая. Технические условия».

Для равномерного распределения в объеме композита мелкодисперсный порошок технической серы подвергался предварительной механохимической обработке лабораторным диссольвером в дисперсионной среде органического растворителя при 1500 об/мин, органический растворитель применялся в соотношении 1:3 [20].

В дальнейшем техническая сера и фторангидрит перемешивались и затворялись водой с активатором твердения. Смесь тщательно перемешивалась и отливалась в металлические формы с размерами 40×40×160. После выдержки в нормальных условиях в течение 2 ч производилась распалубка образцов. Далее образцы помещались в сушильный шкаф ШС-80-01 СПУ для температурной обработки по режиму: изотермическая выдержка при 180°C в течение 60 мин, затем поэтапное охлаждение до комнатной температуры. При этом образцы после термообработки выдерживали в нормальных условиях в течение 7 и 28 сут, в контрольные даты производились измерения требуемых характеристик. Определение прочностных показателей производилось на образцах-балочках на лабораторном прессе ПГМ–100МГ4-А, скорость нагружения – 1 МПа/с. Балочки испытывались на изгиб, полученные полубалочки использовались для определения предела прочности при сжатии.

Для определения водостойкости материала и коэффициента размягчения использовались серии образцов-балочек. Испытания проводились в соответствии с ГОСТ 30629–2011 «Материалы и изделия облицовочные из горных пород. Методы испытаний». Серия образцов состояла из шести балочек одинакового состава. Определение прочности при сжатии в насыщенном водой состоянии производилось следующим образом: после 28 сут твердения

образцы укладывали в сосуд с водой комнатной температуры и выдерживали в течение двух дней. Затем их вынимали из сосуда, удаляли влагу с поверхности влажной тканью и испытывали при сжатии.

Особенности взаимодействия компонентов матрицы устанавливались с помощью ДТА на дериватографе марки TGA/DSC1 ЗАО «Меттлер-Толедо Восток». В процессе анализа регистрировали четыре параметра: кривую подъема температуры образца (Т), изменение массы (термогравиметрическую кривую – ТГ), изменение энтальпии (дифференциально-термическую кривую – ДТА) и скорость изменения массы (дифференциально-термогравиметрическую кривую – ДТГ). Условия съемки: интервал измерений 60–1100°C; скорость нагрева 30 град/мин; тигли платиновые; рабочая среда – воздух.

Исследование морфологии композиционного материала производили методом сканирующей электронной микроскопии на приборе «Thermo Fisher Scientific Quattro S» фирмы Thermo Fisher Scientific (США). Энергодисперсионной рентгеновской спектроскопией исследовали элементный анализ поверхности образцов с целью идентификации химических элементов, входящих в состав композита, и определения особенностей микроструктурного строения.

Параметры съемки микроструктуры: давление в вакуумной камере 50 Па; ускоряющее напряжение HV 20 и 10 кВ; ток пучка 12 и 16 А (Па).

Результаты исследования

Для оптимизации техногенной термопластичной добавки (технической серы) варьировалось содержание компонента от 0 до 30% от массы вяжущего, при

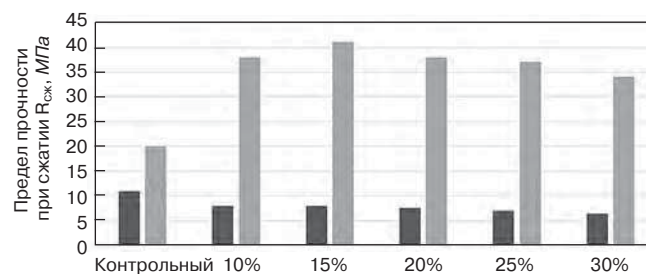


Рис. 1. Изменение прочностных характеристик модифицированных образцов на основе фторангидрита на 7-е сут (■) и 28-е сут (▨)
Fig. 1. Compressive strength of modified specimens in 7 (■) and 28 (▨) days

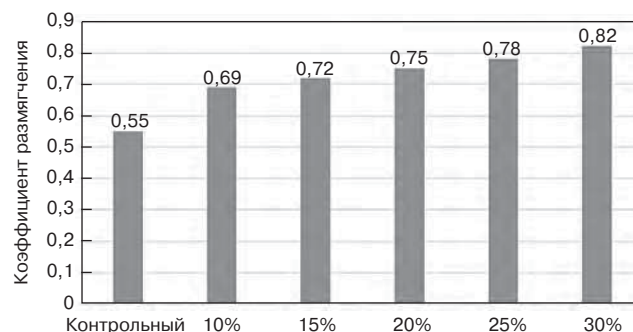


Рис. 2. Изменение коэффициента размягчения модифицированных образцов
Fig. 2. Softening coefficient of modified specimens

этом количество активатора твердения (сульфат натрия) оставалось постоянным. При анализе полученных результатов был выбран оптимальный состав, содержащий: фторангидрит, техническая сера – 15% и сульфат натрия – 2%, который обеспечивает следующие показатели: коэффициент размягчения 0,72 (рис. 2); прочность при сжатии до 40,8 МПа (после 28 сут) в сравнении с прочностью контрольного состава – 19,9 МПа.

Анализ графика (рис. 1) показал, что набор прочности материала нелинеен, в течение 7 сут процесс проходит быстрее.

При анализе результатов физико-механических исследований было выявлено, что состав № 3 с содержанием 15% полимерной серы является оптимальным, так как обеспечивает требуемые эксплуатационные показатели.

Анализ микроструктуры (рис. 3) контрольного и модифицированного образца позволил определить формирование плотных, однородных образований в структуре модифицированного искусственного камня, при этом отмечается повышенная адгезия ангидритовой матрицы к полимерному компоненту.

Результаты сравнительного анализа микроструктуры подтверждаются данными энергодисперсионного анализа (рис. 4). Модифицированный состав характеризуется плотными элементами полимерной структуры, основным компонентом которых является сера.

Для определения изменения характера новообразований проводился термический анализ.

На дериватограмме контрольного образца (рис. 5, изотермы 1 и 2) фторангидрита с активатором твердения отмечен двойной эндотермический эффект 195 и 221,5°C, характерный удалению кристаллизационной воды, а также эндотермический эффект при 848,5°C в области, характерной для диссоциации кальция на оксид кальция и углекислый газ и частичной диссоциации сульфата кальция и низкоосновных гидросиликатов кальция в незначительном объеме. Эффекты в области

420–470°C связаны с перестройкой кристаллической решетки с образованием нерастворимого ангидрита. Фторангидрит, в свою, очередь представлен сочетанием ангидрита, карбоната кальция и гипса.

При модификации фторангидрита дополнительно 15% (рис. 5, изотермы 3 и 4) обработанной технической серой отмечен незначительный эндозэффект в области 90–150°C, связанный с изменением фазового состояния серы, а именно перехода из альфа- в бета-форму, отмечен сдвиг температуры, соответствующей удалению кристаллизационной воды, до 196,5 и 225°C соответственно, что косвенно подтверждает изменения условий гидратации фторангидрита в сторону ускорения и полноты протекания реакции. Отмечен сильный экзотермический эффект в области температуры 340–370°C, который связан с выгоранием серы на воздухе с образованием SO₂ и

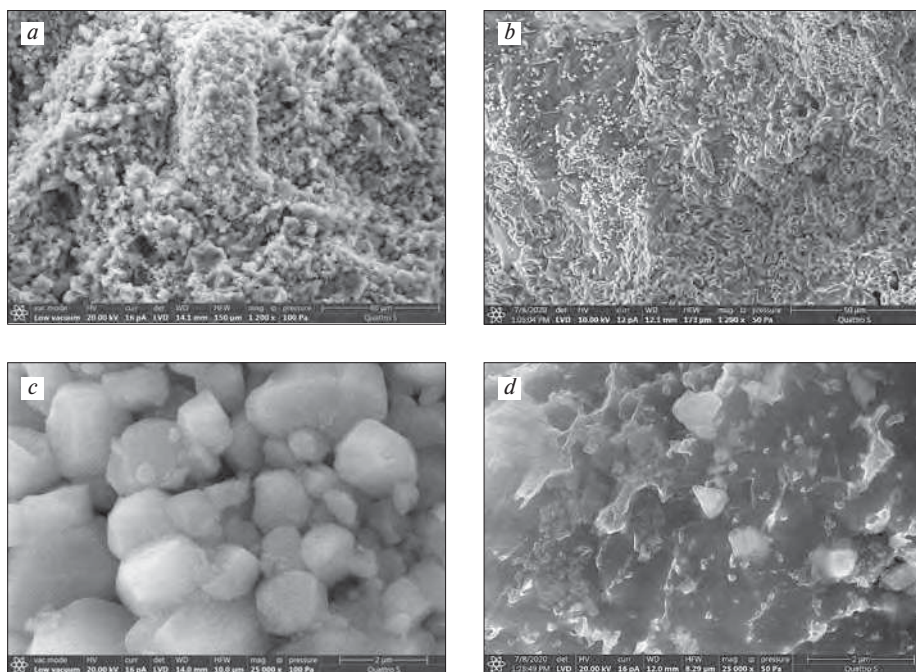


Рис. 3. Микроструктура при увеличении 1200×: а – контрольный образец; б – модифицированный образец; при увеличении 25000×: с – контрольный образец; д – модифицированный образец
Fig. 3. Microstructure at 1200× magnification: a – reference specimen; b – modified specimen; 25000× magnification: c – reference specimen, d – modified specimen

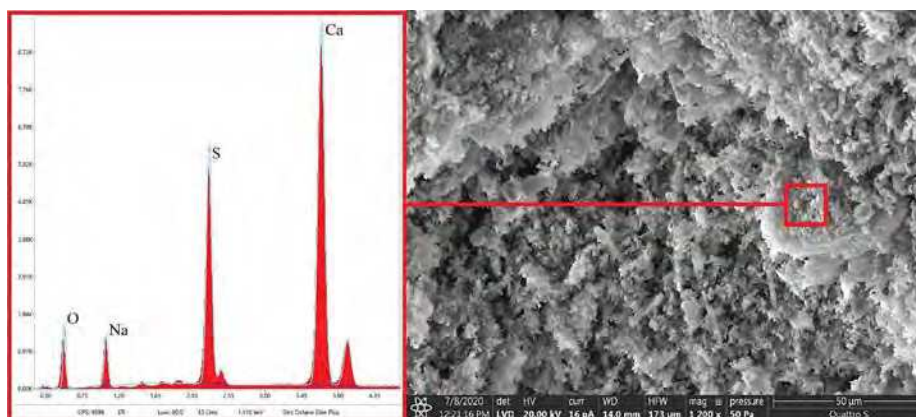


Рис. 4. Результаты EDX анализа оптимального состава и область исследования
Fig. 4. Results of EDX analysis of the specimen and the studied area

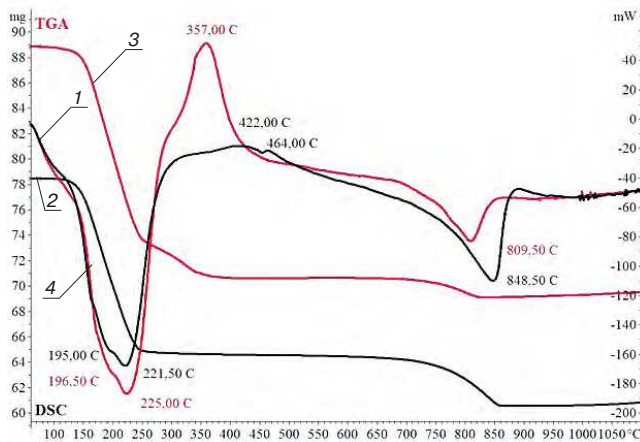


Рис. 5. Дифференциально-термический анализ контрольного образца (изотермы 1 и 2) и модифицированного композита (изотермы 3 и 4)
Fig. 5. Differential thermal analysis of the reference (line 1 and 2) and the modified specimens (line 3 and 4)

SO₃; при этом эффект проявляется в значительном объеме, сглаживая сопутствующие эффекты от перестройки кристаллической решетки вяжущего, не позволяя их идентифицировать. Также отмечен эндотермический эффект в области 800°C, связанный с диссоциацией сульфата кальция и низкоосновных гидросиликатов кальция.

Таким образом, данные спектральных анализов согласуются с результатами анализа микроструктуры и указывают на формирование минерально-полимерного композиционного материала с повышенной плотностью.

Выводы

По результатам проведенных исследований было установлено, что при введении 15% модифицированной технической серы прочность при сжатии повышается в два раза по сравнению с контрольным образцом, коэффициент размягчения составляет 0,72%. Композиционный материал при повышении полимервяжущего отношения обладает потенциалом к дальнейшему улучшению физико-технических характеристик, что позволяет увеличить объем рационального используемого техногенного отхода, способствует улучшению эксплуатационных характеристик материала и расширению области применения изделий на основе фторангидрита.

Список литературы / References

- Erkinbaeva N., Ysmanov E., Tashpolotov Y. The use of technogenous waste from the kadamjai antimony plant as a raw material for the production of portland cement. *Bulletin of Science and Practice*. 2021. No. 7 (3), pp. 206–211. <https://doi.org/10.33619/2414-2948/64/21>
- Орешкин Д.В., Шадрюнова И.В., Чекушина Т.В., Прошляков А.Н. Утилизация отходов мрамора и бурового шлама в процессе производства строительных материалов // *Строительные материалы*. 2019. № 4. С. 65–72. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-769-4-65-72>
- Oreshkin D.V., Shadrunova I.V., Chekushina T.V., Proshlyakov A.N. Disposal of waste marble and drill cuttings in the production of building materials. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2019. No. 4, pp. 65–72. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-769-4-65-72> (In Russian).
- Guryanov A., Korenkova S., Bezgina L. Technogenic resources for nanotechnologies in construction. *MATEC Web of Conferences*. 2017. No. 117. 00061 <https://doi.org/10.1051/matecconf/20171170006>
- Kansal C.M., Goyal R. Effect of nano silica, silica fume and steel slag on concrete properties. *Materials Today: Proceedings*. 2020. Vol. 45. Part 6, pp. 4535–4540. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.1162>
- Будников П.П., Зорин С.П. Ангидритовый цемент. М.: Государственное издательство литературы по строительным материалам, 1954. 93 с.
- Budnikov P.P., Zorin S.P. Angidritovyy tsement [Anhydrite cement]. Moscow: State publishing house of literature on building materials. 1954. 93 p.
- Биспен Т.А., Масленников И.Г., Молдавский Д.Д. Получение фтористого водорода и плавиковой кислоты высокой чистоты // *Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института*. 2016. № 33 (59). 13–18.
- Bispen T.A., Maslennikov I.G., Moldavsky D.D. Production of hydrogen fluoride and high-purity hydrofluoric acid. *Izvestiya Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo instituta*. 2016. No. 33 (59), pp. 13–18. (In Russian).
- Федорчук Ю.М., Цыганкова Т.С. Разработка способов снижения воздействия фтороводородных производств на окружающую среду: Монография. Томск: Издательство Томского политехнического университета, 2010. 149 с.
- Fedorchuk Yu.M., Tsygankova T.S. Razrabotka sposobov snizheniya vozdeystviya ftorovodorodnykh proizvodstv na okruzhayushchuyu sredu: monografiya [Development of ways to reduce the impact of hydrogen fluoride production on the environment: monograph]. Tomsk: Publishing house of the Tomsk Polytechnic University. 2010. 149 p.
- Аниканова А.Л., Волкова О.В., Кудяков А.И., Курмангалиева А.И. Активированное композиционное фторангидритовое вяжущее // *Строительные материалы*. 2019. № 1–2. С. 36–42. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-767-1-2-36-42>
- Anikanova L.A., Volkova O.V., Kudyakov A.I., Kurmangalieva A.I. Mechanically activated composite fluoroanhydrite binder. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2019. No. 1–2, pp. 36–42. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-767-1-2-36-42> (In Russian).
- Zhakupova G., Sadenova M.A., Varbanov P.S. Possible alternatives for cost-effective neutralisation of fluoroanhydrite minimising environmental impact. *Chemical Engineering Transactions*. 2019.

- Vol. 76, pp. 1069–1074. <https://doi.org/10.3303/CET19761791069-1074>
10. Ponomarenko A. Obtaining of granulated gypsum anhydrite on the basis of technogenic wastes of chemical and metallurgical complex for use in portland cement production. *KnE Materials Science*. 2020. No. 6 (1), pp. 143–149. <https://doi.org/10.18502/kms.v6i1.8059>
 11. Fornés I.V., Vaičiukynienė D., Nizevičienė D., Doroševas V. The improvement of the water-resistance of the phosphogypsum by adding waste metallurgical sludge. *Journal of Building Engineering*. 2021. No. 43. 102861 <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102861>
 12. Hassan S., Salah H., Shehata N. Effects of alternative calcium sulphate-bearing materials on cement characteristics in vertical mill and storing. *Case Studies in Construction Materials*. 2021. No. 14. e00489 <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00489>
 13. Raisa F., Kamouna A., Jelidib A., Chaabounia M. A study on fluoroanhydrite: a solid waste of the chemical industry: characterization and valorization attempts. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2012. No. 28. 012025. doi:10.1088/1757-899X/28/1/012025
 14. Курмангалиева А.И., Аниканова Л.А., Волкова О.В., Кудяков А.И., Саркисов Ю.С., Абзаев Ю.А. Активация процессов твердения фторангидридных композиций химическими добавками солей натрия // *Известия вузов. Химия и химическая технология*. 2020. Т. 63. Вып. 8. С. 73–80. DOI 10.6060/ivkkt.20206308.6137
 14. Kurmangaliev A.I., Anikanova L.A., Volkova O.V. Activation of hardening processes of fluorogypsum compositions by chemical additives of sodium salts. *Izvestiya vuzov. Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya*. 2020. Vol. 63. No. 8, pp. 73–80. DOI: 10.6060/ivkkt.20206308.6137
 15. Manjit Singh, Mridul Garg. Making of anhydrite cement from waste gypsum. *Cement and Concrete Research*. 2000. No. 30 (4), pp. 571–577. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00209-X](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00209-X)
 16. Gdoutos E.E. Composite Materials. In: *Fracture Mechanics. Solid Mechanics and Its Applications*. 2020. Vol. 263. https://doi.org/10.1007/978-3-030-35098-7_11
 17. Попов К.Н. Полимерные и полимерцементные бетоны, растворы и мастики. М.: Высшая школа, 1987. 72 с.
 17. Popov K.N. [Polymer and polymer-cement concretes, mortars and mastics]. Moscow: Vysshaya shkola. 1987. 72 p.
 18. Grigore M.E. Methods of recycling, properties and applications of recycled thermoplastic polymers. *Recycling*. 2017. Vol. 2 (4). <https://doi.org/10.3390/recycling2040024>
 19. Lei Gu, Togay Ozbakkaloglu. Use of recycled plastics in concrete: A critical review. *Waste Management*. 2016. No. 51, pp. 19–42 <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.03.005>
 20. Gumeniuk A., Hela R., Polyanskikh I. [et al.]. Durability of Concrete with Man-made Thermoplastic Sulfur Additive. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: XXIII International Scientific Conference on Advance in Civil Engineering: «CONSTRUCTION – THE FORMATION OF LIVING ENVIRONMENT»*. Hanoi, Vietnam, 23–26 September 2020. 032012. DOI: 10.1088/1757-899X/869/3/032012.
 21. Fediuk R., Mugahed Amran Y., Mosaberpanah M., Danish A., El-Zeadani M., Klyuev S., Vatin N., A critical review on the properties and applications of sulfur-based concrete. *Materials*. 2020. No. 13. 4712, DOI: <https://doi.org/10.3390/ma13214712>
 22. Le H., The application of sulfur-asphalt concrete with modifiers in the climatic conditions of Vietnam. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. No. 890. 012101. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/890/1/012101>
 23. Wagenfeld J.G., Al-Ali K., Almheiri S. [et al.] Sustainable applications utilizing sulfur, a by-product from oil and gas industry: A state-of-the-art review. *Waste Management*. 2019. No. 95, pp. 78–89. DOI: 10.1016/j.wasman.2019.06.002.
 24. Бобылев Ю.Н. Мировой рынок нефти: основные тенденции 2018 г. // *Экономическое развитие России*. 2019. № 1 (26). С. 10–13.
 24. Bobylev Yu.N. World oil market: main trends in 2018. *Ekonomicheskoye razvitiye Rossii*. 2019. No. 1 (26), pp. 10–13. (In Russian).
 25. Патуроев В.В. Полимербетоны. НИИ бетона и железобетона. М.: Стройиздат, 1987. 286 p.
 25. Paturоеv V.V. Polimerbetony. NII betona i zhelezobetona [Polymer concrete. Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete]. Moscow: Stroyizdat. 1987. 286 p.
 26. Mohamed Sassi, Ashwani K. Gupta Sulfur recovery from acid gas using the claus process and high temperature air combustion technology. *American Journal of Environmental Sciences*. 2008. No. 4 (5), pp. 502–511. DOI: 10.3844/ajessp.2008.502.511
 27. Dugarte M., Martinez-Arguelles G., Torres J. Experimental evaluation of modified sulfur concrete for achieving sustainability in industry applications. *Sustainability*. 2019. No. 11 (1), p. 70. <https://doi.org/10.3390/su11010070>
 28. Королев Е.В., Прошин А.П., Баженов Ю.М., Соколова Ю.А. Радиационно-защитные и коррозионностойкие серные строительные материалы. 2-е изд. М.: Палеотип, 2006. 272 с.
 28. Korolev E.V., Proshin A.P., Bazhenov Yu.M., Sokolova Yu.A. Radiatsionno-zashchitnyye i korrozionnostoykiye sernyye stroitel'nyye materialy. 2-ye izdaniye. [Radiation-protective and corrosion-resistant sulfur building materials / 2nd edition]. Moscow: Paleotype. 2006. 272 p.

УДК 666.914

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-794-8-11-17>

В.Б. ПЕТРОПАВЛОВСКАЯ, канд. техн. наук (victoriapetrop@gmail.com),
 М.Ю. ЗАВАДЬКО, инженер (ассистент) (79043517876@yandex.ru),
 Т.Б. НОВИЧЕНКОВА, канд. техн. наук (tanovi.69@mail.ru),
 К.С. ПЕТРОПАВЛОВСКИЙ, канд. техн. наук (raikiri@inbox.ru)

Тверской государственный технический университет (170026, г. Тверь, наб. Афанасия Никитина, 22)

Применение метаксаолина и золы гидроудаления в безобжиговых гипсовых композитах

Представлены результаты исследований безобжиговых гипсовых композитов, модифицированных минеральными добавками – высокоактивным метаксаолином и обогащенной золой – отходом гидроудаления тепловых электростанций. В качестве основного сырья в исследованиях использовались отходы двухводного гипса в виде отработанных форм для литья, образующиеся на предприятиях керамического производства. Нарастающий интерес к безобжиговым технологиям за рубежом вызван необходимостью решения экологических и экономических проблем. Исключение наиболее энергоемких операций – обжига в первую очередь и сохранение уникальных свойств, присущих гипсовым материалам, отвечает принципам «зеленого» строительства – сохранения или повышения качества зданий и комфорта их внутренней среды. Использование для получения отходов гипсовых материалов промышленного производства добавляет ценности с точки зрения снижения уровня потребления энергетических и материальных ресурсов. В целях расширения возможностей применения безобжиговых технологий предложено модифицировать структуру гипсового материала добавками, повышающими его качество и эффективность. В исследованиях приведен сравнительный анализ структуры и свойств получаемого безобжигового модифицированного гипсового камня. Подтверждена эффективность применения добавок метаксаолина и золы гидроудаления в качестве активных минеральных модификаторов в безобжиговых гипсовых композитах.

Ключевые слова: гипс, высокоактивный метаксаолин, топливная зола, гидроудаление, активные минеральные добавки.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 21-79-30004).

Для цитирования: Петропавловская В.Б., Завадько М.Ю., Новиченкова Т.Б., Петропавловский К.С. Применение метаксаолина и золы гидроудаления в безобжиговых гипсовых композитах // *Строительные материалы*. 2021. № 8. С. 11–17.
 DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-794-8-11-17>

V.B. PETROPALOVSKAYA, Candidate of Sciences (Engineering) (victoriapetrop@gmail.com),
 M.Y. ZAVADKO, Engineer (Assistant Lecturer (79043517876@yandex.ru),
 T.B. NOVICHENKOVA, Candidate of Sciences (Engineering) (tanovi.69@mail.ru),
 K.S. PETROPALOVSKII, Candidate of Sciences (Engineering) (raikiri@inbox.ru)
 Tver State Technical University (22, Afanasy Nikitin Embankment, Tver, 170026, Russian Federation)

Application of Metakaolin and Wet Ash Discharge in Non-Fired Gypsum Composites

The article discusses the results of studies of non-fired gypsum composites modified with mineral additives – highly active metakaolin and enriched ash – waste from hydro removal of thermal power plants. Waste gypsum dihydrate in the form of waste molds for casting, generated at the enterprises of ceramic production, was used as the main raw material. The growing interest in non-firing technologies abroad is caused by the need to solve environmental and economic problems. The elimination of the most energy-intensive operations – firing, in the first place, and the preservation of the unique properties inherent in gypsum materials, corresponds to the principles of green building – the preservation or improvement of the quality of buildings and the comfort of their internal environment. The use of industrial waste for their production adds value in terms of reducing the level of consumption of energy and material resources. In order to expand the possibilities of using non-fired technologies, it is proposed to modify the structure of the gypsum material with additives that increase its quality and efficiency. The research provides a comparative analysis of the structure and properties of the resulting non-fired modified gypsum stone. The effectiveness of the use of metakaolin and hydro removal ash additives as an active mineral additive in non-fired gypsum composites has been confirmed.

Keywords: gypsum, highly active metakaolin, fuel ash, wet ash discharge, active mineral additives.

The study was supported by a grant from the Russian Science Foundation (project No. 21-79-30004).

For citation: Petropavlovskaya V.B., Zavadko M.Y., Novichenkova T.B., Petropavlovskii K.S. Application of metakaolin and wet ash discharge in non-fired gypsum composites. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2021. No. 8, pp. 11–17. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-794-8-11-17>

В настоящее время высокая востребованность высокоэффективных строительных растворов и смесей способствует появлению новых технических возможностей их модификации в целях повышения эксплуатационных характеристик с одновременным снижением ресурсоемкости их производства. Однако на данный момент наиболее эффективным направлением энергосбережения, как и повышения эксплуатаци-

онных характеристик, в производстве строительных материалов все еще остается их модификация путем введения различных активных минеральных добавок в состав: зол, шлаков, пуццолановых пород, позволяющих эффективно управлять структурой и свойствами.

Механизм действия активных минеральных добавок рассмотрен многими учеными [1–4] и отличается в системах на разных видах вяжущего незначи-

тельно; эффективность их применения, как правило, обусловлена образованием гидросиликатов.

В качестве активных минеральных добавок, способствующих повышению водостойкости композиций, содержащих известь, давно известно применение глин. Например, к активным минеральным добавкам относят метакаолин, представляющий собой аморфный алюмосиликат ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$), который получают путем прокаливании белой глины – каолина до температуры 600–850°C [5–7].

Технически процесс получения метакаолина по своей сути представляет перевод кристаллической фазы белой глины в аморфную, прокаливанием и последующим быстрым охлаждением.

Положительное влияние метакаолина на цементные системы обусловлено его реакцией с гидроксидом кальция $\text{Ca}(\text{OH})_2$ с образованием гидрата силиката кальция. При этом метакаолин относят к высокоактивным пуццоланам, позволяющим связать гидроксид кальция полностью [8–10].

Метакаолин также является эффективной добавкой к гипсоцементно-пуццолановым и гипсоизвестково-пуццолановым вяжущим, новые нерастворимые гидратные вещества в составах которых позволяют приблизить к портландцементу композиции на гипсовом вяжущем, отличающиеся низкой водостойкостью, обусловленной высокой растворимостью гипса и расклинивающим эффектом водных пленок.

Действительно, низкая водостойкость гипсового вяжущего в первом случае обусловлена увлажнением затвердевшего камня, образованием насыщенного раствора сульфата кальция и, как следствие, снижением связи между кристаллами гипса. А во втором – адсорбцией влаги на внутренних поверхностях микрощелей в уже затвердевшем гипсовом камне, которому свойственна высокая пористость за счет расклинивающего действия водных пленок способствующих разъединению кристаллических структур.

Рассматривая причины невысокой водостойкости гипсового вяжущего, становится очевидным, что реальным способом ее повышения, как и повышения прочности, может служить введение в гипсовые составы веществ, обеспечивающих образование водостойких и твердеющих в воде продуктов [11–14]. Стоит также отметить, что портландцемент и известь в качестве таких веществ наряду с положительным влиянием, связанным с образованием водостойких соединений, способствуют также образованию продуктов, способных разрушать или ослаблять уже затвердевшую систему с течением времени. К таким продуктам в том числе относится этtringит (гидросульфат алюмината кальция, или цементная бацилла). Таким образом, именно необходимость регулировать в первую очередь процесс образования гидросульфат алюмината кальция через концентрацию гидроокиси кальция в водном растворе приводит к необходимости применения активных минеральных добавок, обеспечивающих образование низкоосновных гидроалюминатов кальция.

Активная минеральная добавка в модифицированных гипсовых системах позволяет снизить концентрацию гидроксида кальция до уровня, когда стабильное существование высокоалюминатных гидроксидов кальция невозможно и создаются предпосылки для их перехода в низкоосновные гидроалюминаты кальция, не приводящие к разрушению системы с течением времени.

Активные минеральные добавки условно можно разделить на две группы: состоящие из аморфного кремнезема, богатые продуктами обжига глинистых веществ и представляющие собой охлажденную магму. Вторая группа включает продукты обжига глин, реакционная способность которых обусловлена переходом инертного каолинита в активный метакаолинит, аморфизованный в результате удаления гидратной влаги, а также топливные золы, обычно содержащие до 80% частичек из кремнеземисто-алюминатного стекла округлой формы.

Наряду с метакаолином в качестве высокодисперсного модификатора используется топливная зола. Чаще всего используется топливная зола сухого удаления (зола-уноса). Она применяется в качестве модификатора при изготовлении ячеистых бетонов, керамзитобетонов и керамических изделий, асфальтобетонов и т. д. [15–17]. Зола-уноса эффективно применяют в составе геополимерных композиций для снижения их усадки при твердении [17]. В то же время зола гидроудаления остается практически невостребованной. Она отличается от золы сухого удаления небольшим содержанием оксидов кальция, магния и высоким содержанием алюмосиликатных фаз. Стоит отметить, что качество золы как активной минеральной добавки очень зависимо от примесей, в частности несгоревшего топлива и серного ангидрида и др. [15–17].

В данных исследованиях в качестве активной минеральной добавки наряду с метакаолином применялась обогащенная топливная зола гидроудаления. В работе был выполнен сравнительный анализ безобжигового гипсового композита, модифицированного высокоактивной минеральной добавкой – метакаолином и золой.

Эффективность активных минеральных добавок изучалась именно на безобжиговых гипсовых композиционных составах, а не цементных, поскольку внедрение технологии производства безобжиговых гипсовых изделий ограничивается именно их недостаточной водостойкостью. При этом гипсовые материалы обладают рядом уникальных свойств и технологических преимуществ в сравнении с другими видами вяжущих и обладают высокой конкурентоспособностью в области стремительно развивающихся технологий зеленого строительства [18, 19]. Экономическая эффективность производства и применения гипсового вяжущего прослеживается на всех жизненных циклах ввиду повсеместной распространенности сырья, возможности использования отходов различных отраслей промышленности, а

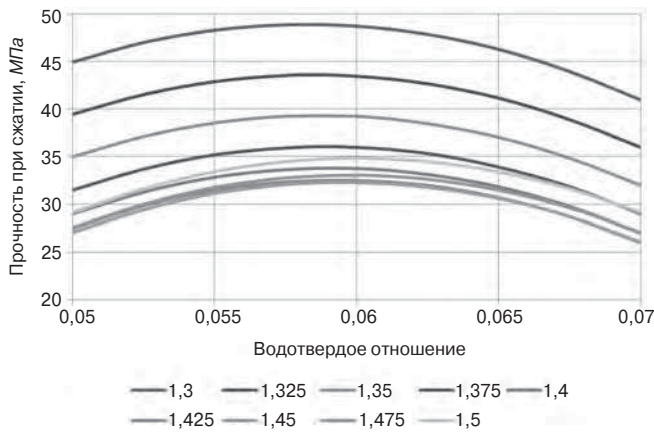


Рис. 1. Влияние водосодержания на прочность безобжигового композита, модифицированного добавкой метакаолина

Fig. 1. Effect of water content on the strength of a non-fired composite modified with the addition of metakaolin

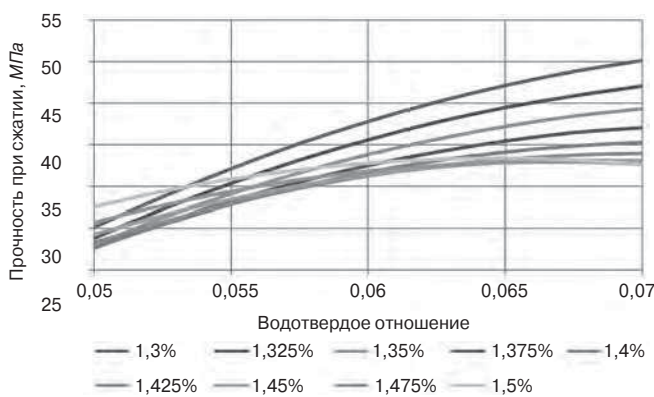


Рис. 3. Влияние водосодержания на прочность безобжигового композита, модифицированного добавкой топливной золы гидроудаления

Fig. 3. Influence of water content on the strength of a non-fired composite modified with a fuel wet ash discharge additive

также низкой топливно- и энергоемкости при добыче сырья и производстве, снижении массы конструкций, повышении тепло- и звукоизоляции при применении и эксплуатации, возможности переработки после применения [18–21]. Перспективы применения активных минеральных добавок в модифицированных гипсовых системах бесспорны.

В данной работе в качестве основного исходного компонента композиционного вяжущего использовались отходы завода «Самарский Стройфарфор» в виде отработанных форм для литья изделий строительной керамики.

В качестве добавок в исследованиях композиций на основе двудного техногенного гипса также использовались:

- метакаолин производства ООО «Синерго», химический анализ которого был определен на базе ТвГТУ (г. Тверь). Среднее количество диоксида кремния, оксидов алюминия составило: SiO_2 – 55,72%; Al_2O_3 – 44,28%. Химическая формула используемого метакаолина: $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 1,26 \text{SiO}_2$;

- топливная зола гидроудаления Тверской области;
- воздушная известь Тверского комбината строительных материалов № 2 (3-й сорт, кальциевая, быстрогасящаяся по ГОСТ 9179).

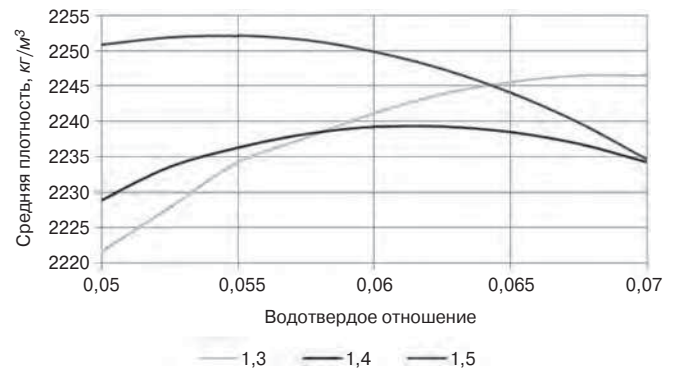


Рис. 2. Влияние водосодержания на среднюю плотность безобжигового композита, модифицированного добавкой метакаолина

Fig. 2. Influence of water content on the average density of a non-fired composite modified with the addition of metakaolin

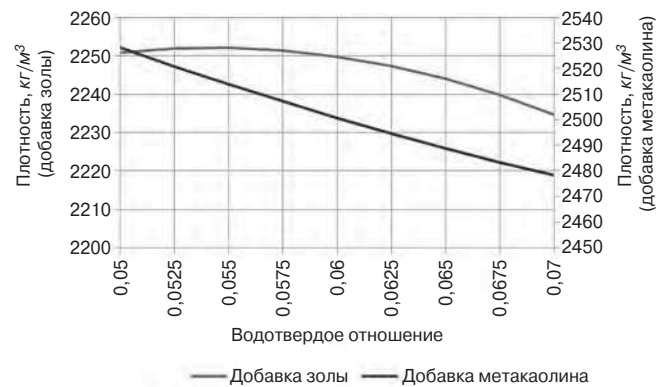


Рис. 4. Сравнительный анализ влияния водосодержания на среднюю плотность безобжигового композита, модифицированного добавками метакаолина и топливной золы гидроудаления

Fig. 4. Comparative analysis of the effect of water content on the average density of a non-fired composite modified with the addition of metakaolin and wet ash discharge

В качестве затворителя применялась водопроводная питьевая вода, удовлетворяющая требованиям ГОСТ 23732–79 «Вода для бетонов и растворов. Технические условия».

Поскольку дисперсность минерального порошка метакаолина способствует повышению водопотребности сырьевой смеси и может провоцировать существенный спад прочности затвердевшего гипсового камня, то при исследовании его влияния на структуру и свойства безобжигового композита и оптимизации водосодержания смеси использовался двухфакторный эксперимент. Содержание добавки метакаолина на первом этапе исследований, как и добавки золы на втором этапе, варьировалось от 1,3 до 1,5%; содержание воды (В/Т) находилось в пределах от 0,05 до 0,07; интервалы варьирования были обусловлены результатами исследований, полученных ранее.

В результате проведенного эксперимента получено уравнение, описывающее совместное влияние входных параметров (содержания воды и метакаолина) на предел прочности при сжатии полученного модифицированного гипсового камня:

$$Y(R_{сж}) = f(X_1, X_2) = 33.72 - 1.00X_1 - 6.93X_2 - 5.73X_1^2 + X_2^2 - 8.02X_1X_2,$$

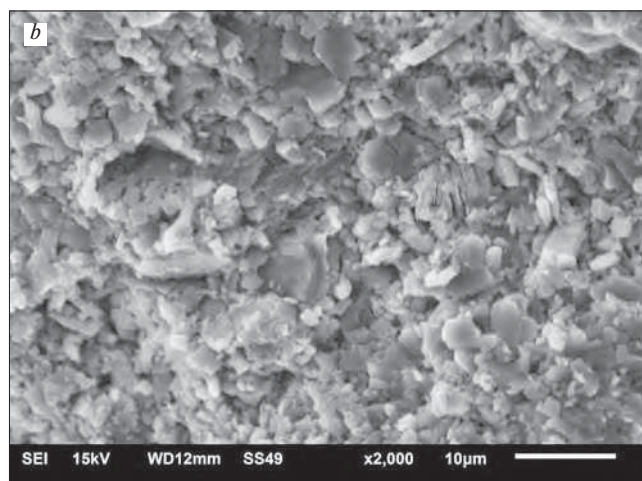
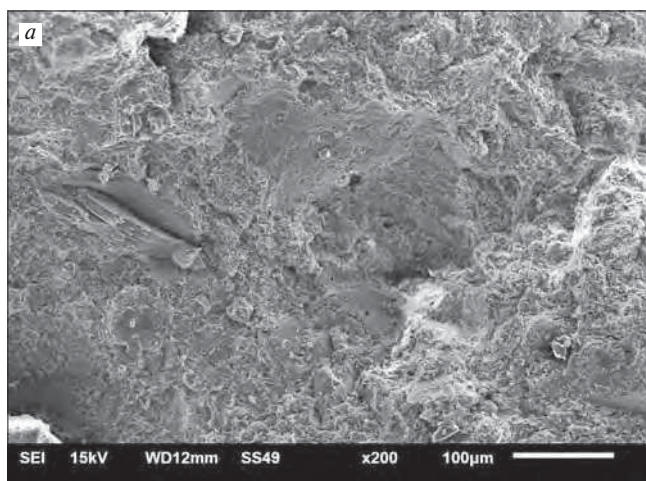


Рис. 5. Микроструктура безобжигового композита на основе двуводного гипса, модифицированного добавкой метакаолина: *a* – увеличение 200×; *b* – увеличение 2000×

Fig. 5. Microstructure of a non-fired composite based on gypsum dihydrate modified with the addition of metakaolin: *a* – magnification 200×; *b* – magnification 2000×

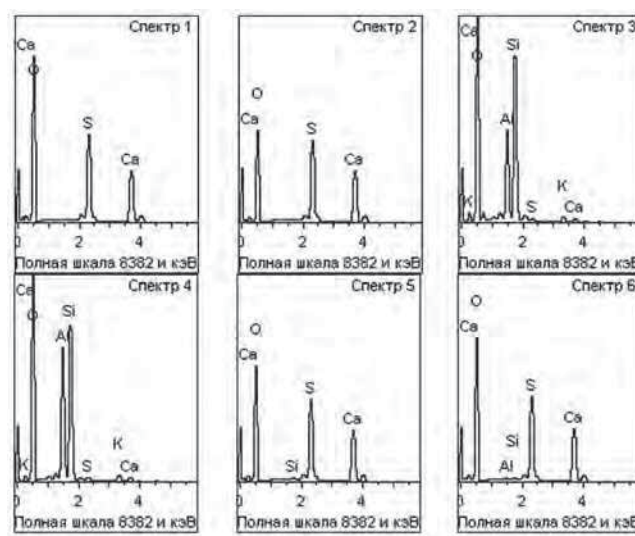
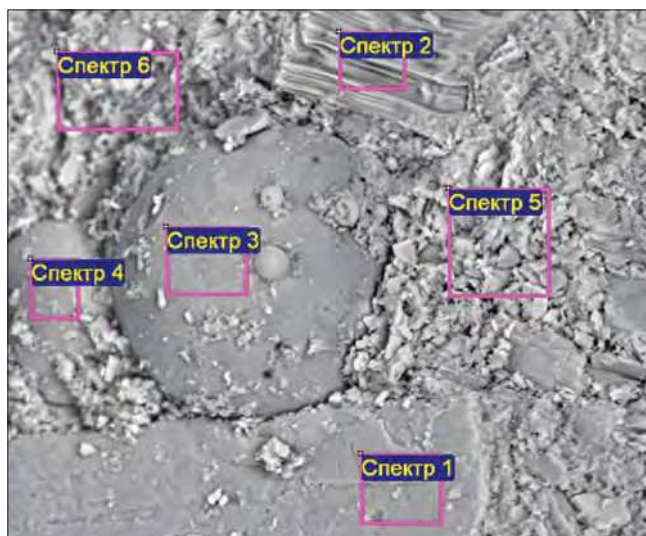


Рис. 6. Микроструктура безобжигового композита на основе двуводного гипса, модифицированного добавкой золы, со спектрами
Fig. 6. Microstructure and spectra of a non-fired composite based on gypsum dihydrate with the addition of wet ash discharge

где Y – предел прочности при сжатии прессованного гипсового материала в возрасте 14 сут твердения во влажных условиях.

Прочность образцов, испытанных в возрасте 14 сут, при всех значениях метакаолина в пределах исследованного диапазона от 1,3 до 1,45 снижается с увеличением процентного содержания порошка метакаолина (рис. 1), что, по-видимому, обусловлено уменьшением количества кристаллизационных контактов между частицами дигидрата в предлагаемой системе, а следовательно, количества мостиков срастания в образующейся структуре. Наибольшей плотностью обладают образцы модифицированного гипсового камня с минимальным водосодержанием – $V/T=0,05$. Результаты исследований по средней плотности (рис. 2) свидетельствуют об участии добавки в пластификации пресс-массы. Кроме того, стоит также отметить роль метакаолина (при его содержании в количестве 1,4–1,45%) в повышении водостойкости модифицированного гипсового камня. Водостойкость

гипсового камня, определенная по методике А.Ф. Полака, в этом интервале изменения содержания добавки достигает максимального значения, коэффициент водостойкости достигает значения 1,19.

Проведенные исследования влияния добавки золы на свойства модифицированного безобжигового гипсового камня в возрасте 14 сут, также выполненные с использованием двухфакторного эксперимента, показали, что наибольшей прочностью (рис. 3) и плотностью характеризуется модифицированный гипсовый камень с водосодержанием 0,055. Максимальная плотность $2252,1 \text{ кг/м}^3$ достигается при содержании алюмосиликатного компонента золы 1,5%. Коэффициент водостойкости существенно ниже, чем при использовании метакаолина, не превышает значения 0,8. Сравнительные результаты по плотности композитов, модифицированных компонентом золы и метакаолином, представлены на рис. 4.

По результатам проведенного микроструктурного и спектрального анализа чистого и модифицирован-

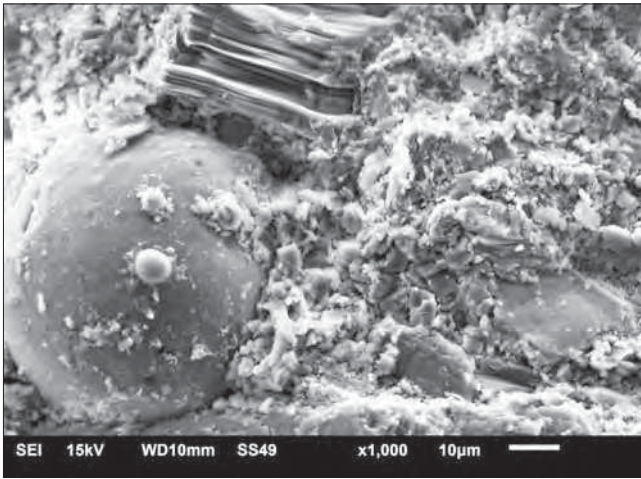


Рис. 7. Микроструктура безобжигового композита на основе двухводного гипса с добавкой золы

Fig. 7. Microstructure of a non-fired composite based on gypsum dihydrate with the addition of wet ash discharge

ного гипсового камня было выполнено сравнение элементного состава исходного дигидрата и модифицированной композиции как на поверхности зерен, так и в зонах контакта частиц дигидрата сульфата кальция разного размера между собой и контактов между частицами дигидрата с добавками метакрилина (рис. 5) или микросферами золы (рис. 6, 7). При анализе безобжигового гипсового камня без добавок установлено отсутствие примесей в значительных

Список литературы

1. Орынбеков Е.С., Нурлыбаев Р.Е., Селяев В.П., Кульдеев Е.И. Сухие строительные смеси для штукатурных работ с тонкодисперсными минеральными активными добавками // *Региональная архитектура и строительство*. 2019. № 2 (39). С. 72–79.
2. Сенцова А.Ю., Гурова Е.В. Активные минеральные добавки в производстве сухих строительных смесей. *Архитектурно-строительный и дорожно-транспортный комплексы: проблемы, перспективы, инновации: Материалы IV Международной научно-практической конференции*. Омск, 2019. С. 456–460.
3. Кайс Х.А. Состав и свойства бетона на основе гипсоцементно-пуццолановых вяжущих (ГЦПВ) // *Тенденции развития науки и образования*. 2019. № 50–2. С. 21–24.
4. Grait A.A.H., Kolosova N.B. The effect of recycled aggregate and pozzolana on concrete properties // *Components of Scientific and Technological Progress*. 2018. No. 1 (35), pp. 6–14.
5. Старкова Е.М. История появления экологически чистой минеральной добавки — метакрилин. *Научное сообщество студентов XXI столетия. Технические науки: Материалы XCV студенческой международной научно-практической конференции*. Новосибирск, 2020. С. 44–46.
6. Шишканова В.Н., Никитина К.В. Исследование влияния метакрилина на водопоглощение и прочность бетона. *Идеи и проекты молодежи России:*

количествах. Состав содержит только элементы, представляющие сульфаты кальция. В случае спектрального анализа безобжигового гипсового камня с добавкой топливной золы гидроудаления на спектре 6 наряду с алюминием и кремнием обнаруживается высокое содержание кальция и появление калия (К) в качестве примеси, что отражается на процессах структурообразования гипсового камня, прежде всего на формировании его более дефектной структуры.

Выводы

Таким образом, подтверждена эффективность применения добавок метакрилина и золы гидроудаления в качестве активной минеральной добавки в безобжиговых гипсовых композитах. Наибольший эффект по прочности обеспечивает зольный модификатор, тогда как метакрилин обеспечивает безобжиговым композитам высокую водостойкость и минимальное водопоглощение (1,81%). Максимальная прочность гипсового камня с топливной золой гидроудаления 50 МПа достигается при содержании добавки 1,4%. Применение метакрилина и обогащенной золы гидроудаления в качестве активных минеральных добавок в безобжиговых композитах позволяет направленно формировать свойства получаемого материала и обеспечивать повышенные физико-механические и эксплуатационные свойства.


References

1. Orynbekov E.S., Nurlybaev R.E., Selyaev V.P., Kul'deev E.I. Dry building mixtures for plaster works with fine mineral active additives. *Regional'naya arhitektura i stroitel'stvo*. 2019. No. 2 (39), pp. 72–79. (In Russian).
2. Sencova A.YU., Gurova E.V. Active mineral additives in the production of dry building mixtures. *Architectural, construction and road transport complexes: problems, prospects, innovations: Materials of the IV International Scientific and Practical Conference*. Omsk. 2019, pp. 456–460. (In Russian).
3. Kajs H.A. Composition and properties of concrete based on gypsum-cement-pozzolan binders (RCP). *Tendencii razvitiya nauki i obrazovaniya*. 2019. No. 50–2, pp. 21–24. (In Russian).
4. Grait A.A.H., Kolosova N.B. The effect of recycled aggregate and pozzolana on concrete properties. *Components of Scientific and Technological Progress*. 2018. No. 1 (35), pp. 6–14. (In Russian).
5. Starkova E.M. The history of the emergence of an environmentally friendly mineral supplement — metakaolin. *Scientific community of students of the XXI century. Engineering: Proceedings of the XCV Student International Scientific and Practical Conference*. Novosibirsk. 2020, pp. 44–46. (In Russian).
6. Shishkanova V.N., Nikitina K.V. Study of the influence of metakaolin on water absorption and concrete strength. *Ideas and Projects of Russian Youth: Materials of the II All-Russian Scientific and Practical Conference*. Cheboksary. 30 May 2019, pp. 56–64. (In Russian).


- Материалы II Всероссийской научно-практической конференции.* Чебоксары. 30 мая 2019. С. 56–64.
7. Арутюнов Г.М. Модифицирование белого цемента органоминеральной добавкой на основе гашеной извести и метакАОлина. *Дни студенческой науки: Сборник докладов научно-технической конференции по итогам научно-исследовательских работ студентов института строительства и архитектуры.* Москва. 4–7 марта 2019. С. 1084–1086.
 8. Хамрабаева Ю.А., Фазлитдинова А.Г. Влияние добавки метакАОлина на кинетику гидратации гипса. *Современные проблемы физики и технологий. VIII Международная молодежная научная школа-конференция.* Москва. 15–20 апреля 2019. С. 307–308.
 9. Аубакирова Б.М., Нурмаганбетова А.Т. Влияние метакАОлина как модифицирующей добавки на эксплуатационные свойства сухих строительных смесей // *Технологии бетонов.* 2020. № 9–10 (170–171). С. 76–80.
 10. Ширинзаде И.Н., Баширов Е.Х., Курбанова И.Д. Исследование влияния ультрадисперсного метакАОлина на свойства гипсовых вяжущих // *Строительные материалы.* 2019. № 1–2. С. 79–81. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-767-1-2-79-81>
 11. Грызлов В.С., Фоменко А.И., Каптюшина А.Г., Чорная Т.Н. Сухие строительные смеси на основе местных сырьевых ресурсов // *Сухие строительные смеси.* 2017. № 3. С. 28–31.
 12. Каклюгин А.В., Касторных Л.И., Ступень Н.С., Коваленко В.В. Прессованные композиты на основе модифицированного гипсового вяжущего повышенной воздухоустойчивости // *Строительные материалы.* 2020. № 12. С. 40–46. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-787-12-40-46>
 13. Жукова Н.С., Блинова А.А., Гордина А.Ф. Модификация гипсового вяжущего комплексными минеральными добавками на основе техногенных продуктов производств. *Строительство – формирование среды жизнедеятельности: Сборник материалов семинара молодых ученых XXIV Международной научной конференции.* Москва. 2021. С. 25–30.
 14. Кавардаков В.Н. Способы повышения прочности и водостойкости композиционных гипсовых смесей // *Актуальные исследования.* 2020. № 8 (11). С. 33–36.
 15. Макаренко С.В., Васильев К.О., Хохряков О.В., Хозин В.Г. Производство зольной строительной керамики на основе золошлаковых отходов ТЭЦ Иркутской области – пример наилучшей доступной технологии их утилизации // *Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета.* 2020. № 4 (54). С. 54–61.
 16. Косач А.Ф., Рашупкина М.А., Кузнецова И.Н., Дарулис М.А. Влияние ультрадисперсного наполнителя на основе золы гидроудаления на свойства цементного камня // *Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета.* 2019. Т. 21. № 1. С. 150–158. DOI: [10.31675/1607-1859-2019-21-1-150-158](https://doi.org/10.31675/1607-1859-2019-21-1-150-158)
 17. Желев Н., Завадко М.Ю., Новиченкова Т.Б., Петропавловская В.Б. К вопросу использования
 7. Arutyunov G.M. Modification of white cement with an organic mineral additive based on slaked lime and metakaolin. *Days of student science: Collection of reports of a scientific and technical conference on the results of research work of students of the Institute of Civil Engineering and Architecture.* Moscow. 4–7 March 2019, pp. 1084–1086. (In Russian).
 8. Khamrabaeva Yu.A., Fazlitdinova A.G. Influence of metakaolin addition on gypsum hydration kinetics. *Modern problems of physics and technology VIII-th International Youth Scientific School-Conference.* Moscow. 15–20 April 2019, pp. 307–308. (In Russian).
 9. Aubakirova B.M., Nurmaganbetova A.T. Effect of methacaolin as a modifying additive on the performance of dry building mixtures. *Tekhnologii betonov.* 2020. No. 9–10 (170–171), pp. 76–80. (In Russian).
 10. Shirinzade I.N., Bashirov E.H., Kurbanova I.D. The study of the impact of ultradisperse metakaolin additives on the properties of gypsum binder. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2019. No. 1–2, pp. 79–81. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-767-1-2-79-81>
 11. Gryzlov V.S., Fomenko A.I., Kaptyushina A.G., Chornaya T.N. Dry building mixtures based on local raw materials. *Suhie stroitel'nye smesi.* 2017. No. 3, pp. 28–31. (In Russian).
 12. Kaklyugin A.V., Kastornykh L.I., Stupen N.S., Kovalenko V.V. Press-formed composites with alternate wetting and drying resistance based on modified gypsum binder. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2020. No. 12, pp. 40–46. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-787-12-40-46>
 13. Zhukova N.S., Blinova A.A., Gordina A.F. Modification of a gypsum binder with complex mineral additives based on industrial products. *Construction – the formation of the living environment: Collection of materials of the seminar of young scientists of the XXIV International scientific conference.* Moscow. 2021, pp. 25–30. (In Russian).
 14. Kavardakov V.N. Methods of increasing strength and water resistance of composite gypsum mixtures. *Aktual'nye issledovaniya.* 2020. No. 8 (11), pp. 33–36. (In Russian).
 15. Makarenko S.V., Vasil'ev K.O., Hohryakov O.V., Hozin V.G. The production of ash-based building ceramics based on ash and slag waste from thermal power plants of the Irkutsk region is an example of the best available technology for their utilization. *Izvestiya Kazanskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta.* 2020. No. 4 (54), pp. 54–61. (In Russian).
 16. Kosach A.F., Rashchupkina M.A., Kuznecova I.N., Darulis M.A. Influence of ultradisperse filler based on water removal ash on cement stone properties. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta.* 2019. Vol. 21. No. 1, pp. 150–158. (In Russian). DOI: [10.31675/1607-1859-2019-21-1-150-158](https://doi.org/10.31675/1607-1859-2019-21-1-150-158)
 17. Zhelev N., Zavadko M.Yu., Novichenkova T.B., Petropavlovskaya V.B. On the issue of using microdispersed ash filler in dispersed cement systems.


микродисперсного зольного заполнителя в дисперсных цементных системах. *Материалы конференции «Молодые ученые – развитию Национальной технологической инициативы – «Поиск»*. Иваново, 2020. С. 212–214.

18. Петропавловская В.Б., Завадько М.Ю., Новиченкова Т.Б., Петропавловский К.С., Бурьянов А.Ф. Гипсовые модифицированные композиции с использованием активированного базальтового наполнителя // *Строительные материалы*. 2020. № 7. С. 10–17. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-782-7-10-17>
 19. Петропавловская В.Б., Завадько М.Ю., Петропавловский К.С., Новиченкова Т.Б., Бурьянов А.Ф. Применение пластификаторов в модифицированных гипсовых композитах // *Строительные материалы*. 2019. № 1–2. С. 28–35. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-767-1-2-28-35>
 20. Lesovik V.S., Zagorodnyuk L.Kh., Glagolev E.S., Chernysheva N.V., Feduk R.S. Nature similar technologies in construction industry // *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2018. Vol. 14. No. 4, pp. 98–108. DOI: 10.22337/2587-9618-2018-14-4-98-108
 21. Хозин В.Г., Майсурадзе Н.В., Мустафина А.Р., Корнянен М.Е. Влияние химической природы пластификаторов на свойства гипсового теста и камня // *Строительные материалы*. 2019. № 10. С. 35–39. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-775-10-35-39>
- Conference Proceedings Young Scientists – Development of the National Technological Initiative – “Search”*. Ivanovo. 2020, pp. 212–214. (In Russian).
18. Petropavlovskaya V.B., Zavad'ko M.Yu., Novichenkova T.B., Petropavlovskii K.S., Buryanov A.F. Gypsum modified compositions with the use of activated basalt filler. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2020. No. 7, pp. 10–17. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-782-7-10-17>
 19. Petropavlovskaya V.B., Zavad'ko M.Yu., Petropavlovskii K.S., Novichenkova T.B., Buryanov A.F. The use of plasticizers in modified gypsum composites. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2019. No. 1–2, pp. 28–35. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-767-1-2-28-35>
 20. Lesovik V.S., Zagorodnyuk L.Kh., Glagolev E.S., Chernysheva N.V., Feduk R.S. Nature similar technologies in construction industry. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2018. Vol.14. No. 4, pp. 98–108. (In Russian). DOI: 10.22337/2587-9618-2018-14-4-98-108
 21. Khozin V.G., Maysuradze N.V., Mustafina A.R., Kornyanen M.E. Influence of the chemical nature of plasticizers on the properties of gypsum paste and stone. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2019. No. 10, pp. 35–39. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-775-10-35-39>



Международная научно-техническая конференция по геотехнике «СОВРЕМЕННЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ ГЕОТЕХНИКИ: ИЗЫСКАНИЯ, ПРОЕКТИРОВАНИЕ, ТЕХНОЛОГИИ» (GFAC 2021)





г. Санкт-Петербург

27–29 октября 2021 г.

Основная тематика конференции:

- Специальные полевые и лабораторные методы исследования физико-механических характеристик грунтов;
- Теоретические и практические аспекты механики грунтов
- Модели грунтовых оснований и их применение в проектировании
- Геотехническое обоснование и научно-техническое сопровождение инженерных изысканий, проектирования, строительства и эксплуатации оснований фундаментов, подземных и земляных сооружений;
- Численное моделирование системы: «основание-фундамент-здание» в программных комплексах;

- Новые перспективные конструктивно-технологические решения при строительстве оснований, фундаментов, подземных сооружений и высотных зданий;
- Новое строительство и реконструкция зданий и сооружений в плотной городской застройке и в условиях структурно-неустойчивых грунтов;
- Исследование свойств мерзлых и оттаивающих грунтов, конструкции фундаментов и методы строительства на них
- Геотехнический мониторинг при строительстве и эксплуатации зданий и сооружений;
- Анализ причин развития аварийных ситуаций при проектировании и строительстве фундаментов зданий и сооружений.

Основные даты подачи заявок:
 Участие в качестве слушателя до 18 октября 2021 г.
 Выступление с докладом до 10 сентября 2021 г.
 Публикация в сборнике, издаваемом СПбГАСУ (индексация в РИНЦ) до 1 мая 2021 г.
 Публикация в сборнике, издаваемом Balkema, (индексация в SCOPUS и WEB OF SCIENCES) до 1 мая 2021 г.

Контактные данные секретариата конференции СПбГАСУ:
 Калач Филипп Николаевич – зам. научного секретаря конференции, моб. телефон: +7 (921) 847-92-93
 e-mail: GFAC-2021-SPBGASU@yandex.ru
 Адрес секретариата: 190005, Санкт-Петербург, 3-я Красноармейская ул., дом 7, СПбГАСУ, кафедра Геотехники

И.В. БЕССОНОВ¹, канд. техн. наук (bessonoviv@mail.ru);
А.Д. ЖУКОВ^{1,2}, канд. техн. наук (lj211@yandex.ru),
Э.А. ГОРБУНОВА^{1,2}, инженер (eg15082000@mail.ru)

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

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

Гипсосодержащие модифицированные материалы

Применение материалов на основе гипса в фасадных системах предполагает специальную подготовку материала для повышения водостойкости и морозостойкости гипсовых изделий. Способ модификации состава гипсовой смеси водорастворимыми полимерами имеет ряд преимуществ. Введение в состав смеси органических добавок ведет к тому, что гипс при гидратации создает каркас из кристаллических сростков дигидрата, а смола, отверждаясь, образует непрерывную полимерную матрицу. Цель настоящего эксперимента – выявление эффективности модифицирования минеральных композиций на основе гипсового вяжущего меламинаформальдегидной смолой и другими добавками; выяснение механизма отверждения меламинаформальдегидной смолы (МФС) в составе полимерминеральных материалов; исследование влияния модифицирующих добавок на процесс гидратации гипсового вяжущего. Исследование свойств материала проводилось с применением рентгенофазового анализа, комплексного термического анализа. Структуру образцов исследовали с помощью электронного микроскопа. Содержание водорастворимых веществ определяли кипячением предварительно измельченных образцов. После кипячения раствор фильтровали через фильтр «синяя лента» и выпаривали в фарфоровых чашках на водяной бане. Содержание меламинаформальдегидной смолы в водных вытяжках определяли с помощью УФ-спектрофотометра. Расчет соотношения двухводного и полуводного гипса в образцах проводили по методу Германса и Вейдингера. В результате исследований обоснована возможность применения меламинаформальдегидной смолы для получения водо- и атмосферостойких изделий. Установлено, что присутствие кремнефтористо-водородной кислоты в образцах без термообработки позволяет получать степень отверждения смолы, аналогичную термообработанному материалу. Смола практически полностью удерживается в полимерминеральном материале за счет образования общей пространственной структуры. Модификация гипсового вяжущего меламинаформальдегидной смолой, равно как и введение суперпластификатора, приводит к уменьшению степени гидратации гипса. Фосфогипс способствует замедлению процесса гидратации гипсового вяжущего и снижению степени гидратации его при термообработке.

Ключевые слова: гипсовое вяжущее, модифицированное вяжущее, меламинаформальдегидная смола, кремнефтористо-водородная кислота, суперпластификатор, минерально-полимерная матрица.

Для цитирования: Бессонов И.В., Жуков А.Д., Горбунова Э.А. Гипсосодержащие модифицированные материалы // *Строительные материалы*. 2021. № 8. С. 18–26. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-794-8-18-26>

I.V. BESSONOV¹, Candidate of Sciences (Engineering) (bessonoviv@mail.ru);
A.D. ZHUKOV^{1,2}, Candidate of Sciences (Engineering) (lj211@yandex.ru),
E.A. GORBUNOVA^{1,2}, Engineer (eg15082000@mail.ru)

¹ Research Institute of Building Physics, Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (21, Lokomotivniy Driveway, Moscow, 127238, Russian Federation)

² National Research Moscow State University of Civil Engineering (26, Yaroslavl's Highway, Moscow, 129337, Russian Federation)

Gypsum-Containing Modified Materials

The use of gypsum-based materials in facade systems involves special preparation of the material for increasing the water resistance and frost resistance of gypsum products. The method of modifying the composition of the gypsum mixture with water-soluble polymers has a number of advantages. The introduction of organic additives into the mixture leads to the fact that gypsum, during hydration, creates a framework of crystalline aggregates of dihydrate, and the resin, when cured, forms a continuous polymer matrix. The purpose of this experiment was to identify the effectiveness of modifying mineral compositions based on gypsum binder with melamine-formaldehyde resin and other additives; to clarify the mechanism of curing melamine-formaldehyde resin (MFS) in polymer-mineral materials; to study the effect of modifying additives on the hydration process of gypsum binder. The study of the properties of the material was carried out using X-ray phase analysis, complex thermal analysis. The structure of the samples was studied using an electron microscope. The content of water-soluble substances was determined by boiling pre-crushed samples. After boiling, the solution was filtered through a "blue ribbon" filter and evaporated in porcelain cups in a water bath. The content of melamine-formaldehyde resin in water extracts was determined using a UV spectrophotometer. The ratio of two-water and semi-water gypsum in the samples was calculated using the Hermans and Weidinger method. As a result of the research, the possibility of using melamine – formaldehyde resin for the production of water- and weather-resistant polymers is justified. It is established that the presence of fluorosilicic acid makes it possible to obtain a degree of curing of the resin similar to the heat-treated material. The resin is almost completely retained in the polymer-mineral material due to the formation of a common spatial structure. Modification of the gypsum binder with melamine-formaldehyde resin, as well as the introduction of a superplasticizer, leads to a decrease in the degree of gypsum hydration. Phosphogypsum helps to slow down the process of hydration of the gypsum binder and reduce the degree of its hydration during heat treatment.

Keywords: gypsum binder, modified binder, melamine-formaldehyde resin, fluorosilicic acid, superplasticizer, mineral-polymer matrix.

For citation: Bessonov I.V., Zhukov A.D., Gorbunova E.A. Gypsum-containing modified materials. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2021. No. 8, pp. 18–26. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-794-8-18-26>

Таблица 1
Table 1Составы композиций и условия эксперимента
Compositions and experimental conditions

№ состава	Содержание компонентов				Условия твердения
	Гипс	СПМФ	Песок	H ₂ SiF ₆	
1	53,7	21,5	21,5	3,3	8 ч при 80°C
2	53,7	21,5	21,5	–	8 ч при 80°C; комнатные условия
3	45,9	20,4	20,4	3,1	10 ч при 80°C; комнатные условия
4	58,7	19,7	20,7	0,55	Комнатные условия, термообработка
5	59	–	23	–	Комнатные условия, термообработка
6	53,7	21,5	21,5	–	8 ч при 80°C; комнатные условия
7*	60,8	–	24,3	–	10 ч при 80°C; комнатные условия
8*	60,8	–	24,3	–	10 ч при 80°C; комнатные условия
9*	60,8	–	24,3	3,3	10 ч при 80°C; комнатные условия

* Композиции представлены для уточнения влияния некоторых компонентов на физико-химические свойства материала.

Гипсовые и гипсосодержащие материалы и изделия на их основе отличаются экологичностью, низкой теплопроводностью, огнестойкостью, хорошей паропроницаемостью и высоким декоративным эффектом. Гипсовые изделия делают строительство более экономичным и легким. При их использовании снижается вес конструкции, повышается качество и производительность. Расширение диапазона использования гипсовых строительных материалов и изделий на их основе возможно за счет повышения их эксплуатационных свойств [1–3].

Способы улучшения свойств гипсовых материалов и композитов, их прочностных характеристик, повышения водостойкости и атмосферостойкости являются предметом исследований многих российских и зарубежных ученых. Во-первых, это введение каких-либо компонентов в сам материал, или добавки, инициирующие процессы самоупрочнения, в том числе наноструктурирования [4–6]. Во-вторых, это методы различного воздействия на исходный материал (связующее), например механоактивация или механохимическая активация [2, 7].

В-третьих, это оптимизация гранулометрического состава гипса или композиционного вяжущего [1, 8]. В-четвертых, это внедрение полимеров, позволяющих регулировать как реологические характеристики гипсосодержащих смесей, так и свойства материала [9–11]. В-пятых, это использование побочных продуктов других производств для модификации гипсосодержащих смесей и материалов [12–14].

В настоящее время использование материалов на основе гипса не ограничивается внутренней отделкой. Гипс также используется для фасадных работ [15, 16]. Однако в этом случае требуется специальная подготовка материала для повышения водостойкости и морозостойкости гипсовых изделий. В этом направлении уже достигнуты существенные результаты: гипсоцементно-пуццолановые, гипсошлакоцементно-пуццолановые, композиционные гипсовые вяжущие и водостойкие гипсовые вяжущие с низкой водопотребностью созданы и всесторонне изучены.

Способ модификации состава гипсовой смеси водорастворимыми полимерами имеет ряд преимуществ. Введение в смесь органических добавок приводит к тому, что гипс при гидратации образует каркас из кристаллических сростков дигидрата, а смола, затвердевая, образует сплошную полимерную матрицу. Поры гипсового тела заполняются стекловидным веществом. Значительно снижается проницаемость материала для жидкой влаги. Получаемый пластиковый экран вокруг кристаллов гипса предотвращает попадание воды в хорошо растворимый сульфат кальция.

Целью настоящего исследования явилось выяснение эффективности модифицирования минеральных композиций на основе гипсового вяжущего меламинаформальдегидной смолой и другими добавками.

Объекты исследования: гипсосодержащие композиции с применением меламинаформальдегидной

смолы (СПМФ), фосфогипса (состав № 3, расход 10,2%); суперпластификатора (состав № 4, расход 0,35%), твердевшие как в нормальных (комнатных) условиях, так и с термообработкой (табл. 1). Номера составов, подвергнутых термообработке, имеют индекс 1, а составы, твердевшие в комнатных условиях, имеют индекс 2.

Основной задачей данной работы было выяснение механизма отверждения меламинаформальдегидной смолы в составе полимерминеральных материалов; исследование влияния модифицирующих добавок на процесс гидратации гипсового вяжущего.

В эксперименте использовали: гипсовое вяжущее (ГОСТ 125–2018 «Вяжущие гипсовые. Технические условия», изготавливается путем переработки отходов производства экстракционной фосфорной кислоты); смолу меламинаформальдегидную (марка СПМФ-4, содержание сухого вещества 54,6%); песок кварцевый (ГОСТ 8736–2014 «Песок для строительных работ. Технические условия», модуль крупности $M_K=1+1,5$); кислоту кремнефтористо-водородную (отход производства); суперпластификатор 10-03 (изготовлен на основе формалина, меламина и пиросульфата натрия); водопроводную воду.

Смеси готовили в смесителе принудительного действия. В смеситель загружали сначала жидкие, а затем сухие компоненты и перемешивали до однородного состояния литевой консистенции. Полученную массу заливали в формы. Сроки схватывания смесей колеблются в пределах: начало 6–12 мин, конец 20–40 мин. По окончании схватывания образцы извлекали из форм и подвергали выдержке в комнатных условиях, тепловой обработке.

Тепловая обработка проводилась в сушильном шкафу в течение 8–10 ч при температуре 80–90°C. После соответствующей обработки образцы до начала исследований выдерживали в комнатных условиях (кондиционирование).

Методы исследования

Рентгенофазовый анализ проводили на дифрактометре ДРОН-3 в медном излучении с пикелевым фильтром при анодном напряжении 30 кВ и силе тока 30 мА. Измерение интенсивности дифрагированного излучения осуществляли при помощи сцинтилляционного счетчика с амплитудным дискриминатором. Зависимость интенсивности дифрагированного излучения от угла рассеяния автоматически регистрировалась на диаграммной ленте КСП-4 в интервале углов 20 от 10 до 44. Скорость счетчика составляла 0,5 в мин, скорость движения диаграммной ленты – 240 мм/ч.

Образцы полимергипсового материала измельчали в ступке до прохождения через сито 10000 отв/см². Препарат для рентгенофазового анализа готовили путем набивки порошка в кювету из органического стекла глубиной 2 мм. Для уплотнения порошок смазывали этиловым спиртом. В процессе записи рентгенограмм держатель с исследуемым образцом вращался в своей плоскости со скоростью 20 об/мин.

Расчет соотношения двуводного и полуводного гипса в образцах проводили по методу Германса и Вейдингера. Данный метод основан на изучении зависимости между величинами интенсивностей линий отдельных фаз при изменении соотношения между содержанием этих фаз. Графическая зависимость между интенсивностью линий двух фаз при изменении соотношения в их содержании должна выражаться прямой линией, пересекающей оси координат в точках, соответствующих 100% содержанию одной фазы.

Вдоль прямой наносят равномерную шкалу, разделив ее на 100 равных отрезков, и пользуются ею для последующих измерений как градуировочным графиком. Проводя серию лучей от начала координат через концы 100 равных отрезков градуировочной прямой, получают номограмму для количественного определения содержания фаз. Каждый луч будет соответствовать определенному соотношению фаз при произвольных условиях съемки.

На рис. 1 приведена номограмма для количественного определения соотношения двуводного и полуводного гипса в системе, где на оси абсцисс откладывали интенсивность отражения полуводного гипса с межплоскостным расстоянием, равным 300Å, а на оси ординат – интенсивность отражения двуводного гипса с межплоскостным расстоянием, равным 3,06Å.

Комплексный термический анализ проводили на дериватографе фирмы МОМ (Венгрия) при скорости подъема температуры 10°C/мин в интервале температуры 20–1000°C при чувствительности записей: ДТА – 250; ДТГ – 1; ТГ – 100 мг. Скорость протяжки диаграммной ленты – 2 мм/мин. В качестве эталона

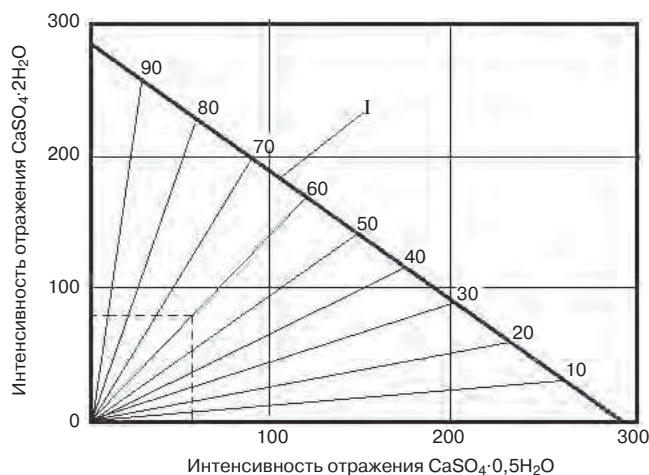


Рис. 1. Номограмма для количественного определения двуводного и полуводного гипса: I – содержание CaSO₄·2H₂O
Fig. 1. Nomogram for the quantitative determination of dihydrate and semi-aqueous gypsum: I – CaSO₄·2H₂O content

использовали прокаленный глинозем. Объекты исследования предварительно измельчали до удельной поверхности 3000 см²/г и помещали в платиновый тигель в навеске 300 мг.

Изучение микроструктуры гипсового камня проводили на растровом электронном микроскопе «Стереоскан S4–10» (Англия) в диапазоне увеличений 70–6000 при напряжении 2–30 кВ. При просмотре на электронном микроскопе на середине образца откалывали кусочек площадью 1 см², толщиной 0,5 см, приклеивали токопроводящим клеем к столику камеры объектов микроскопа. На поверхность образцов путем термического распыления в вакууме на установке ВУП-2К наносили тонкий токопроводящий слой угля и алюминия. Испытание осуществляли при непрерывном вращении образца, для чего использовали специально изготовленную приставку. Этот метод препарирования дает возможность в процессе исследований избежать зарядки поверхности образцов-диэлектриков под влиянием тока электронного зонда.

Содержание водорастворимых веществ определяли кипячением предварительно измельченных образцов в колбах с обратным холодильником в течение 8 ч. Навеска порошка 10 г на 100 мл воды. После кипячения раствор фильтровали через фильтр «синяя лента» и выпаривали в фарфоровых чашках на водяной бане.

Содержание меламинаформальдегидной смолы в водных вытяжках определяли с помощью УФ-спектрофотометра «Specord UV-VIS». УФ-спектры регистрировали в областях волновых чисел 38–54 1000 см⁻¹. Толщина кюветы 0,1 см. При изменении оптической плотности водных вытяжек из полимерминеральных композиций в канал сравнения помещали кювету с водной вытяжкой из контрольного образца, не содержащего МФС, а при измерении оптической плотности эталонных растворов МФС в канал сравнения помещали кювету с водой.

Исследование влияния добавок на процесс гидратации гипсового вяжущего в полимерминеральных композициях

Введение различных добавок, способствующих повышению прочности, плотности структуры, технологичности полимерминеральных композиций, оказывает непосредственное влияние на процесс твердения гипсового вяжущего.

Проведенные методом рентгеноструктурного, дифференциально-термического анализа и электронной микроскопии исследования показали, что контрольные образцы № 5; 7; 8, содержащие гипс, кварцевый песок и воду в количестве 14,7–18%, уже в первые сутки гидратированы практически полностью. На кривых ДТА гидратированного гипса через сутки, 28 и 180 сут твердения присутствуют одинаковые эндоэффекты: 1-й при 90°C – удаление адсорбционной влаги; 2-й и 3-й при 150 и 190°C – ступенчатая дегидратация двуводного гипса. Практически одинаковые потери массы на кривых ТГ в интервале температуры 20–200°C говорят о завершении процесса гидратации (рис. 2).

Термическая обработка контрольных образцов при температуре 80°C не приводит к изменению фазового состава (табл. 1, составы № 7.1 и 8.1).

Замена 3,3% воды затворения на 16%-й раствор кремнефтористо-водородной кислоты H_2SiF_6 , явля-

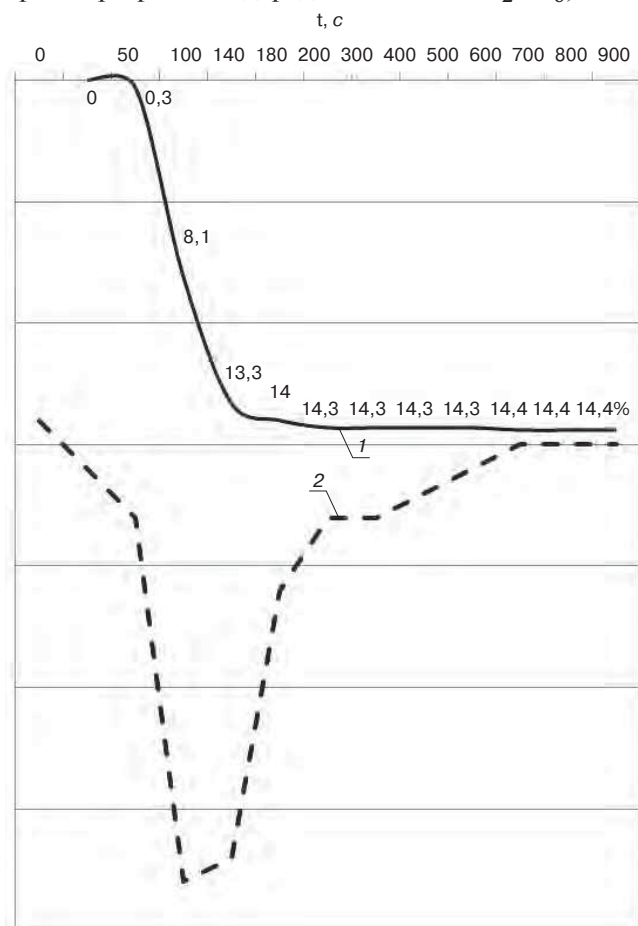


Рис. 2. Кривые ДТА и ТГ анализа гидратированного гипса
Fig. 2. DTA and TG curves of analysis of hydrated gypsum

Таблица 2

Table 2

Степень гидратации гипса в полимерминеральных композициях в ранние сроки твердения The degree of gypsum hydration in polymer-mineral compositions in the early stages of hardening

Шифр образца	Время твердения, сут	Содержание фаз, %	
		$CaSO_4 \cdot 2H_2O$	$CaSO_4 \cdot 0,5H_2O$
1.1	1	60	40
	28	67	33
2.1	1	80	20
	28	80	20
3.1	1	12	88
	28	1	99
	180	5	95
3.2	1	25	75
	28	65	35
	180	60	40
4.1	28	25	75
	180	45	55
5.2	1	100	0
6.1	1	48	52
	28	59	41
	180	50	50
6.2	1	61	39
	28	60	40
7.1	1	90	10
	28	90	10
7.2	1	99	1
	28	90	10
8.1	28	97	3
8.2	28	97	3
9.1	28	100	0
9.2	28	100	0

ющейся катализатором отверждения меламиноформальдегидной смолы, не оказывает влияния на степень гидратации гипса (образец № 9) как в комнатных условиях, так и при термообработке. При этом на кривой ТГ модельной композиции из гипса и H_2SiF_6 потери массы в интервале температуры 100–200°C, соответствующие дегидратации гипса, составляют 12,3%, что на 2% ниже потерь массы при дегидратации образца без кислоты. Следовательно, имеет место факт расхода части гипса на реакцию взаимодействия его с кремнефтористо-водородной кислотой.

Отмечено также некоторое увеличение растворимости образцов, содержащих кислоту (5,5 и 2,8% соответственно для составов № 9 и 8); в образцах, модифицированных меламиноформальдегидной смолой, этот эффект значительно меньше (5,7 и 4,3% соответственно для составов № 1 и 2, оба термообработаны).

Значительное влияние на гидратацию гипсового вяжущего оказывает введение меламиноформальде-

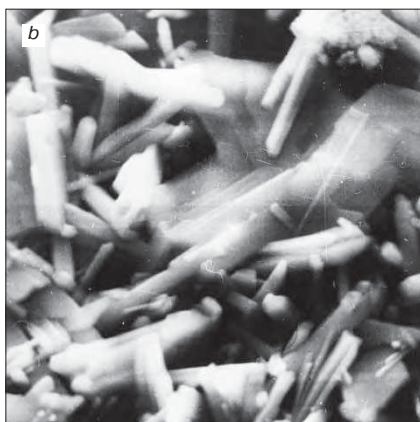
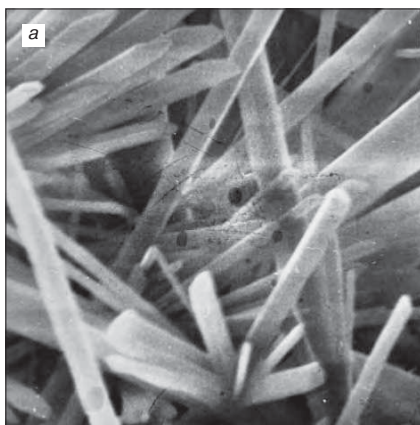


Рис. 3. Структура гипсового камня: *a* – без добавки смолы (2400×); *b* – с добавкой смолы (3000×)

Fig. 3. The structure of the gypsum stone: *a* – without the addition of resin (2400×); *b* – with the addition of resin (3000×)

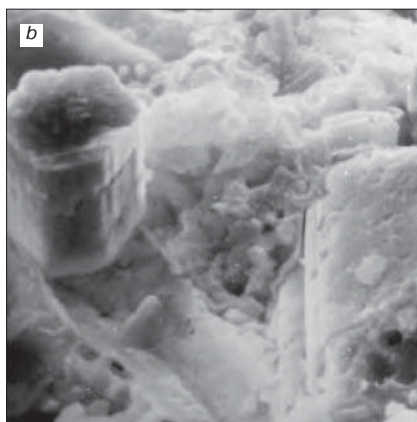
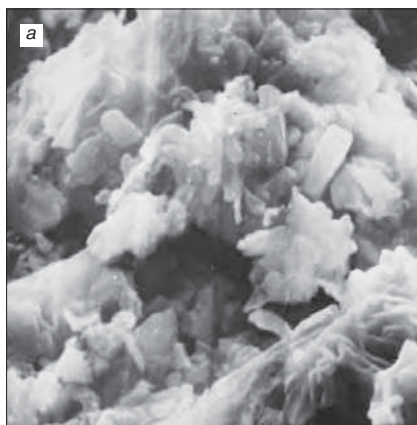


Рис. 4. Структура излома полимергипсового камня термообработанного, образец № 3.1, 2400×, твердевшего: *a* – 1 сут; *b* – 28 сут

Fig. 4. The fracture structure of heat-treated polymer gypsum stone, sample 3.1, 2400×, hardened: *a* – 1 day; *b* – 28 days

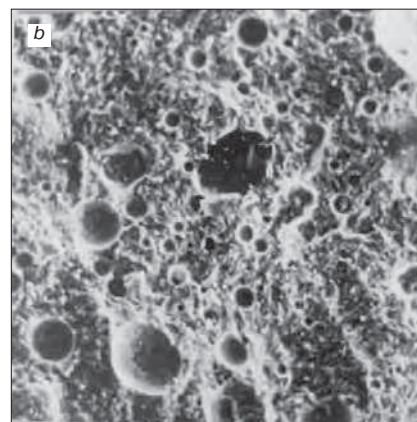
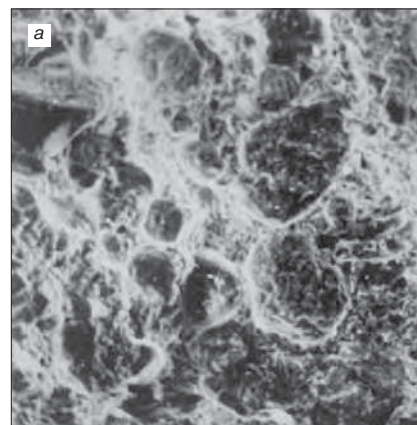


Рис. 5. Структура излома полимергипсового камня, 70×: *a* – без суперпластификатора, образец № 3.1; *b* – с суперпластификатором, образец 4.2

Fig. 5. Fracture structure of a polymer gypsum stone, 70×: *a* – without superplasticizer, sample 3.1; *b* – with superplasticizer, sample 4.2

гидной смолы. Гидратация композиций № 2 и 6, в состав которых входит 21,5% смолы, заканчивается также в первые сутки и не изменяется в более поздние сроки, однако содержание двуводного гипса составляет всего около 60%. По-видимому, это связано с экранирующим влиянием смолы.

Исследование структурообразования полимергипсового материала, т. е. совместно протекающих процессов гидратации гипса и поликонденсации меламиноформальдегидной смолы, не установило какого-либо химического взаимодействия между полимером и неорганическим вяжущим, поскольку, как это видно из приведенных электронно-микроскопических фотографий модельных композиций (рис. 3, 4), наличие в системе смолы не влияет на кристаллическую структуру гипсового камня.

Следует отметить, что полимерная составляющая, вероятно, адсорбируется на растущих кристаллах неорганического вяжущего, это обеспечивает хорошую адгезию полимерной добавки к гипсу. В исследуемых образцах не наблюдается каких-либо отслоений полимера от кристаллов гипсовой матрицы.

При рассмотрении формирования структуры полимергипсового вяжущего при разных сроках твердения установлено, что в целом процесс структурообра-

зования материала проходит на ранних стадиях (первые сутки) твердения. На электронно-микроскопических фотографиях изломов полимергипсового материала при разных сроках твердения существенного различия в структуре материала не установлено. Введение отвердителя H_2SiF_6 также не влияет на кристаллическую структуру гипсовой матрицы.

Замена части гипса на полугидрат фосфогипса (состав № 3) приводит к замедлению гидратации гипса в системе. Содержание двуводного гипса в первые сутки в этой композиции составляет только 25% и возрастает до максимального значения 65% к 28 сут. Термообработка композиции с фосфогипсом приводит к значительному изменению фазового состава: почти весь двуводный гипс переходит в гипс-полугидрат (табл. 3, 4). При этом формируется более рыхлая структура материала, что может быть связано с его обезвоживанием. Подобные выводы получены и методом дифференциально-термического анализа. Кроме того, надо отметить, что композиции с фосфогипсом имеют большую растворимость, чем остальные составы, видимо, за счет наличия в них растворимых фосфатов (табл. 3).

Введение суперпластификатора в полимерминеральную композицию позволяет снизить водопотреб-

Таблица 3
Table 3

Термическое исследование композиций на основе гипса и меламиноформальдегидной смолы в процессе твердения (условия твердения: t комн., на воздухе)
 Thermal researching of compositions based on gypsum and melamine-formaldehyde resin during hardening (hardening conditions: room temp., in the open air)

№ состава	Убыль массы в интервале температуры							Σ 200	Температура максимальной скорости разложения							Т5	% потеря	
	20-100	100-200	200-300	300-400	400-500	500-600	≥ 600		Т1	% потеря	Т2	% потеря	Т3	% потеря	Т4			% потеря
Твердение 1 сут																		
1.1	2,5	10,3	2,2	3	2,4	3,3	23,7	12,8	80	1,6	130	8,3	170	11,9	305	15	515	21,5
2.1	2	11,4	1	3,5	3,3	2,4	23,6	13,4	70	1,3	140	8,7	165	12	370	16,3	485	20,5
2.2	2,3	11,2	1,5	3,6	2,9	1,7	23,2	13,5	80	1,5	145	8,4	180	12,3	330	16,7	500	21
Твердение 28 сут																		
1.1	2	11,2	1,3	3,5	2,8	3	23,8	13,2	105	2,3	140	8,4	185	12,3	310	15,5	520	21
2.1	1,3	11,8	1,2	3,2	3,5	2,6	23,6	13,1	90	1	145	7,5	190	12,6	370	17,3	510	21,5
Твердение 1 сут																		
3.1	2,5	4,9	2,6	3,7	3,3	3,3	20,3	7,4	100	2,5	155	5	170	6,6	305	10,6	530	18,5
3.2	2,9	7,3	3,2	3,3	3,3	3,5	23,5	10,2	90	2,1	150	6,4	180	9,4	300	13,4	500	20
Твердение 28 сут																		
3.1	2,6	6,2	2,9	3,9	4	2,8	22,4	8,8	100	2,6	145	5,3	180	7,7	305	12,2	500	19,6
3.2	2,7	7,4	2,9	3,8	3,3	3,7	23,8	10,1	95	2,3	155	6,3	130	9,4	310	13,8	550	22,5
Твердение 180 сут																		
3.1	2	4	3,5	3,2	2,6	4,4	19,8	6	0	0	110	2,1	200	6	400	12,7	560	18,7
3-2	2,5	11	3,7	2,5	3	3,4	26,1	13,5	85	2	145	9,8	180	13	295	17	530	24,3
Твердение 1 сут																		
4-1	1,3	8	0,67	3,8	2,4	2,5	18,8	9,3	90	1	135	5,60	180	8,5	365	13,3	520	17,1
4-2	1,3	10,1	0,9	3,4	2,5	2,9	21	11,4	90	0,8	145	5,6	185	10,6	365	14,9	510	18,5
Твердение 28 сут																		
4-1	1,7	9	0,9	3,6	2,8	2	20	10,7	90		130						500	18
4-2	1,6	10,5	0,9	3,6	2,4	2,4	21,7	12,1	85		140	7,3	185	11,5	365		500	

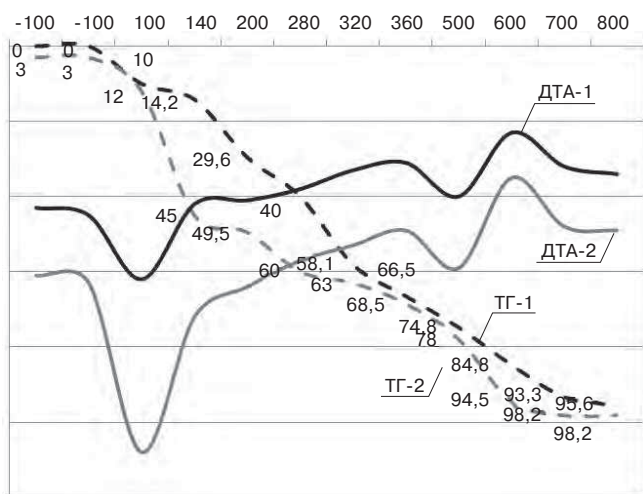


Рис. 6. Кривые ДТА и ТГ анализа меламиноформальдегидной смолы: 1 – неотвержденной; 2 – отвержденной
Fig. 6. DTA and TG curves of analysis of melamine-formaldehyde resin: 1 – uncured; 2 – cured

ность и получить литевую консистенцию с $V/\Gamma=0,16$ (составы 4.1 и 4.2), однако при этом содержание водной составляющей ниже теоретически необходимого для полной гидратации и не восполняется водой, выделяющейся при поликонденсации вводимой меламиноформальдегидной смолы. Естественно, что при этом степень гидратации гипсового вяжущего гораздо ниже контрольных образцов (табл. 2). Однако пористость материала с суперпластификатором не меньше пористости образца без него (рис. 5).

Исследование процесса отверждения меламиноформальдегидной смолы в составе полимерминеральных материалов

Модификация минеральных композиций водорастворимыми смолами обладает рядом преимуществ: не меняется основной процесс твердения гипса – превращение его из полуводного в двуводный, способствует равномерному распределению смолы по всему гипсовому телу, склеивая отдельно агрегаты кристаллов и закрывая поры между ними и т. д.

Поскольку известно, что меламиноформальдегидная смола достигает достаточно высокой степени отверждения уже после нагревания при 50–60°C, то выбранный режим термообработки (8–10 ч при 90°C) должен приводить к отверждению смолы и сушке изделий.

Процесс отверждения меламиноформальдегидной смолы исследован методом дифференциального термического анализа.

По кривой ДТА (рис. 6) разложение неотвержденной МФС представлено следующими эффектами: 1-й эндотермический эффект с максимумом 110°C соответствует удалению механической и кристаллизационной воды и разложению формальдегида.

На кривой ТГ данному разложению соответствует убыль массы, равная 54% в интервале температуры 200–300°C. Второй экзотермический эффект при 330°C отнесен к неполному разложению меламино-

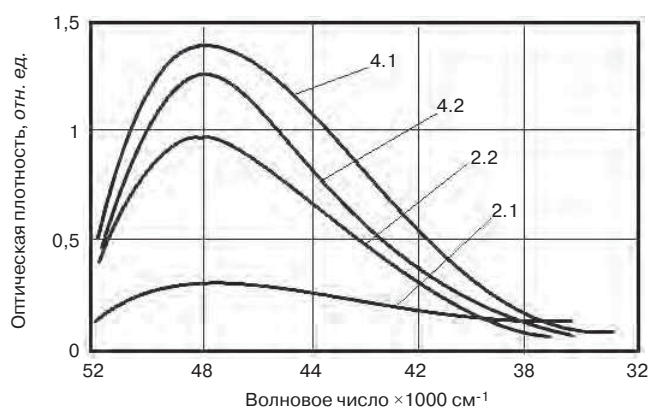


Рис. 7. УФ-спектры водных вытяжек из полимерминеральных композиций
Fig. 7. UV spectra of aqueous extracts from polymer-mineral compositions

Таблица 4
Table 4

**Содержание водорастворимых веществ в полимерминеральных композициях
Content of water-soluble substances in polymer-mineral compositions**

№ состава	Условия твердения	Содержание водорастворимых веществ, %		
		1–3 сут	28 сут	180 сут
1.1	Термообработка	5,7	5,6	5,6
2.1	То же	4,3	3,2	3,3
2.2	Комнатные условия	5,3	5,2	5,1
3.1	Термообработка	6,8	6,4	6,3
3.2	Комнатные условия	10,2	9,4	8,9
4.1	Термообработка	4,5	6,6	4,1
4.2	Комнатные условия	5,6	5,1	4,8
5	То же	4,2	3,9	3

вого конденсата с выделением аммиака. Третий широкий экзотермический эффект относится к термоокислительной деструкции меламинового конденсата и остальных компонентов исследуемой смеси. Суммарные потери массы разложения данного состава составляли 98,2%.

На дифференциальной кривой (рис. 6) меламиноформальдегидной смолы, отвержденной при комнатной температуре, присутствуют три эффекта, аналогичные эффектам исходного состава. На кривой ТГ убыль массы в интервале от 20 до 200°C составляет 29,6% (для исходного состава – 49,5%), затем до 300°C происходит резкое увеличение потери массы, и далее кривая дублирует участок разложения меламина и термоокислительной деструкции, характерный для исходного состава. Подобные изменения можно объяснить образованием пространственной структуры, т. е. отверждением меламиноформальдегидной смолы. Степень отверждения смолы решено было контролировать по количеству водорастворимых веществ, учитывая растворимость несшитой смолы в воде (рис. 7).

При изучении результатов проведенных анализов можно сделать вывод, что содержание водорастворимых веществ практически мало отличается для образ-

цов, подвергавшихся термообработке и не прошедших таковую. Также надо учитывать, что на результаты анализа накладывается различная растворимость гипса в зависимости от степени его гидратации. Методами ГТА и РСА показано, что введение МФС и термообработка приводят в ряде случаев к снижению степени гидратации гипса (табл. 3). Поэтому интересно было проверить, как меняется содержание именно МФС в водных вытяжках термообработанного и твердевшего в комнатных условиях материала.

Содержание меламинаформальдегидной смолы (МФС) определяли с помощью УФ-спектрофотометра «Spesord UV-VIS». На рис. 7 приведены УФ-спектры водных вытяжек из термообработанных (кривые 1 и 3) и твердевших в комнатных условиях (кривые 2 и 4) образцов № 2 (кривые 1 и 2) и № 4 (кривые 3 и 4). В результате подсчета концентрации МФС в водных вытяжках равны: состав № 2 с термообработкой — 0,04%, без термообработки — 0,17%; состав № 4 с термообработкой — 0,43%, без термообработки — 0,47%. Значит, содержание меламинаформальдегидной смолы (МФС) в водных вытяжках как термообработанных материалов, так и твердевших в комнатных условиях незначительно; несколько больший результат, полученный в образце № 4, может быть связан с совместным извлечением некоторого количества суперпластификатора, близкого по составу к МФС.

Для выявления влияния кремнефтористо-водородной кислоты на степень отверждения меламинаформальдегидной смолы была приготовлена модельная смесь МФС с H_2SiF_6 в соотношении 21:3, т. е. принятом в представленных композициях. Половина смеси отверждалась в комнатных условиях в течение 3 сут, а вторая половина была подвергнута термообработке при 90°C в течение 10 ч. В тех же условиях отверждали МФС без добавки кислоты. Определение содержания водорастворимых веществ дало следующие результаты:

- состав с МФС с термообработкой — 16,3%, без термообработки — 49,8%;
- состав МФС и H_2SiF_6 : с термообработкой — 19,3%, без термообработки — 20,8%.

В результате экспериментальных исследований установлено, что введение кремнефтористо-водородной кислоты позволяет в комнатных условиях получить практически ту же степень отверждения, что и при термообработке.

Поскольку содержание меламинаформальдегидной смолы (МФС) в водных вытяжках из полимер-

минеральных материалов составляет доли процента, а максимальная степень отверждения МФС в данных условиях составляет 83,7%, следовательно, происходит дополнительное структурирование системы из-за образования сплошной сетки физических связей между адсорбционными слоями, находящимися на частичках наполнителя. На электронных стереомикрофотографиях ясно видно, что структура материала представляет собой сетку полимера, расположенную в трехмерной сетке закристаллизованного гипса, которая является непрерывной фазой гипсового камня. Это сrostки гидратных новообразований, пластинчатых по структуре, пронизывающих блоки полимера. В порах идет кристаллизация мелких кристаллов гипса призматической и игольчатой формы.

При увеличении сроков твердения образцов существенных изменений в характеристиках материалов не происходит, т. е. основные процессы структурообразования заканчиваются на первом этапе.

Заключение

Меламинаформальдегидная смола, отверждаемая в процессе твердения гипсового камня в результате термического воздействия или введения химических катализаторов, способствует формированию двойной минерально-полимерной матрицы в материале, что предопределяет повышение его прочностных характеристик и стойкости к воздействию влаги.

Степень отверждения меламинаформальдегидной смолы в присутствии кремнефтористоводородной кислоты в комнатных условиях практически та же, что и при термообработке. МФС почти полностью удерживается в полимерминеральном материале за счет образования общей пространственной структуры.

Модификация гипсового вяжущего меламинаформальдегидной смолой приводит к уменьшению степени гидратации гипса. Фосфогипс способствует замедлению процесса гидратации гипсового вяжущего и снижению степени гидратации его при термообработке.

Введение суперпластификатора в полимерминеральную композицию приводит к значительному снижению степени гидратации гипса, при этом пористость материала остается на одном уровне. Термообработка образцов полимерминеральных композиций в большинстве случаев не оказывает существенного влияния на структуру и фазовый состав материала.

Список литературы

1. Гипсовые материалы и изделия (производство и применение) / Под общ. ред. А.В. Ферронской. М.: АСВ, 2004. 488 с.
2. Петропавловская В.Б., Бурьянов А.Ф., Новиченкова Т.Б., Петропавловский К.С. Самоармированные гипсовые композиты: Монография. М.: Де Нова, 2015. 163 с.

References

1. Gipsovye materialy i izdeliya (proizvodstvo i primeneniye) [Gypsum materials and products (production and use)]. Edited by A.V. Ferronskaya. Moscow: ASV. 2004. 488 p.
2. Petropavlovskaya V.B., Buryanov A.F., Novichenkova T.B., Petropavlovsky K.S. Samoarmirovannyye gipsovyye kompozity [Self-reinforced gypsum composites]. Moscow: De Nova. 2015. 163 p.

3. Бурьянов А.Ф. Гипс, его исследование и применение от П.П. Будникова до наших дней // *Строительные материалы*. 2005. № 9. С. 46–48.
4. Петропавловский К.С., Бурьянов А.Ф., Петропавловская В.Б., Новиченкова Т.Б. Облегченные самоармированные гипсовые композиты // *Строительные материалы*. 2019. № 10. С. 40–45. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-775-10-40-45>
5. Yakovlev G., Khozin V., Polyanskikh I., Keriene J., Gordina A., Petrova T. Utilization of blast furnace flue dust while modifying gypsum binders with carbon nanostructures. *The 9th International Conference "Environmental engineering"*. 22–23 May 2014. Vilnius, Lithuania, pp. 1–5.
6. Строкова В.В., Череватова А.В., Жерновский И.В., Войтович Е.В. Особенности фазообразования в композиционном наноструктурированном гипсовом вяжущем // *Строительные материалы*. 2012. № 7. С. 9–12.
7. Кузьмина В.П. Механоактивация материалов для строительства. Гипс // *Строительные материалы*. 2007. № 9. С. 2–4.
8. Рахимов Р.З., Халиуллин М.И., Гайфуллин А.Р. Композиционные гипсовые вяжущие с использованием керамзитовой пыли и доменных шлаков // *Строительные материалы*. 2012. № 7. С. 13–16.
9. Коровяков В.Ф. Структура твердеющего камня из композиционного гипсового вяжущего // *Сухие строительные смеси*. 2013. № 1. С. 16–19.
10. Баранов И.М. Композиционные гипсополимерные материалы // *Строительные материалы*. 2008. № 8. С. 25–28.
11. Баранов И.М. Композиционные минералполимерные строительные материалы на основе акриловых сополимеров // *Строительные материалы*. 2012. № 2. С. 68–71.
12. Хаев Т.Э., Ткач Е.В., Орешкин Д.В. Модифицированный облегченный гипсовый материал с полыми стеклянными микросферами для реставрационных работ // *Строительные материалы*. 2017. № 10. С. 45–51.
13. Meshheryakov Yu.G., Tairov T.N., Fedorov S.V. Verfahren der komplexen production der Anhydrit und Gipsbinder. *Int/Kongress Fachmess Euro ECO*. Hannover. 2011.
14. Sychugov S., Tokarev Y., Plekhanova T., Kazantseva A., Gaynetdinova D. Binders based on natural anhydrite and modified by finely-dispersed galvanic and petrochemical waste. *Procedia Engineering Modern Building Materials, Structures and Techniques*. 2013. Vol. 57, pp. 1022–1028.
15. Бессонов И.В. «Столица» – атмосферостойкая гипсовая облицовка зданий // *Строительные материалы*. 1999. № 9. С. 12–14.
16. Бессонов И.В. Гипс повышенной водостойкости. *Сб. докл. 3-й науч.-практ. конф. «Проблемы строительной теплофизики и энергосбережения в зданиях»*. М.: НИИСФ, 1998. С. 112–117.
3. Buryanov A.F. Gypsum, researching and application from P.P. Budnikov to the present time. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2005. No. 9, pp. 46–48. (In Russian).
4. Petropavlovskii K.S., Buryanov A.F., Petropavlovskaya V.B., Novichenkova T.B. Lightened self-reinforced gypsum composites. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2019. No. 10, pp. 40–45. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-775-10-40-45>
5. Yakovlev G., Khozin V., Polyanskikh I., Keriene J., Gordina A., Petrova T. Utilization of blast furnace flue dust while modifying gypsum binders with carbon nanostructures. *The 9th International Conference "Environmental engineering"*. 22–23 May 2014. Vilnius, Lithuania, pp. 1–5.
6. Strokova V.V., Cherevatova A.B., Zhernovskiy I.V., Voytovich E.V. Peculiarities of phase formation in a composite nanostructured gypsum binder. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2012. No. 7, pp. 9–12. (In Russian).
7. Kuzmina V.P. Mechanoactivation of materials for construction. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2007. No. 9, pp. 2–4. (In Russian).
8. Rakhimov R.Z., Khaliullin M.I., Gayfullin A.R. Composite gypsum binders with the use of claydite dust and blast-furnace slags. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2012. No. 7, pp. 13–16. (In Russian).
9. Korovyakov V.F. Structure of hardening stone from composite gypsum binder. *Sukhie stroitel'nye smesi*. 2013. No. 1, pp. 16–19. (In Russian).
10. Baranov I.M. Composite gypsum polymer materials. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2008. No. 8, pp. 25–28. (In Russian).
11. Baranov I.M. Composite mineral-polymer construction materials on the basis of acrylic copolymer. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2012. No. 2, pp. 68–71.
12. Khaev T.E., Tkach E.V. Oreshkin D.V. Modified lightweight gypsum material with hollow glass microspheres for restoration works. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2017. No. 10, pp. 45–51. (In Russian).
13. Meshheryakov Yu.G., Tairov T.N., Fedorov S.V. Verfahren der komplexen production der Anhydrit und Gipsbinder. *Int. Kongress Fachmess Euro ECO*. 2011.
14. Sychugov S., Tokarev Y., Plekhanova T., Kazantseva A., Gaynetdinova D. Binders based on natural anhydrite and modified by finely-dispersed galvanic and petrochemical waste. *Procedia Engineering Modern Building Materials, Structures and Techniques*. 2013. Vol. 57, pp. 1022–1028.
15. Bessonov I.V. "Capital" – weatherproof gypsum cladding of buildings. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 1999. No. 9, pp. 12–14. (In Russian).
16. Bessonov I.V. Gypsum of increased water resistance. *Conf. "Problems of construction thermophysics and energy saving in buildings"*. Moscow. 1998, pp. 112–117.

Д.А. КАЛАБИНА, инженер (аспирант) (4450539@gmail.com),
 Г.И. ЯКОВЛЕВ, д-р техн. наук (gyakov@istu.ru),
 Ю.М. ВАСИЛЬЧЕНКО, канд. техн. наук (fominden@mail.ru),
 Н.В. КУЗЬМИНА, инженер (oosila22a@mail.ru),
 А.Ф. ГОРДИНА, канд. техн. наук (gism56@mail.ru)

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

Модификация углеродсодержащими добавками фторангидритовой композиции для устройства полов

Исследованы электропроводящие свойства пластифицированной фторангидритовой композиции для устройства полов, изучено влияние на ее электропроводность трех добавок: измельченного графитового отхода марки ЭГСП, терморасширенного графита на его основе, а также металл/углеродного нанокompозита. Описана технология получения терморасширенного графита из отхода электродов для дуговых печей. Показано, что введение микроразмерных частиц графита приводит к снижению прочности материала на 28,7%, но не оказывает влияния на его электрическое сопротивление. Модификация пластифицированной фторангидритовой композиции металл/углеродным нанокompозитом обеспечивает снижение электрического сопротивления материала в три раза, при этом прочность образцов при сжатии снижается в четыре раза. Введение терморасширенного графита в количестве 7% от массы фторангидрита показывает свою эффективность в снижении электрического сопротивления материала в 11 раз при падении прочности на 7-е сутки с 34,9 до 29,8 МПа (15%).

Ключевые слова: фторангидрит, фосфат натрия, графит, терморасширенный графит, металл/углеродный нанокompозит, электропроводность.

Для цитирования: Калабина Д.А., Яковлев Г.И., Васильченко Ю.М., Кузьмина Н.В., Гордина А.Ф. Модификация углеродсодержащими добавками фторангидритовой композиции для устройства полов // *Строительные материалы*. 2021. № 8. С. 27–31. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-794-8-27-31>

D.A. KALABINA, Engineer (Postgraduate student) (4450539@gmail.com), G.I. YAKOVLEV, Doctor of Sciences (Engineering) (gyakov@istu.ru), Yu.M. VASILCHENKO, Candidate of Sciences (Engineering) (fominden@mail.ru), N.V. KUZMINA, Engineer (oosila22a@mail.ru), A.F. GORDINA, Candidate of Sciences (Engineering) (gism56@mail.ru) Kalashnikov Izhevsk State Technical University (7, Studencheskaya Street, Izhevsk, 426000, Russian Federation)

Modification of Fluoroanhydrite Composition for Flooring with Carbon-Containing Additives

The electrical conductive properties of the plasticized fluoroanhydrite composition for flooring have been investigated, the effect of three additives on its electrical conductivity has been studied: crushed graphite waste grade EGSP, thermally expanded graphite based on it, and metal/carbon nanocomposite. The technology of obtaining thermally expanded graphite from the waste of electrodes for arc furnaces is described. It is shown that the introduction of micro-sized particles of graphite leads to a decrease in the strength of the material by 28.7%, but does not affect its electrical resistance. Modification of the plasticized hydrite fluoride composition with a metal/carbon nanocomposite reduces the electrical resistance of the material by a factor of 3, while the compressive strength of the samples decreases by a factor of 4. The introduction of thermally expanded graphite in an amount of 7% of the mass of fluoroanhydrite shows its effectiveness in reducing the electrical resistance of the material by 11 times with a drop in strength on the 7th day from 34.9 to 29.8 MPa (15%).

Keywords: fluoroanhydrite, sodium phosphate, graphite, thermally expanded graphite, metal/carbon nanocomposite, electrical conductivity.

For citation: Kalabina D.A., Yakovlev G.I., Vasilchenko Yu.M., Kuzmina N.V., Gordina A.F. Modification of fluoroanhydrite composition for flooring with carbon-containing additives. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2021. No. 8, pp. 27–31. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-794-8-27-31>

Проблема улучшения электропроводящих свойств актуальна в промышленности строительных материалов различного назначения: конструкционные бетоны, полы, пленки, нагревательные панели, краски. С целью снижения электрического сопротивления в цементные, гипсовые, органические полимерные системы вводятся электропроводящие наполнители – сажа, графит, углеродные, металлические и металлизированные волокна, металлическая пудра, металл/углеродные нанокompозиты. Так, разработаны составы для экранирования от электромагнитных полей на основе перлита, эпоксидной смолы и терморасширенного графита ТРГ [1] с включением графита в цементную матрицу [2]. Для снижения электропроводности цементной матрицы

используются также углеродные нанотрубки [3] и магнетит [4]. В составы на основе гидравлической извести вводятся графитсодержащие отходы [5], обеспечивающие повышение прочности и водостойкости материала. Графитом также модифицируются полимеры – разработаны электропроводящие составы на основе эпоксидной смолы [6]. Исследования показывают, что изостатический графит не только снижает электропроводность материала благодаря однородности физических свойств во всех направлениях, но и повышает прочность гипсовых [7] и цементных паст [8].

Наиболее востребованными электропроводящими материалами являются антистатические лакокрасочные покрытия и полы. Согласно СП 29.13330.2011

«Полы», для обеспечения комфортных условий с точки зрения антистатика и защиты электронного оборудования полы в помещениях жилых и общественных зданий должны выполняться с покрытием из антистатических материалов с удельным поверхностным электрическим сопротивлением в пределах $1 \cdot 10^6 - 1 \cdot 10^9$ Ом.

В соответствии с вышеперечисленными нормативными требованиями разработаны составы для антистатических полов на основе металлонасыщенных бетонов с добавлением шлифовальных шламов подшипникового производства [9]. Существуют разработки фторангидритовых составов для устройства полов с пониженным электрическим сопротивлением, которые показывают: добавка сажи в количестве 7 мас. % фторангидрита обеспечивает снижение электрического сопротивления композиции до 100 Ом [10]; добавление хризотиловой дисперсии на основе 40%-го азотнокислого кальция в количестве 1,5% от массы фторангидрита снижает электрическое сопротивление в 106 раз [11]. Наряду с улучшением электропроводящих свойств введение добавок приводит к падению прочности материала на 50–70% [10, 11].

Целью данного исследования являлось определение электропроводящих свойств разработанного ранее пластифицированного фторангидритового состава для устройства полов и поиск эффективного технологического решения по его модификации, обеспечивающего снижение электропроводности материала при сохранении высоких физико-механических характеристик.

Материалы и методы исследования

В исследовании использован порошкообразный фторангидрит – отход производства плавиковой кислоты компании «ГалоПолимер» (г. Пермь), соответствующий ТУ 5744-132-05807960–98, характеризующийся однородностью химического и минералогического состава и незначительным количеством примесей. По радиационно-гигиеническим характеристикам применяемый в исследовании фторангидрит отвечает требованиям санитарных правил и пригоден для изготовления строительных материалов. Химический состав фторангидрита, %: CaO 35–39,5; SO₃ не менее 48; CaF₂ – 2,2–6; SiO₂ – 2,6–4,85; Al₂O₃ – 0,5–0,7; Fe₂O₃ – 0,2–0,95. Рентгенофазовый анализ фторангидрита показал преобладание в нем растворимого сульфата кальция γ -CaSO₄. Для улучшения реологических свойств растворной смеси порошок предварительно измельчался в дисковом истирателе ИД-200 (средний диаметр частиц после помола составлял 10,5 мкм).

Экспериментальные образцы готовились на основе запатентованного высокопрочного фторангидритового вяжущего, активированного фосфатом натрия [12] с добавлением поликарбоксилатного пластификатора в соответствии с технологией, описанной в исследовании [13].

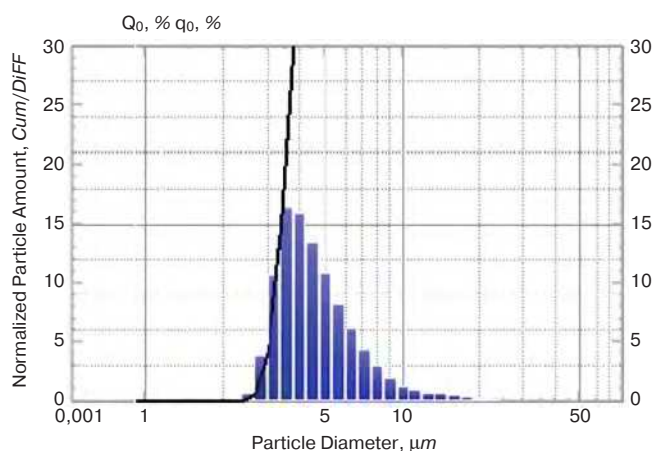


Рис. 1. Дисперсионный анализ измельченного графитового порошка
Fig. 1. Dispersion analysis of crushed graphite powder



Рис. 2. Фильтрация окисленного графита
Fig. 2. Filtration of oxidized graphite

Для улучшения электропроводящих свойств пластифицированной фторангидритовой композиции (К) в ее состав вводились три углеродсодержащие добавки:

1. Порошок графита – отхода электродов для дуговых печей марки ЭГСП, предварительно измельченный на истирателе ИД-200. Дисперсионный анализ измельченного графитового отхода (рис. 1), проведенный на лазерном анализаторе SALD-7500nano, показал, что средний диаметр частиц составляет 4,359 мкм.

2. Терморасширенный графит (ТРГ), подготовленный по запатентованному способу [14] на основе графитового порошка из п. 1. Согласно гипотезе, хромовая кислота окисляет межслоевые графеновые связи, образуя ОН-группы, восприимчивые к СВЧ-облучению. Графеновые листы распушаются, благо-

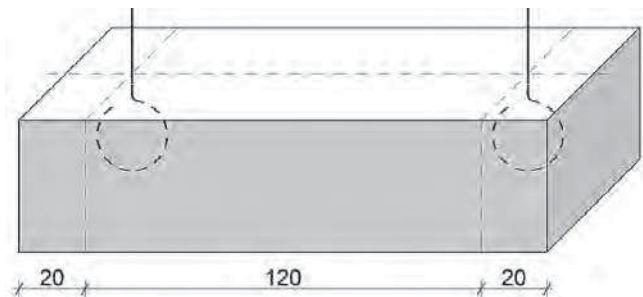


Рис. 3. Измеритель иммитанса и схема подготовки образца для определения электропроводности
Fig. 3. Immittance meter and sample preparation scheme for determining electrical conductivity

даря чему графит приобретает высокую удельную поверхность и низкую насыпную плотность. Для окисления графитсодержащего порошка использовалась смесь серной кислоты с плотностью 1,34 г/мл и бихромата калия, продуктом взаимодействия которых является хромовая кислота. Процесс окисления проводился в течение 1 ч при непрерывном помешивании, после чего окисленный графит промывался дистиллированной водой до нейтральной реакции фильтрата (рис. 2). Затем фильтрат сушили в вакуумной печи при температуре 115–130°C до постоянной массы, охлаждали при комнатной температуре. Процедура распушки проводилась путем об-

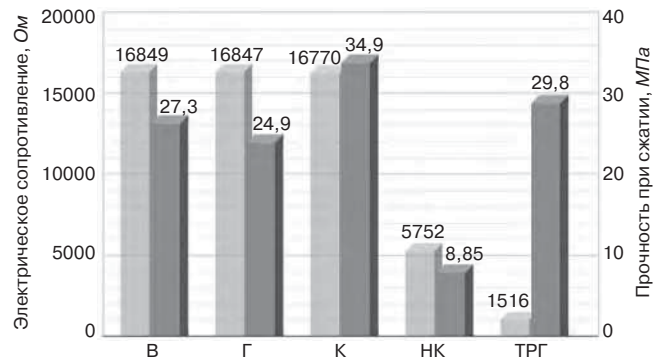


Рис. 4. Свойства фторангидритовой композиции с различными электропроводящими добавками: ■ – электрическое сопротивление, Ом; ■ – прочность при сжатии, МПа

Fig. 4. Properties of fluoroanhydrite composition with various electrically conductive additives: ■ – Electrical resistance, Ом; ■ – Compressive strength, MPa

лучения окисленного графита в бытовой СВЧ-печи порционно по 4 с на низкой мощности. Следует отметить, что распушке подверглось примерно 50% объема графита; наиболее крупные частицы остались в неизменном виде, что можно объяснить неполным окислением крупноразмерных частиц или наличием примесей.

3. Металл/углеродный нанокompозит производства АО ИЭМЗ «Купол» (ТУ 2494-002-07502963–13) представляет собой наночастицы меди размером от 11 до 28 нм, стабилизированные в углеродных нанопленочных структурах, образованных углеродными аморфными нановолокнами, ассоциированными с металлсодержащей фазой [15]. Металл/углеродными нанокompозитами модифицируют органические композиции (клеи, компаунды, герметики, связующие) и неорганические (пенобетоны, тяжелые бетоны).

Согласно анализу литературы, оптимальная концентрация электропроводящего заполнителя в составах для устройства полов находится в районе 7%, что обеспечивает достаточные для передачи зарядов расстояния между электропроводящими частицами.

Для проведения эксперимента в стандартные образцы-балочки размерами 160×40×40 мм при формовании на расстоянии 120 мм друг от друга вставлялись проводники – медные стержни с петлей. Электропроводность образцов определялась с помощью измерителя иммитанса E7-20 (рис. 3).

Качественные характеристики фторангидритовых композиций в возрасте 7 сут
Qualitative characteristics of fluoroanhydrite compositions at the age of 7 days

Наименование состава	Прочность, МПа		Электрическое сопротивление, Ом
	На растяжение при изгибе	При сжатии	
В	7,16	27,3	16849
К	10,2	34,9	16770
НК	6,7	8,85	5752
Г	9,8	24,9	16847
ТРГ	8,4	29,8	1516

Состав исследуемых образцов:

В – высокопрочное фторангидритовое вяжущее по патенту [12] – фторангидрит, затворенный 3% водным раствором фосфата натрия;

К – контрольный состав, представляющий собой фторангидрит, затворенный водным раствором фосфата натрия и поликарбоксилатного пластификатора;

НК – то же, с добавлением металл/углеродного нанокompозита в количестве 7% от массы фторангидрита;

Г – то же, с добавлением порошка графита в количестве 7% от массы фторангидрита;

ТРГ – то же, с добавлением терморасширенного графита в количестве 7% от массы фторангидрита.

Согласно полученным данным (см. таблицу и рис. 4), все исследованные составы по своим электропроводящим свойствам удовлетворяют требованиям п. 5.11 СП 29.13330.2011. Введение измельченного графита оказалось неэффективным, так как не повлияло на электропроводящие свойства композиции, при этом ее прочность снизилась на 28,7%. Модификация пластифицированной фторангидритовой композиции металл/углеродным нанокompозитом обеспечила снижение электрического сопротивления материала в три раза, при этом прочность образцов при сжатии снизилась в четыре раза. Дальнейшее увеличение концентрации металл/углеродного нанокompозита нецелесообразно, так как приведет к еще большим потерям прочности. Оптимальные результаты по улучшению электропроводящих свойств обеспечивает модификация пластифицированной фторангидритовой композиции добавкой терморасширенного графита в количестве 7% от массы фторангидрита, что позволяет снизить электрическое сопротивление материала в 11 раз при незначительном падении прочности (на 15%). Пластифицированная фторангидритовая композиция, обогащенная электропроводящей добавкой терморасширенного графита, по своим физико-механическим свойствам удовлетворяет требованиям строительных правил СП 29.13330.2011 и может применяться при устройстве антистатических полов в жилых и общественных зданиях. Утилизация графитсодержащих отходов путем внедрения в промышленность строительных материалов терморасширенного графита на их основе обеспечит снижение негативного воздействия на окружающую среду.

Список литературы / References

1. Sirenko O.G., Makhno S.M., Lisova O.M., et al. Electrophysical properties of composites based on the epoxy resin and expanded graphite. *Chemistry, Physics and Technology of Surface*. 2018. Vol. 9. No. 4, pp. 442–446. DOI: 10.15407/hftp09.04.442
2. Cao J., Chung D.D.L. Colloidal graphite as an admixture in cement and as a coating on cement for electromagnetic interference shielding. *Cement and Concrete Research*. 2003. Vol. 33. Iss. 11, pp. 1737–1740. doi.org/10.1016/S0008-8846(03)00152-2
3. Kaur R., Kothiyal N.C. Comparative effects of sterically stabilized functionalized carbon nanotubes and graphene oxide as reinforcing agent on physico-mechanical properties and electrical resistivity of cement nanocomposites. *Construction and Building Materials*. 2019. Vol. 202, pp. 121–138. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.220
4. Авдушева М.А., Невзоров А.Л. Влияние магнетита на электропроводность растворной смеси // *Строительные материалы*. 2017. № 11. С. 55–58.
4. Avdusheva M.A., Nevzorov A.L. Effect of magnetite on the electrical conductivity of the solution mixture. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2017. No. 11, pp. 55–58. (In Russian).
5. Mar Barbero-Barrera M., Flores Medina N., Guardia-Martín C. Influence of the addition of waste graphite powder on the physical and microstructural performance of hydraulic lime pastes. *Construction and Building Materials*. 2017. Vol. 149, pp. 599–611; https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.156
6. Герасимова А.В., Меметов Н.Р., Ткачев А.Г., Ягубов В.С. Электропроводящие композиты на основе эпоксидной смолы, модифицированной графеном // *Вектор науки Тольяттинского государственного университета*. 2020. № 3 (53). С. 19–25. DOI: 10.18323/2073-5073-2020-3-19-25
6. Gerasimova A.V., Memetov N.R., Tkachev A.G., Yagubov V.S. Electrically conductive composites based on epoxy resin modified with graphene. *Vektor nauki Tol'yattinskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2020. No. 3 (53), pp. 19–25. (In Russian). DOI: 10.18323/2073-5073-2020-3-19-25
7. Flores Medina N., Mar Barbero-Barrer M., Bustamante R. Improvement of the properties of gypsum-based composites with recycled isostatic graphite powder from the milling production of molds for Electrical Discharge Machining (EDM) used as a new filler. *Construction and Building Materials*. 2016. Vol. 107, pp. 17–27. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.194
8. Flores Medina N., Mar Barbero-Barrer M., Jové-Sandoval F. Improvement of the mechanical and physical properties of cement pastes and mortars through the addition isostatic graphite. *Construction and Building Materials*. 2018. Vol. 189, pp. 898–905. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.09.055
9. Лемешев М.С. Электропроводные металлонасыщенные бетоны полифункционального назначения // *Актуальные проблемы архитектуры, строительства, энергоэффективности и экологии: Сборник материалов международной научно-практической конференции*. Тюмень. 27–29 апреля 2016 г. С. 242–247.
9. Lemeshev M.S. Conductive metal-saturated concretes for polyfunctional purposes. *Actual problems of archi-*

- ecture, construction, energy efficiency and ecology. 2016: Collection of materials of the international scientific and practical conference. Tumen. 2016 April 27–29, pp. 242–247. (In Russian).
10. Yakovlev G., Pervushin G., Smirnova O., Begunova E., Saidova Z. The electrical conductivity of fluoroanhydrite compositions modified at the nanoscale level with carbon black. *Environmental and Climate Technologies*. 2020. Vol. 24 (1), pp. 706–717. <https://doi.org/10.2478/rtuect-2020-0044>
 11. Yakovlev G.I., Begunova E.V., Drochytka R., Melichar J., Pudov I.A., Saidova Z.S. The influence of activated dispersed additives on electrical conductivity of anhydrite compositions. *Solid State Phenomena*. 2021. Vol. 321, pp. 51–57. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/ssp.321.51>
 12. Патент на изобретение 2723788 С1. 17.06.2020. Высокопрочное фторангидритовое вяжущее, способ получения высокопрочного фторангидритового вяжущего и композиции на его основе (варианты) / Грахов В.П., Первушин Г.Н., Калабина Д.А. [и др.]. Заявка № 2019109289 от 29.03.2019.
 12. Invention patent 2723788 C1, 17.06.2020. High-strength fluoroanhydrite binder, a method of obtaining high-strength fluoroanhydrite binder and compositions based on it (options). Grakhov V.P., Pervushin G.N., Kalabina D.A. Application № 2019109289 29.03.2019. (In Russian).
 13. Калабина Д.А., Яковлев Г.И., Кузьмина Н.В. Безусадочные фторангидритовые композиции для устройства полов // *Известия КГАСУ*. 2021. № 1 (55). С. 24–38. DOI: 10.52409/20731523_2021_1_24
 13. Kalabina D.A., Yakovlev G.I., Kuzmina N.V. Shrinkage-free fluoroanhydrite compositions for flooring. *Izvestia KGASU*. 2021. No. 1 (55), pp. 24–38. (In Russian). DOI: 10.52409/20731523_2021_1_24
 14. Патент 2075438 РФ МПК C01B 31/04, H05B 6/64. Способ получения расширенного графита / Смирнов А.В., Смирнова В.А. 1997.
 14. Patent 2075438 RF МПК C01B 31/04, H05B 6/64. Expanded graphite production method. Smirnov A.V., Smirnova V.A. 1997. (In Russian).
 15. Патент 2715655 РФ МПК C2. Способ получения металл/углеродных нанокompозитов / Кодолов В.И., Тринеева В.В., Мустакимов Р.В. и др. 2020. Бюл. № 7.
 15. Patent 2715655 RF IPC C2. Method of obtaining metal / carbon nanocomposites. Kodolov V.I., Trineeva V.V., Mustakimov R.V. and other. 2020. Bull. No. 7. (In Russian).

100+
**TECHNO
BUILD**

VIII Международный
строительный форум
и выставка

**ДИАЛОГ
РЕГИОНОВ**

5-7 октября 2021
Екатеринбург

forum-100.ru

Новинки **ВОЛМА** 2021

Компания «ВОЛМА» давно перестала быть исключительно производителем гипсовой продукции. Стремительно развивается цементное направление — производство и продажа цементных штукатурок, шпаклевок, наливных полов и плиточных клеев. В текущем году ассортиментную линейку ВОЛМА пополнил ряд новых продуктов.



ВОЛМА-ЭКСТРАКЛЕЙ — усиленный плиточный клей для мест с повышенными эксплуатационными нагрузками.

- Для облицовки стен, полов, террас плиткой любых форматов и крупных размеров из керамики, керамогранита, природного и искусственного камня, а также мрамора
- Для любых систем «теплый пол»
- В крытых бассейнах и резервуарах
- Для внутренних и наружных работ
- Укладка плитки по старой плитке
- Для мест с повышенными эксплуатационными нагрузками

Температура работ, °С	5–30
Прочность сцепления, МПа, не менее	1,5–1,8
Открытое время, мин, не менее	30
Время коррекции, мин, не менее	35
Расход, кг/м ² при толщине слоя 1 мм	1,3
Слой нанесения, мм	3–20
Время использования готовой растворной смеси, ч	4
Использование при устройстве теплого пола	да

ВОЛМА-МУЛЬТИКЛЕЙ БЕЛЫЙ позволяет решать сложные цветовые задачи при облицовке.

- Для облицовки стен и полов керамической плиткой и плиткой крупного формата из керамогранита, гранита, натурального и искусственного камня светлых оттенков
- Лучшее решение для мозаичной и мраморной белой плитки
- Для внутренних и наружных работ
- Для системы «теплый пол»

Цвет	БЕЛЫЙ
Температура работ, °С	5–30
Прочность сцепления, МПа, не менее	1,2
Открытое время, мин	20
Время коррекции, мин, не менее	20
Расход, кг/м ² при толщине слоя 1 мм	1,3
Слой нанесения, мм	3–20
Использование при устройстве теплого пола	да



ВОЛМА-ДЕКОР — гипсовая штукатурная смесь для создания декоративных фактур. Это уникальный продукт, который составит достойную конкуренцию дорогостоящим декоративным составам. Штукатурка тонкослойная, белоснежная, с жизнеспособностью не менее 2 ч, что открывает широкий простор для реализации любых дизайнерских решений. Для создания многообразных фактур могут быть использованы как специализированные валики, так и любые подручные материалы.

Рекомендуемая толщина слоя	в зависимости от требуемой фактуры
Расход смеси на 1 м ² при толщине слоя 5 мм, кг	до 5
Жизнеспособность раствора, мин, не менее	120
Предел прочности на растяжение при изгибе, МПа, не менее	1
Предел прочности при сжатии, МПа, не менее	2
Прочность сцепления с основанием, МПа, не менее	0,3
Способ нанесения	ручное

Ассортимент стеновых материалов в 2021 г. пополнился двумя новинками: **VOLMA CEMENTPANEL** и **ВОЛМА-Файерстоп**.

VOLMA CEMENTPANEL – влагостойкая цементно-перлитовая плита для возведения и облицовки стен любой формы. Материал ударопрочен, негорюч, устойчив к влаге, грибку и значительным перепадам температуры.



Толщина, мм	12 и 9
Длина, мм	2400
Ширина, мм	1200
Плотность, кг/м ³	1200–1400
Морозостойкость, циклов	150
Водопоглощение, %, не более	15
Ударная вязкость, кДж/м ² , не менее	10
Предел прочности при изгибе, МПа, не менее	10
Паропроницаемость, мг/(м·ч)	0,14
Группа горючести	НГ (негорючие)

ВОЛМА-ФАЙЕРСТОП – это эффективное решение для ответственных задач, где требуется повышенная огнезащита. Представляет собой гипсовую строительную плиту с плетеным армированием, состоящую из гипсового сердечника с добавлением стекловолокна. Все плоскости плиты, кроме торцевых кромок, облицованы негорючим стеклохолстом, прочно приклеенным к сердечнику. Стены, облицованные плитами ВОЛМА-ФАЙЕРСТОП, призваны локализовать пожар в одном помещении и не дать пламени вырваться наружу.

Длина плиты, мм	2500
Ширина плиты, мм	1200
Толщина плиты, мм	12,5
Кромка	ПК
Вес, кг/м ²	до 12,5
Плотность, кг/м ³ , не менее	850
Класс пожарной опасности	КМ0
Группа горючести	НГ (негорючие)



ВОЛМА-УЛЬТРАГРУНТ – концентрат грунтовочного состава для впитывающих оснований, который выполняет следующие функции.

- Регулирует впитывающую способность основания
- Предотвращает обезвоживание штукатурки
- Повышает адгезию к основанию
- Укрепляет слабые поверхности

Основание	Разбавление концентрат : вода	Расход концентрата, кг/м ²	Расход грунтовочного состава после разбавления, кг/м ²
Газо-, пенобетон	1:5	0,05	0,3
Керамический и силикатный кирпич, керамзито- и шлакоблоки	1:4	0,05	0,25
Гипсовые и цементные штукатурки	1:5	0,03	0,2
Цементная стяжка и гипсовая стяжка	1-й слой – 1:3 2-й слой – 1:2 (нанесение второго слоя – после полного высыхания первого)	0,05	0,2
ПГП, ПГПВ	1:5	0,03	0,2

Мы постоянно работаем над продуктовой линейкой ВОЛМА для максимального удовлетворения потребностей наших клиентов, – отмечает Владимир ОВЧИНЦЕВ, генеральный директор ООО «Управляющая компания «ВОЛМА». – Действующий продуктовый конвейер нашего R&D центра системно разрабатывает и ставит на производство новые продукты для эффективного решения все более широкого спектра задач. Кроме того, мы постоянно находимся в тесном взаимодействии с людьми, которые каждый день работают с нашими материалами, понимаем их потребности, и именно это ложится в основу разработки новых продуктов, позволяя создавать новинки ВОЛМА, в которых нуждается рынок.



А.Ф. БУРЬЯНОВ¹, д-р техн. наук (rga-service@mail.ru);
Х.-Б. ФИШЕР², доктор-инженер (hans-bertram.fischer@uni-weimar.de);
Н.А. ГАЛЬЦЕВА¹, канд. техн. наук (galcevanadezda@mail.ru),
Е.Н. БУЛДЫЖОВА¹, инженер (ByldizhovaEN@mgsu.ru)

¹ Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (129337, Москва, ул. Ярославское ш., 26)

² Веймарский строительный университет (Германия, Coudraystraße 11, 99421, Weimar)

Исследование роли сульфата калия при проектировании активатора твердения

Изучена возможность управления структурой при модифицировании ангидритовых систем. Исследование активаторов твердения нерастворимого ангидрита позволит расширить возможность его применения в производстве строительных материалов и изделий. Изучены зависимости сроков схватывания и предела прочности при сжатии трех видов модифицированного вяжущего – обжигового ангидритового вяжущего, синтетического ангидритового вяжущего, природного ангидритового вяжущего – от содержания K_2SO_4 . Проведенные исследования показали, что добавление сульфата калия способствует ускорению гидратации ангидритовых вяжущих и приводит к набору прочности при сжатии затвердевших образцов. Физико-технические характеристики вяжущих зависят от количества вводимой добавки K_2SO_4 и от вида ангидритового вяжущего. Для дальнейшего изучения в качестве базового активатора твердения был принят сульфат калия в количестве 1 и 2%.

Ключевые слова: ангидритовое вяжущее, активатор твердения, обжиг, пластификатор.

Для цитирования: Бурьянов А.Ф., Фишер Х.-Б., Гальцева Н.А., Булдыжова Е.Н. Исследование роли сульфата калия при проектировании активатора твердения // *Строительные материалы*. 2021. № 8. С. 34–38. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-794-8-34-38>

A.F. BURYANOV¹, Doctor of Sciences (Engineering) (rga-service@mail.ru); H.-B. FISHER², Doctor-Engineer (hans-bertram.fischer@uni-weimar.de); N.A. GALTSEVA¹, Candidate of Sciences (Engineering), (galcevanadezda@mail.ru), E.N. BYLDIZHOVA¹, Engineer, (ByldizhovaEN@mgsu.ru)

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

² Bauhaus-Universität Weimar (Coudraystraße 11, 99421 Weimar, Deutschland)

Investigation of the Role of Potassium Sulfate in the Design of a Hardening Activator

The article is devoted to the study of the possibility of structure control during the modification of anhydrite systems. The study of insoluble anhydrite hardening activators and accelerators will make it possible to expand the possibility of using anhydrite in the production of construction products and materials. The dependences of the setting time and the compressive strength of three types of modified binder were studied: firing anhydrite binder, synthetic anhydrite binder, natural anhydrite binder on the content of K_2SO_4 . The conducted studies have shown that the addition of potassium sulfate accelerates the hydration of anhydrite binders and leads to a set of compressive strength of hardened samples. The physical and technical characteristics of binders depend on the amount of the K_2SO_4 additive being introduced and on the type of anhydrite binder. For further study, potassium sulfate in the amounts of 1 and 2% was adopted as the basic hardening activator.

Keywords: anhydrite binder, hardening activator, roasting, plasticizer.

For citation: Buryanov A.F., Fisher H.-B., Galtseva N.A., Byldizhova E.N. Investigation of the role of potassium sulfate in the design of a hardening activator. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2021. No. 8, pp. 34–38. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-794-8-34-38>

Развитием и внедрением строительных материалов на основе ангидрита занимались многие российские и зарубежные исследователи [1–5]. Однако до сих пор недостаточно полно изучены возможности управления структурой при модифицировании ангидритовых систем [6–8]. Расширение представлений о физико-химических аспектах формирования ангидритовых композиций позволит достичь улучшения свойств получаемых материалов и будет способствовать их дальнейшему развитию.

Разработке строительных материалов на основе ангидритовых вяжущих посвящено достаточно большое количество работ как российских, так и зарубежных исследователей [9–11]. Вяжущее на основе нерастворимого ангидрита относится к медленно-твердеющим. Этот факт зачастую останавливает производителей строительных материалов в его использовании.

На сегодняшний день существует множество активаторов твердения нерастворимого ангидрита. Эффективность ускорителей зависит от ряда факторов. Но однозначного объяснения действия добавок, применяемых для получения ангидритовых материалов с оптимальными свойствами, нет, и эта проблема нуждается во всестороннем исследовании [12–15].

Использование ангидрита в производстве строительных изделий и материалов является перспективным направлением в строительстве, так как ангидритовое вяжущее является взаимозаменяемым местным материалом и может использоваться взамен цементного или гипсового.

Материалы и методы исследований

В данном исследовании использовался природный гипсоангидритовый камень Гаурдакского месторождения. Минералогический анализ ангидрито-

вого камня показал, что порода является мономинеральной.

Для получения нерастворимого ангидрита методом обжига использовался природный гипсовый камень Бесленевского месторождения.

С производства Воронежской компании ООО «ГИПСТЕХ» поступила партия нерастворимого ангидрита, полученного из вышеуказанного природного гипсового камня обжигом при температуре 900°C во вращающейся печи.

Также в работе использовался синтетический ангидрит, полученный на опытной установке ОАО «НИУИФ» посредством взаимодействия концентрированной серной кислоты с молотым известняком, с получением дигидрата сульфата кальция и дальнейшим его обезвоживанием.

В качестве сульфатных активаторов твердения нерастворимого ангидрита использовались чистые химикаты.

Результаты исследований

Сульфат калия выступает в качестве эффективно активатора твердения ангидрита. Между сульфа-

том кальция и сульфатом калия образуется двойная соль – сингенит ($K_2Ca(SO_4)_2 \cdot H_2O$). Данные о влиянии сингенита на ангидритовые вяжущие неоднозначны и противоречивы.

Для исследования влияния сульфата калия на нерастворимый ангидрит были разработаны составы ангидритовых вяжущих веществ, содержащие 1; 1,5 и 2% сульфата калия. Физико-механические характеристики различных вяжущих веществ представлены в табл. 1–3. У всех выбранных составов определялись сроки схватывания, прочность при сжатии на 3-и, 7-е, 28-е сут, а также величина рН среды.

Водородный показатель среды ангидритовых вяжущих зависит от их вида. Показатель рН среды ангидритовых суспензий на основе нерастворимого ангидрита, полученного обжигом природного гипсового камня, он составил 11,6; на основе нерастворимого ангидрита, полученного из природного гипсоангидритового камня, составил 11; на основе синтетического ангидрита – 7,3. При добавлении K_2SO_4 в ангидритовые вяжущие водородный показатель не изменялся, так как рН сульфата калия нейтральный.

Таблица 1
Table 1

Свойства модифицированного ангидритового вяжущего, полученного обжигом природного гипсового камня
Properties of modified anhydrite binder obtained by firing natural gypsum stone

№ состава	Добавки-ускорители		В/А, %	Сроки схватывания, мин		Предел прочности при сжатии, МПа		
	Вид добавки	Количество, %		Начало	Конец	3-и сут	7-е сут	28-е сут
1	–	0	0,46	Более 480	–	1,9	1,4	2
2	K_2SO_4	1	0,46	180	240	13,1	8,8	11,9
3	K_2SO_4	1,5	0,46	206	266	7,7	11	8,7
4	K_2SO_4	2	0,46	153	258	11,5	9,6	12,8

Таблица 2
Table 2

Свойства модифицированного синтетического ангидритового вяжущего
Properties of modified synthetic anhydrite binder

№ состава	Добавки-ускорители		В/А, %	Сроки схватывания, мин		Предел прочности при сжатии, МПа		
	Вид добавки	Количество, %		Начало	Конец	3-и сут	7-е сут	28-е сут
1	–	0	0,5	Более суток	–	–	–	–
2	K_2SO_4	1	0,5	170	220	3,8	7,8	12,4
3	K_2SO_4	1,5	0,5	210	270	3,7	7	10,5
4	K_2SO_4	2	0,5	150	234	4,4	8,9	13,3

Таблица 3
Table 3

Свойства модифицированного ангидритового вяжущего, на основе природного гипсоангидритового камня
Properties of modified anhydrite binder based on natural gypsum anhydrite stone

№ состава	Добавки-ускорители		В/А, %	Сроки схватывания, мин		Предел прочности при сжатии, МПа		
	Вид добавки	Количество, %		Начало	Конец	3-и сут	7-е сут	28-е сут
1	–	0	0,35	Более суток	–	–	–	–
2	K_2SO_4	1	0,35	160	237	4,6	5,9	11,7
3	K_2SO_4	1,5	0,35	170	250	4,5	6	10,9
4	K_2SO_4	2	0,35	125	180	4,6	5,8	12,4

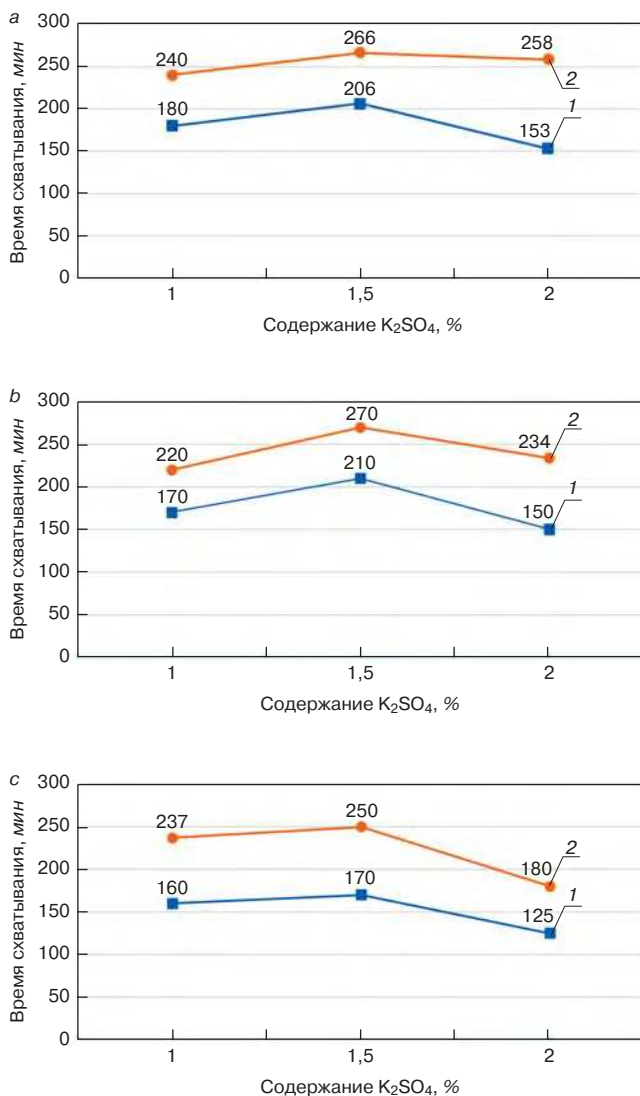


Рис. 1. Зависимость сроков схватывания от содержания K_2SO_4 , мин: *a* – модифицированного обжигового ангидритового вяжущего; *b* – модифицированного синтетического ангидритового вяжущего; *c* – модифицированного природного ангидритового вяжущего; 1 – начало схватывания; 2 – конец схватывания

Fig. 1. The dependence of the setting time on the content of K_2SO_4 , min: *a* – modified roasting anhydrite binder; *b* – modified synthetic anhydrite binder; *c* – modified natural anhydrite binder; 1 – the beginning of setting; 2 – the end of setting

На рис. 1 представлены зависимости сроков схватывания модифицированных ангидритовых вяжущих от содержания сульфата калия.

Характер зависимостей сроков схватывания ангидритовых вяжущих (рис. 1) идентичен. При содержании 1,5% сульфата калия замечено удлинение начала и конца схватывания ангидритовых вяжущих.

На рис. 2 представлены зависимости предела прочности при сжатии модифицированных ангидритовых вяжущих.

При анализе зависимостей прочностей при сжатии (рис. 2) характер кривых у синтетического и природного ангидритов схож, рост прочности наблюдается во времени. Минимальный набор прочности при сжатии происходит при добавлении сульфата калия в количестве 1,5%.

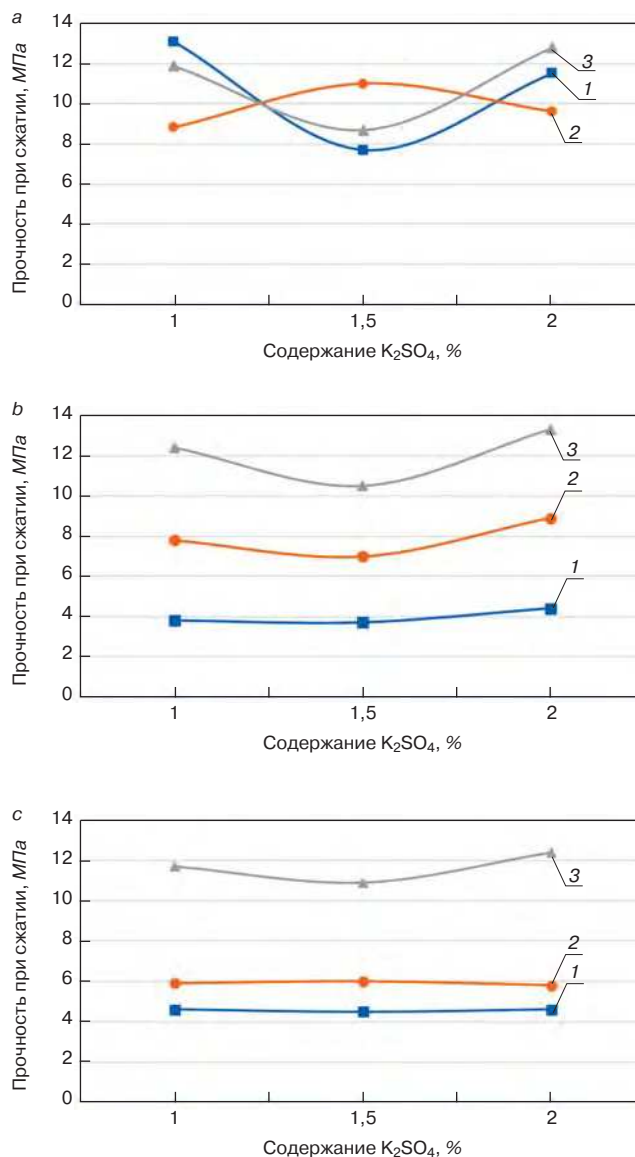


Рис. 2. Зависимость предела прочности при сжатии от содержания K_2SO_4 , МПа: *a* – модифицированного обжигового ангидритового вяжущего; *b* – модифицированного синтетического ангидритового вяжущего; *c* – модифицированного природного ангидритового вяжущего; 1 – 3 сут; 2 – 7 сут; 3 – 28 сут

Fig. 2. The dependence of the ultimate strength in compression on the content of K_2SO_4 , MPa: *a* – modified roasting anhydrite binder; *b* – modified synthetic anhydrite binder; *c* – modified natural anhydrite binder; 1 – 3 days; 2 – 7 days; 3 – 28 days

Кривые зависимости прочности при сжатии обжигового ангидрита (рис. 2, *a*) отличаются от кривых зависимостей при сжатии двух других видов ангидритовых составов. При добавлении 1 и 2% сульфата калия происходит подъем прочности на 3-и сут, на 7-е сут прочность падает, а к 28-м сут происходит набор прочности. При добавлении 1,5% сульфата калия наблюдается постепенный рост прочности в течение 7 сут, но к 28-м сут прочность образцов падает.

Заключение и основные выводы

Проведенные исследования показали, что добавление сульфата калия способствует ускорению гидратации ангидритовых вяжущих и приводит к набору

прочности при сжатии затвердевших образцов. Физико-технические характеристики вяжущих зависят от количества вводимой добавки K_2SO_4 и от вида

ангидритового вяжущего. Для дальнейшего изучения в качестве базового активатора твердения был принят сульфат калия в количестве 1 и 2%.

Список литературы

1. Guerra-Cossio M.A., González-Lopez J.R., Magallanes-Rivera R.X., Zaldivar-Cadena A.A., Figueroa-Torres M.Z. Calcium sulfate: an alternative for environmentally friendly construction. *2 International conference on Bio-based Building materials*. 2017, pp. 1–5.
2. Каклюгин А.В., Касторных Л.И., Ступень Н.С., Коваленко В.В. Прессованные композиты на основе модифицированного гипсового вяжущего повышенной воздухоустойчивости // *Строительные материалы*. 2020. № 12. С. 40–46. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-787-12-40-46>
3. Клименко В.Г., Павленко В.И., Гасанов С.К. Влияние pH жидкости затворения на прочностные свойства гипсовых вяжущих // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2014. № 5. С. 16–20.
4. Калабина Д.А., Яковлев Г.И., Дрохитка Р., Грахов В.П., Первушин Г.Н., Баженов К.А., Трошкова В.В. Реологическая активация фторангидритовых композиций эфирами поликарбоксилата // *Строительные материалы*. 2020. № 1–2. С. 38–47. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-778-1-2-38-47>
5. Клименко В.Г. Роль двойных солей на основе сульфатов Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , NH_4^+ в технологии получения ангидритовых вяжущих // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2017. № 12. С. 119–125.
6. Токарев Ю.В., Волков М.А., Агеев А.В., Кузьмина Н.В., Грахов В.П., Яковлев Г.И., Хазеев Д.Р. Оценка эффективности применения водной дисперсии углеродных частиц в ангидритовом вяжущем // *Строительные материалы*. 2020. № 1–2. С. 24–35. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-778-1-2-24-35>
7. Клименко В.Г., Гасанов С.К., Кашин Г.А. Исследования физико-химических процессов в системе сульфат кальция – магнетит // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2017. № 8. С. 134–139.
8. Гаркави М.С., Артамонов А.В., Колодежная Е.В., Нефедьев А.П., Худовекова Е.А., Бурьянов А.Ф., Фишер Х.-Б. Активированные наполнители для гипсовых и ангидритовых смесей // *Строительные материалы*. 2018. № 8. С. 14–17. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2018-762-8-14-17>
9. Дребезгова М.Ю., Чернышева Н.В., Шаталова С.В. Композиционное гипсовое вяжущее с многокомпонентными минеральными добавками разного генезиса // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2017. № 10. С. 27–34.
10. Аниканова Л.А., Курмангалиева А.И., Волкова О.В., Первушина Д.М. Влияние пластифицирующих добавок на свойства газогипсовых материалов // *Вестник ТГАСУ*. 2020. № 1. С. 106–117.

References

1. Guerra-Cossio M.A., González-Lopez J.R., Magallanes-Rivera R.X., Zaldivar-Cadena A.A., Figueroa-Torres M.Z. Calcium sulfate: an alternative for environmentally friendly construction. *2 International conference on Bio-based Building materials*. 2017, pp. 1–5.
2. Kaklyugin A.V., Kastornykh L.I., Stupen N.S., Kovalenko V.V. Press-formed composites with alternate wetting and drying resistance based on modified gypsum binder. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2020. No. 12, pp. 40–46. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-787-12-40-46>
3. Klimenko V.G., Pavlenko V.I., Gasanov S.K. Effect of pH of the mixing fluid on the strength properties of gypsum binders. *Vestnik BGTU im. V.G. Shukhova*. 2014. No. 5, pp. 16–20. (In Russian).
4. Kalabina D.A., Yakovlev G.I., Drochitka R., Grakhov V.P., Pervushin G.N., Bazhenov K.A., Troshkova V.V. Rheological activation of fluoroanhydrite compositions with polycarboxylate esters. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2020. No. 1–2, pp. 38–47. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-778-1-2-38-47>
5. Klimenko V.G. The role of double salts based on sulfates Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , NH_4^+ in the technology of producing anhydrite binders. *Vestnik BGTU im. V.G. Shukhova*. 2017. No. 12, pp. 119–125. (In Russian).
6. Tokarev Yu.V., Volkov M.A., Ageev A.V., Kuzmina N.V., Grakhov V.P., Yakovlev G.I., Khazeev D.R. Estimation of efficiency of applying aqueous dispersion of carbon particles in anhydrite binder. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2020. No. 1–2, pp. 24–35. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-778-1-2-24-35>
7. Klimenko V.G., Gasanov S.K., Kashin G.A. Research of physicochemical processes in the system calcium sulfate – magnetite. *Vestnik BGTU im. V.G. Shukhova*. 2017. No. 8, pp. 134–139. (In Russian).
8. Garkavi M.S., Artamonov A.V., Kolodezhnaya E.V., Nefedev A.P., Khudovekova E.A., Buryanov A.F., Fisher H.-B. Activated fillers for gypsum and anhydrite mixes. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2018. No. 8, pp. 14–17. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2018-762-8-14-17>
9. Drebezgova M.YU., Chernysheva N.V., Shatalova S.V. Composite gypsum binder with multicomponent mineral additives of different genesis. *Vestnik BGTU im. V.G. Shukhova*. 2017. No. 10, pp. 27–34. (In Russian).
10. Anikanova L.A., Kurmangaliyeva A.I., Volkova O.V., Pervushina D.M. Influence of plasticizing additives on the properties of gas-gypsum materials. *Vestnik TGASU*. 2020. No. 1, pp. 106–117. (In Russian).

11. Kodzoev M.-B., Isachenko S., Kosarev S., Basova A., Skvortzov A., Asamatdinov M., Zhukov A. Modified gypsum binder. *MATEC Web of Conferences*. St. Petersburg. 2017, pp. 1–7. DOI: 10.1051/mateconf/201817003022
12. Гаркави М.С., Артамонов А.В., Колодежная Е.В., Неведьев А.П., Худовекова Е.А. Гипсовое вяжущее низкой водопотребности: производство и свойства // *Строительные материалы*. 2020. № 7. С. 34–38. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-782-7-34-38>
13. Jassim Muhsin Aliewi, Abdul Qader Nihad Noori, Arshad Nadhom M. Ali. Effect of adding industrial wastes on the mechanical properties of gypsum. *International Journal of Science and Research (IJSR)*. 2019. Vol. 8. Iss. 8, pp. 2123–2125. DOI: 10.21275/ART2020736
14. Dominic Gazdic, Jana Mokra, Jan Hanacek. Influence of Plasticizers on Properties of Anhydrite Binder. *Key Engineering Materials*. 2018. Vol. 760, pp. 16–21. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.760.16
15. Батова М.Д., Семёнова Ю.А., Гордина А.Ф., Яковлев Г.И., Эльрефаи А.Э.М.М., Саидова З.С., Хазеев Д.Р. Модификация материалов на основе сульфата кальция комплексными минеральными добавками // *Строительные материалы*. 2021. № 1–2. С. 13–21. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-788-1-2-13-21>
11. Kodzoev M.-B., Isachenko S., Kosarev S., Basova A., Skvortzov A., Asamatdinov M., Zhukov A. Modified gypsum binder. *MATEC Web of Conferences*. St. Petersburg. 2017, pp. 1–7. DOI: 10.1051/mateconf/201817003022
12. Garkavi M.S., Artamonov A.V., Kolodezhnaya E.V., Nefedev A.P., Khudovekova E.A. Gypsum binder of low water demand: production and properties. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2020. No. 7, pp. 34–38. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-782-7-34-38>
13. Jassim Muhsin Aliewi, Abdul Qader Nihad Noori, Arshad Nadhom M. Ali. Effect of adding industrial wastes on the mechanical properties of gypsum. *International Journal of Science and Research (IJSR)*. 2019. Vol. 8. Iss. 8, pp. 2123–2125. DOI: 10.21275/ART2020736
14. Dominic Gazdic, Jana Mokra, Jan Hanacek. Influence of Plasticizers on Properties of Anhydrite Binder. *Key Engineering Materials*. 2018. Vol. 760, pp. 16–21. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.760.16
15. Batova M.D., Semenova Yu.A., Gordina A.F., Yakovlev G.I., Elrefai A.E.M.M., Saidova Z.S., Khazeev D.R. Complex mineral additives for the modification of calcium sulphate based materials. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2021. No. 1–2, pp. 13–21. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-788-1-2-13-21>

Министерство строительства РС (Я)
Якутский государственный проектный, научно-исследовательский
институт строительства
Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова

Федеральный центр нормирования, стандартизации и технической оценки
соответствия в строительстве
Научно-исследовательский центр «Строительство»
Научно-исследовательский институт строительной физики РААСН

**VI Всероссийская научно-практическая конференция, посвященная 85-летию создания строительного комплекса Якутии
«Современные проблемы строительства и жизнеобеспечения:
безопасность, качество, энерго- и ресурсосбережение»**

5–6 октября 2021 г.

Организатор: Инженерно-технический институт СВФУ им. М.К. Аммосова

г. Якутск, Россия

НАПРАВЛЕНИЯ КОНФЕРЕНЦИИ:

- Проектирование, строительство и эксплуатация зданий и сооружений
- Энергоэффективное строительство
- Эффективные строительные материалы и технологии
- Архитектура и градостроительство
- Совершенствование систем инженерного обеспечения зданий и сооружений
- Экспертиза и управление недвижимостью
- Подготовка кадров для строительной отрасли
- Актуальные вопросы строительной отрасли в экстремальных условиях Арктики и Субарктики

Языки конференции: русский. Форма конференции: заочная. По итогам конференции будет опубликован электронный сборник научных трудов с присвоением ему ISBN, УДК, ББК и размещением в базе данных РИНЦ

Оргкомитет:

- Корнилов Т.А.* – директор Инженерно-технического института Северо-Восточного федерального университета, д-р техн. наук, доцент (председатель)
Матвеева О.И. – генеральный директор ОАО «Якутский проектный научно-исследовательский институт строительства», канд. техн. наук, доцент
Местников А.Е. – зав. кафедрой производства строительных материалов, изделий и конструкций СВФУ, д-р техн. наук, профессор
Посельский Ф.Ф. – зав. кафедрой промышленного и гражданского строительства СВФУ, канд. техн. наук, доцент
Иванов В.Н. – зав. кафедрой теплогоснабжения и вентиляции СВФУ, канд. техн. наук, доцент
Федорова Г.Д. – доцент кафедры промышленного и гражданского строительства СВФУ, канд. техн. наук, доцент
Архангельская Е.А. – зав. кафедрой экспертизы и кадастра недвижимости СВФУ, канд. техн. наук, доцент
Юмашева Е.И. – главный редактор издательства «Стройматериалы» (научно-технические журналы «Строительные материалы», «Жилищное строительство», «Бетон и железобетон»)

Почтовый адрес: 677000, г. Якутск, ул. Белинского, 58, СВФУ, Инженерно-технический институт

Телефон: 8-984-114-88-30 **E-mail:** orgkomitet-iti@ya.ru

Ответственный секретарь: **Попов Александр Леонидович**

А.Н. РЯЗАНОВ¹, канд. техн. наук (aryazanov@hotmail.com);
 Р.И. ШИГАПОВ², главный технолог (ufagips@mail.ru);
 Д.А. СЕНИЦИН¹, канд. техн. наук (d4013438@yandex.ru),
 Д.Ф. КИНЗЯБУЛАТОВА¹, студентка (dinkin567890@gmail.com),
 И.В. НЕДОСЕКО¹, д-р техн. наук (nedoseko1964@mail.ru)

¹ Уфимский государственный нефтяной технический университет (450080, г. Уфа, ул. Менделеева, 195)

² ООО «Уфимская гипсовая компания» (450028, г. Уфа, ул. Производственная, 8)

Использование гипсовых композиций в технологиях строительной 3D-печати малоэтажных жилых зданий. Проблемы и перспективы

Применение технологии 3D-печати для возведения строительных объектов с каждым годом получает все большее распространение. Стремительно развивается оборудование для строительной 3D-печати, разрабатываются рецептуры смесей, совершенствуется технология печати. Первые экспериментальные малоэтажные здания по данной технологии возводятся не только зарубежными, но и отечественными строителями. В качестве материала для строительной 3D-печати в настоящее время применяются преимущественно сухие смеси на цементной основе, также разработаны рецептуры смесей на гипсовой основе. Основной причиной стремительного развития технологии 3D-печати в строительстве являются ее значительные преимущества, такие как высокая архитектурно-художественная выразительность зданий, увеличение скорости строительства, значительное снижение трудозатрат, сокращение количества отходов строительного производства. Однако, помимо преимуществ, технология строительной 3D-печати имеет ряд не решенных в настоящее время вопросов, основным из которых является возведение элементов перекрытий и покрытий. В статье представлены результаты испытаний крупноразмерных фрагментов стен, выполненных по технологии 3D-печати с использованием сухой смеси на основе гипсового вяжущего, а также описан опыт экспериментального проектирования двухэтажного жилого здания, предназначенного для возведения по технологии 3D-печати. Отмечено, что наиболее рациональным техническим решением для таких зданий являются балочные междуэтажные и чердачные перекрытия из тонкостенных облегченных стальных конструкций (оцинкованных ЛСТК-профилей) и монолитного пеногипса, а в качестве теплоизоляции может быть рекомендовано заполнение внутреннего пространства наружных стен монолитным пеногипсом. Предложенная конструкция перекрытий позволяет возвести малоэтажный жилой дом по технологии 3D-печати почти полностью из негорючих экологически чистых материалов на гипсовой основе с минимальным весом конструкций и минимальной нагрузкой на фундамент.

Ключевые слова: строительная 3D-печать, теплоэффективные стены, сухие смеси, монолитный пеногипс, чердачное и междуэтажное перекрытия, негорючий утеплитель.

Для цитирования: Рязанов А.Н., Шигапов Р.И., Сеницин Д.А., Кинзябулатова Д.Ф., Недосеко И.В. Использование гипсовых композиций в технологиях строительной 3D-печати малоэтажных жилых зданий. Проблемы и перспективы // *Строительные материалы*. 2021. № 8. С. 39–44. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-794-8-39-44>

A.N. RYAZANOV¹, Candidate of Sciences (Engineering) (aryazanov@hotmail.com); R.I. SHIGAPOV², Chief Technologist (ufagips@mail.ru); D.A. SINITSIN¹, Candidate of Sciences (Engineering) (d4013438@yandex.ru), D.F. KINZYABULATOVA¹, Student (dinkin567890@gmail.com), I.V. NEDOSECO¹, Doctor of Sciences (Engineering) (nedoseko1964@mail.ru)

¹ Ufa State Petroleum Technological University (195, Mendeleeva Street, Ufa, 450062, Russian Federation)

² "Ufa Gypsum Company" LLC (8, Proizvodstvennaya Street, Ufa, 450028, Russian Federation)

The use of Gypsum Compositions in the Technologies of Construction 3D Printing of Low-Rise Residential Buildings. Problems and Prospects

The use of 3D printing technology for the construction of construction objects is becoming more widespread every year. The equipment for construction 3D printing is rapidly developing, formulas of mixtures are being developed, printing technology is being improved. The first experimental low-rise buildings using this technology are being built not only by foreign, but also by domestic builders. Currently, dry cement-based mixtures are mainly used as a material for construction 3D printing, and recipes for gypsum-based mixtures have also been developed. The main reason for the rapid development of 3D printing technology in construction is its significant advantages, such as high architectural and artistic expressiveness of buildings, an increase in the speed of construction, a significant reduction in labor costs, and a reduction in the amount of construction waste. However, in addition to the advantages, the technology of construction 3D printing has a number of currently unresolved issues, the main of which is the construction of ceiling elements and coatings. The article presents the results of tests of large-sized fragments of walls made with the use of 3D printing technology using a dry mixture based on gypsum binder, and also describes the experience of experimental design of a two-story residential building intended for construction using 3D printing technology. It is noted that the most rational technical solution for such buildings is beam inter-floor and attic floors made of thin-walled lightweight steel structures (galvanized Light Thin-Walled Steel Structures profiles) and monolithic foam gypsum, and filling the inner space of the outer walls with monolithic foam gypsum can be recommended as thermal insulation. The proposed construction of floors makes it possible to build a low-rise residential building using 3D printing technology almost entirely from non-flammable environmentally friendly materials on a gypsum basis with a minimum weight of structures and a minimum load on the foundation.

Keywords: construction 3D printing, heat-efficient walls, dry mixes, monolithic foam gypsum, attic and floor-to-floor ceilings, non-flammable insulation.

For citation: Ryazanov A.N., Shigapov R.I., Sinitsin D.A., Kinzyabulatoва D.F., Nedoseco I.V. The use of gypsum compositions in the technologies of construction 3D printing of low-rise residential buildings. Problems and prospects. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2021. No. 8, pp. 39–44. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-794-8-39-44>

Технология трехмерной печати зданий и сооружений различного функционального назначения (в основном жилищно-гражданского – малоэтажных жилых зданий, остановочных павильонов и др.) за последние два десятилетия уверенно вошла в современное строительное производство. В настоящее время серийно выпускается высокопроизводительное оборудование для строительной 3D-печати (строительные 3D-принтеры), причем не только импортное, но и российское (например, ГК «АМТ-СПЕЦАВИА»). Специалистами строительной индустрии в сотрудничестве с учеными профильных научно-исследовательских институтов и вузов разрабо-

таны и апробированы различные виды сухих смесей на цементной и гипсовой основе [1–7]. Такие революционные темпы освоения новой техники и технологии связаны с тем, что 3D-печать безусловно имеет неоспоримые преимущества перед традиционной технологией возведения аналогичных зданий и сооружений ввиду почти на порядок меньших трудозатрат и потребности в квалифицированной рабочей силе (практически исключаются либо каменные, либо опалубочные работы), значительного ускорения темпов строительства, экологичности (существенно снижается объем отходов строительного производства), высокой архитектурно-художественной выра-



Рис. 1. Строительный 3D-принтер в процессе печати малых архитектурных форм
Fig. 1. Construction 3D printer in the process of printing small architectural forms



Рис. 2. Крупноразмерные образцы (фрагменты стен), напечатанные на 3D-принтере: а – с заполнением крупнопористым керамзитобетоном; б – с заполнением пеногипсом
Fig. 2. Large-sized samples (wall fragments), printed on a 3D printer: а – filled with large-porous expanded clay concrete; б – filled with foam gypsum

зительности и экономичности. Все это, по мнению многих исследователей [8–10], способно осуществить давнюю мечту строителей – обеспечить потребности населения доступным и комфортным жильем.

Цель настоящего исследования – проанализировать как положительный опыт, накопленный в данном направлении зарубежными и отечественными специалистами, так и возникающие проблемы.

Большой частью современные 3D-принтеры (как порталного типа, так и выполненные по принципу роботов-манипуляторов) способны достаточно эффективно возводить вертикальные конструкции зданий, такие как несущие и самонесущие стены, а также межквартирные и межкомнатные перегородки; при этом за малым исключением (небольшие сооружения с покрытием купольной формы) в технологии трехмерной печати практически отсутствует опыт устройства перекрытий, которые, к сожалению, возводятся по традиционным конструктивным решениям и технологиям (монолитными, сборными или сборно-монолитными), естественно, с соответствующими для данных строительных процессов потребностями в трудовых ресурсах, механизмах и оборудовании (грузоподъемное крановое оборудование, бетононасосы и др.). В данном случае напечатанные на принтере стены выполняют только ограждающую функцию и роль несъемной опалубки для бетонирования монолитных колонн и пилонов. Это обстоятельство, по мнению авторов, является главной причиной, существенно снижающей экономичность технологии строительной 3D-печати и препятствующей ее масштабному внедрению в массовое строительство.

Другой немаловажной проблемой является отсутствие апробированных инженерных методик по оценке несущей способности напечатанных стен, тем более с различной конфигурацией и внутренним заполнением. Для решения данного вопроса были проведены натурные испытания крупноразмерных ($500 \times 400 \times 500$ мм) фрагментов стен с различным заполнением внутреннего пространства (с использованием пеногипса и крупнопористого керамзитобетона), напечатанных с использованием сухих смесей на основе гипсоцементно-пуццолановых вяжущих на серийном 3D-принтере AMT S-6044 LONG (производства ГК «АМТ-СПЕЦАВИА») в ООО «Уфимская гипсовая компания» (рис. 1, 2).

Проведенные испытания показали, что осредненные сопротивления сжатию при разрушении данных фрагментов варьировались от 1,6 до 2,15 МПа, причем данные испытания выявили интересный факт: заполнение внутреннего пространства напечатанных стен крупнопористым керамзитобетоном и тем более пеногипсом практически не увеличивает их несущую способность (фактически керамзитобетон и пеногипс в данном случае выполняют только теплоизолирующую и звукоизолирующую функцию, аналогично теплоизоляционным засыпкам).

С учетом действующих нормативных документов (СП 15.13330.2012 «Каменные и армокаменные кон-

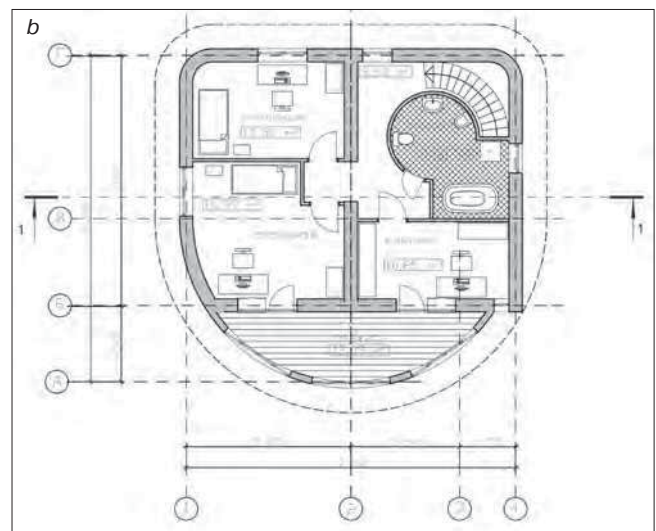
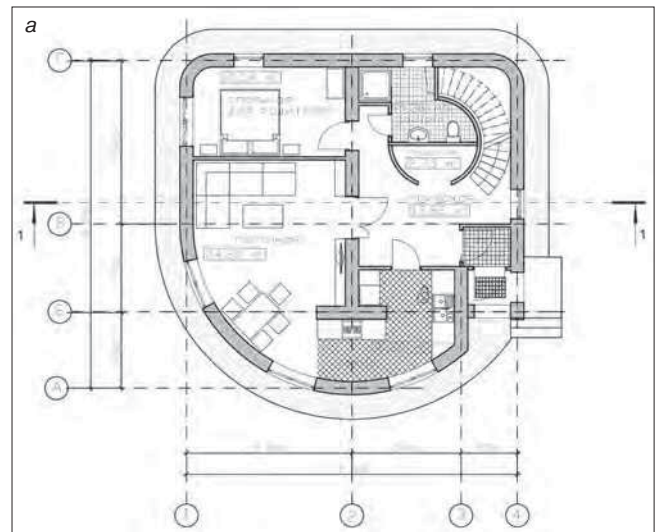


Рис. 3. Архитектурно-планировочное решение двухэтажного жилого дома для возведения по технологии 3D-печати: а – план 1-го этажа; б – план 2-го этажа; с – визуализация

Fig. 3. Architectural and planning solution of a two-story residential building for construction using 3D printing technology: a – plan of the 1st floor; b – plan of the 2nd floor; c – visualization

струкции»; СП 63.13330.2012 «Бетонные и железобетонные конструкции») и соответствующих пособий по расчету и проектированию данных нормативов оценим расчетные сопротивления сжатию для напечатанных пустотелых стен на основе гипсовых композиций. В частности, если считать напечатанную

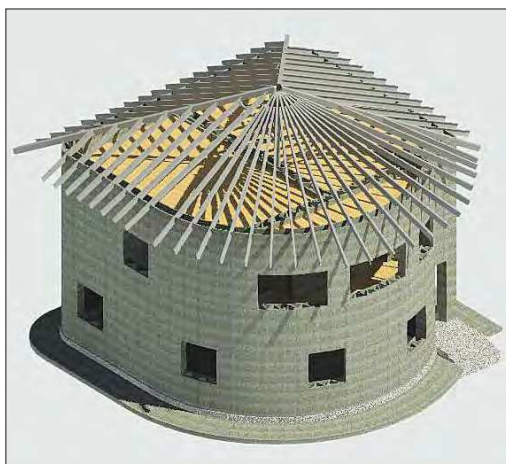


Рис. 4. Конструктивное решение двухэтажного жилого дома для возведения по технологии 3D-печати

Fig. 4. Constructive solution of a two-story residential building for construction using 3D printing technology



Рис. 5. Испытание конструкции перекрытия из монолитного пеногипса по ЛСТК-профилям

Fig. 5. Testing of the structure of the ceiling made of monolithic foam gypsum using LSTK-profiles (lightweight steel thin-walled structures profiles)

стену бетонной монолитной конструкцией, то ее минимальное расчетное сопротивление сжатию (среднее, или бруто по поперечному сечению с учетом пустот) составит $1,6/1,6=1$ МПа, а если считать напечатанную на 3D-принтере стену аналогией каменной кладки из высокопустотных бетонных блоков, то расчетное сопротивление данной комплексной кладки составит не менее $1,6/2=0,8$ МПа, где 1,6 и 2 – коэффициенты перехода от разрушающих к расчетным сопротивлениям сжатию, или «ко-

эффициенты запаса», соответственно для бетонных и каменных конструкций.

Анализируя даже минимальную величину расчетного сопротивления сжатию, считая напечатанную стену аналогией с пустотной каменной кладкой, как менее надежной с конструктивной точки зрения, чем бетонная конструкция, можно заключить, что она примерно соответствует расчетному сопротивлению сплошной кладки из бетонных камней (или блоков) марки 35 на растворе марки 25. Это превышает мини-

Реклама

BARKRAFT®

УФИМСКАЯ
ГИПСОВАЯ
КОМПАНИЯ

ПРОДАЖА ГИПСА

Г5 БII строительный
Г5 БIII формовочный

ПРОДАЖА \ ТОЛЛИНГ ССС

Штукатурки • Шпаклевки
Клеи • Наливные полы

ТАРА

БИГ-БЭГ

НАВАЛ

Уфа, ул. Цветочная, 3/3
тел. +7 (347) 226-08-08
www.barkraft.ru

ЖД

АВТО

РФ/СНГ

мально допустимые расчетные сопротивления кладки (0,5–0,7 МПа – для кладки из кирпича и бетонных камней; 0,4–0,6 МПа – для кладки из блоков конструкционно-теплоизоляционного газобетона по табл. 2 и 3 СП 15.13330.2012 «Каменные и армокаменные конструкции»), которые позволяют возводить малоэтажные здания (до трех этажей включительно) даже с учетом повышенных нагрузок от веса сборных железобетонных плит перекрытий и цементно-песчаной стяжки. Следовательно, несущей способности стен, напечатанных из гипсовых композиций, вполне достаточно для восприятия действующих нагрузок от междуэтажного и чердачного перекрытий, а также стропильной скатной кровли, что позволяет, во-первых, отказаться от дорогостоящего внутреннего монолитного железобетонного каркаса, а во-вторых – от необходимости использования для 3D-печати стен более прочных, но медленно схватывающихся и твердеющих (по сравнению с гипсовыми и гипсоцементными) композиций на цементной основе.

При выборе объемно-планировочного и конструктивного решений двухэтажного жилого здания на гипсовой основе, которое предполагается возводить по аддитивной (3D-печатной) технологии, по мнению авторов, следует учитывать почти столетний положительный отечественный опыт строительства и эксплуатации малоэтажных зданий с несущими стенами из гипсовых блоков [11, 12], который заключается в обеспечении трех необходимых условий. Во-первых, необходимо устройство скатной стропильной крыши (лучше с неорганизованным водостоком для исключения образования сосулек и наледи) с достаточным выносом карниза, чтобы избежать замачивания наружных стен. Во-вторых, необходима хотя бы минимальная (не менее 300 мм) бетонная цокольная часть (для исключения замачивания нижней части стен со стороны отмостки). В-третьих, междуэтажные и чердачные перекрытия целесообразно выполнять по балочной схеме с использованием деревянных или стальных балок (с засыпным или монолитным легким утеплителем). Если обеспечены перечисленные условия, то долговеч-

ность и эксплуатационная надежность данных зданий обеспечиваются при использовании любых гипсовых композиций, и не только вяжущих повышенной водостойкости (гипсоцементно-пуццолановых, гипсоизвестково-шлаковых и др.).

На рис. 3 и 4 представлены архитектурно-планировочное и конструктивное решения индивидуального жилого дома, практически полностью выполненного из гипсовых материалов: наружные и внутренние стены, а также перегородки напечатаны из сухих смесей на гипсоцементно-пуццолановой основе (возможно заполнение внутреннего пространства утеплителями на основе пеногипса, а также засыпками из особо легкого керамзита или вспученного перлита), перекрытия выполнены облегченными каркасно-монолитными с использованием тонкостенных облегченных стальных конструкций (оцинкованных ЛСТК-профилей), монолитного пеногипса, гипскартона и быстротвердеющей наливной стяжки на гипсовой основе. Несущая способность таких перекрытий сопоставима с пределом несущей способности железобетонных перекрытий [13, 14] (рис. 5) при более чем в два раза меньшем весе. Кровля запроектирована скатной (шатровой) также с использованием тонкостенных оцинкованных профилей, фиброцементных плит и цветной гибкой черепицы. Дополнительным преимуществом приведенного конструктивного решения данного здания является его пожарная безопасность, так как все его несущие и ограждающие конструкции полностью выполнены из негорючих материалов, что является особенно важным в условиях плотной застройки территории.

В настоящее время завершены проектные работы, ООО «Уфимская гипсовая компания» приобретен и находится в процессе доставки из Дании высокопроизводительный порталный 3D-принтер марки фирмы «SOBOD», способный печатать непосредственно на площадке строительства здания размером в плане 12×12 м и высотой до 7 м включительно, и авторы данной статьи полагают, что в ближайшие месяцы будет произведена апробация технологии 3D-печати в условиях реального строительного производства.

Список литературы

1. Le T.T., Austin S.A., Lim S., Buswell R.A., Gibb A.G.F., Thorpe T. Mix design and fresh properties for high-performance printing concrete. *Materials & Structures*. 2012. Vol. 45, pp. 1221–1232. <https://doi.org/10.1617/s11527-012-9828-z>
2. Чжан Ц. Технология проектирования и строительства армированных бетонных конструкций для 3D-печати. В сборнике: *Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова. Материалы конференции*. Белгород, 2021. С. 1696–1700.
3. Шарапова А.В., Дмитриева М.А. Подбор композиций, пригодных для реализации аддитивных технологий в строительстве. В сборнике: *Современные строительные материалы и технологии / Под ред. М.А. Дмитриевой*. 2019. С. 51–72.

References

1. Le T.T., Austin S.A., Lim S., Buswell R.A., Gibb A.G.F., Thorpe T. Mix design and fresh properties for high-performance printing concrete. *Materials & Structures*. 2012. Vol. 45, pp. 1221–1232. <https://doi.org/10.1617/s11527-012-9828-z>
2. Zhang Ts. Technology of design and construction of reinforced concrete structures for 3D printing. In the collection: *International Scientific and Technical Conference of Young Scientists BSTU. V.G. Shukhov. Conference materials*. Belgorod, 2021, pp. 1696–1700. (In Russian).
3. Sharapova A.V., Dmitrieva M.A. Selection of compositions suitable for the implementation of additive technologies in construction. In the collection: *Modern building materials and technologies*. Ed. by M.A. Dmitrieva. 2019, pp. 51–72. (In Russian).

4. Славчева Г.С., Шведова М.А., Бабенко Д.С. Анализ и критериальная оценка реологического поведения смесей для строительной 3D-печати // *Строительные материалы*. 2018. № 12. С. 34–40. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2018-766-12-34-40>
5. Акулова И.И., Славчева Г.С., Макарова Т.В. Технико-экономическая оценка эффективности применения 3D-печати в жилищном строительстве // *Жилищное строительство*. 2019. № 12. С. 52–56. DOI: <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2019-12-52-56>
6. Славчева Г.С., Макарова Т.В. Пенобетоны для теплоизоляционных слоев наружных стен, возводимых методом 3D-печати // *Строительные материалы*. 2018. № 10. С. 30–35. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2018-764-10-30-35>
7. Славчева Г.С. Строительная 3D-печать сегодня: потенциал, проблемы и перспективы практической реализации // *Строительные материалы*. 2021. № 5. С. 28–36. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-791-5-28-36>
8. Kumar L.J., Krishnadas Nair C.G. Current Trends of Additive Manufacturing in the Aerospace Industry. In: Wimpenny D., Pandey P., Kumar L. (eds) *Advances in 3D Printing & Additive Manufacturing Technologies*. Springer, Singapore. 2017 https://doi.org/10.1007/978-981-10-0812-2_4
9. Глаголев Е.С., Лесовик В.С., Бычкова А.А. 3D-печать зданий и строительных компонентов как будущее устойчивого развития строительства. В сборнике: *Природоподобные технологии строительных композиций для защиты среды обитания человека. II Международный онлайн-конгресс, посвященный 30-летию кафедры строительного материаловедения, изделий и конструкций*. Белгород, 2019. С. 303–309.
10. Алексеева Н.С. Перспективы использования 3D-печати в строительстве. В сборнике: *Экономика и управление: тенденции и перспективы: Материалы I Межвузовской научно-практической конференции факультета экономики и управления*. СПб., 2020. С. 211–216.
11. Мирсаев Р.Н., Бабков В.В., Недосеко И.В., Юнусова С.С. и др. Опыт производства и эксплуатации гипсовых стеновых изделий // *Строительные материалы*. 2008. № 3. С. 78–80.
12. Недосеко И.В., Бабков В.В., Юнусова С.С., Гайтова А.Р., Ахмадуллина И.И. Гипсовые и гипсошлаковые композиции на основе природного сырья и отходов промышленности // *Строительные материалы*. 2012. № 8. С. 66–68.
13. Бессонов И.В., Шигапов Р.И., Бабков В.В. Теплоизоляционный пеногипс в малоэтажном строительстве // *Строительные материалы*. 2014. № 7. С. 9–13.
14. Шигапов Р.И., Синицин Д.А., Кузнецов Д.В., Гайсин А.М., Недосеко И.В. Использование конструкционно-теплоизоляционного пеногипса при строительстве и реконструкции зданий. Проблемы и перспективы // *Строительные материалы*. 2020. № 7. С. 28–33.
4. Slavcheva G.S., Shvedova M.A., Babenko D.S. Analysis and criteria assessment of rheological behavior of mixes for construction 3-D printing. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2018. No. 12, pp. 34–40. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2018-766-12-34-40>
5. Akulova I.I., Slavcheva G.S., Makarova T.V. Technical and economic estimate of efficiency of using 3D printing in housing construction. *Zhilishchnoe Stroitel'stvo* [Housing Construction]. 2019. No. 12, pp. 52–56. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2019-12-52-56>
6. Slavchev G.S., Makarova T.V. Foam concretes for heat insulation layers of external walls constructed by the method of 3D printing. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2018. No. 10, pp. 30–35. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2018-764-10-30-35>
7. Slavcheva G.S. 3D-build printing today: potential, challenges and prospects for implementation. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2021. No. 5, pp. 28–36. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-791-5-28-36>
8. Kumar L.J., Krishnadas Nair C.G. Current Trends of Additive Manufacturing in the Aerospace Industry. In: Wimpenny D., Pandey P., Kumar L. (eds) *Advances in 3D Printing & Additive Manufacturing Technologies*. Springer, Singapore. 2017 https://doi.org/10.1007/978-981-10-0812-2_4
9. Glagolev E.S., Lesovik V.S., Bychkova A.A. 3D printing of buildings and building components for the future of sustainable construction. In the collection: *Nature-like technologies of building composites to protect the human environment. II International online congress dedicated to the 30th anniversary of the Department of Building Materials Science, Products and Structures*. Belgorod. 2019, pp. 303–309. (In Russian).
10. Alekseeva N.S. Prospects for the use of 3D printing in construction. In the collection: *Economics and Management: Trends and Prospects. Materials of the I Interuniversity Scientific and Practical Conference of the Faculty of Economics and Management*. St. Petersburg. 2020, pp. 211–216. (In Russian).
11. Mirsaev R.N., Babkov V.V., Nedoseko I.V., Yunusova S.S. and others. Experience in the production and operation of gypsum wall products. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2008. No. 3, pp. 78–80. (In Russian).
12. Nedoseko I.V., Babkov V.V., Yunusova S.S., Gaitova A.R., Akhmadullina I.I. Gypsum and gypsum slag compositions based on natural raw materials and industrial waste. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2012. No. 8, pp. 66–68. (In Russian).
13. Bessonov I.V., Shigapov R.I., Babkov V.V. Thermal insulation foam gypsum in low-rise construction. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2014. No. 7, pp. 9–13. (In Russian).
14. Shigapov R.I., Sinitsin D.A., Kuznetsov D.V., Gaysin A.M., Nedoseko I.V. The use of structural and thermal insulation foam gypsum in the construction and reconstruction of buildings. Problems and prospects. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2020. No. 7, pp. 28–33. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-782-7-28-33>

УДК 691.533

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-794-8-45-52>

Н.В. ЧЕРНЫШЕВА, д-р техн. наук (chernysheva56@rambler.ru),
 В.С. ЛЕСОВИК, д-р техн. наук, профессор (naukavs@mail.ru),
 М.Ю. ДРЕБЕЗГОВА, канд. техн. наук (mdrebezgova@mail.ru),
 Д.А. МОТОРЫКИН, инженер (аспирант) (l20102@yandex.ru),
 Е.Н. ЛЕСНИЧЕНКО, инженер (аспирант) (lesnichenko.zhenia@yandex.ru),
 А.Л. БОЧАРНИКОВ, студент (andrew220399@gmail.com)

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова (308024, г. Белгород, ул. Костюкова, 46)

Состав и реологические свойства формовочных смесей на композиционном гипсовом вяжущем

В малоэтажном строительстве 3D-технология является одной из новых и перспективных, для развития которой необходимо создание специальных материалов с комплексом модифицирующих добавок с необходимыми регулируемыми свойствами. Эффективными для этих целей являются формовочные смеси на основе композиционных гипсовых вяжущих (КГВ), обладающие значительными преимуществами в возможности регулирования в широких пределах сроков схватывания и скорости твердения по сравнению со смесями на портландцементе. Представлены результаты экспериментальных исследований реологических характеристик быстротвердеющих формовочных смесей на основе композиционных гипсовых вяжущих с комплексом органических добавок, которые изучали на ротационном вискозиметре «RHEOTEST RN 4.1». Выполненные исследования подтверждают возможность управления реологическими свойствами специальных формовочных смесей на композиционных гипсовых вяжущих за счет комбинированных функциональных и реологически активных добавок с обеспечением оптимизации их свойств под особенности различных типов формовочного оборудования и решаемых задач. Установлено, что разработанные специальные формовочные смеси на основе КГВ для 3D-аддитивных технологий малоэтажного строительства без заполнителя и с кварцевым песком быстро твердеют и набирают прочность в ранние сроки.

Ключевые слова: формовочные смеси, реологические свойства, композиционные гипсовые вяжущие, органические добавки.

Исследования по получению специальных формовочных смесей на КГВ были проведены в рамках реализации Программы развития опорного университета на базе БГТУ им. В.Г. Шухова до 2021 г.

Для цитирования: Чернышева Н.В., Лесовик В.С., Дребезгова М.Ю., Моторыкин Д.А., Лесниченко Е.Н., Бочарников А.Л. Состав и реологические свойства формовочных смесей на композиционном гипсовом вяжущем // *Строительные материалы*. 2021. № 8. С. 45–52. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-794-8-45-52>

N.V. CHERNYSHEVA, Doctor of Sciences (Engineering) (chernysheva56@rambler.ru),
 V.S. LESOVIK, Doctor of Sciences (Engineering), Professor (naukavs@mail.ru),
 M.Yu. DREBEZGOVA, Candidate of Sciences (Engineering) (mdrebezgova@mail.ru),
 D.A. MOTORYKIN, Engineer (graduate student) (l20102@yandex.ru),
 E.N. LESNICHENKO, Engineer (graduate student) (lesnichenko.zhenia@yandex.ru),
 A.L. BOCHARNIKOV, Student (andrew220399@gmail.com)

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

Composition and Rheological Properties of Molding Mixtures on a Composite Gypsum Binder

In low-rise construction, 3D technology is one of the new and promising, for the development of which it is necessary to create special materials with a complex of modifying additives with the necessary regulated properties. Effective for these purposes are molding mixtures based on composite gypsum binders (CGB), which have significant advantages in the possibility of regulating the setting time and hardening speed within a wide range compared to mixtures based on Portland cement. The results of experimental studies of the rheological characteristics of fast-hardening molding mixtures based on composite gypsum binders with a complex of organic additives, which were studied on a rotary viscometer "RHEOTEST RN 4.1", are presented. The studies conducted confirm the possibility of controlling the rheological properties of special molding mixtures on composite gypsum binders due to combined functional and rheologically active additives, ensuring the optimization of their properties for the characteristics of various types of molding equipment and the tasks to be solved. It is established that the developed special molding mixtures based on CGB for 3D additive technologies of low-rise construction without aggregate and with quartz sand quickly harden and gain strength in an early period.

Keywords: molding mixtures, rheological properties, composite gypsum binders, organic additives.

Studies on the production of special molding mixtures at CGB were carried out as part of the implementation of the Development Program of the reference university on the basis of V. G. Shukhov BSTU until 2021.

For citation: Chernysheva N.V., Lesovik V.S., Drebezgova M.Yu., Motorykin D.A., Lesnichenko E.N., Bocharnikov A.L. Composition and rheological properties of molding mixtures on a composite gypsum binder. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2021. No. 8, pp. 45–52. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-794-8-45-52>

В настоящее время в малоэтажном строительстве технология 3D-печати является одной из новых и самых прогрессивных. Для реализации ее возможностей одной из наиболее сложных и комплексных является проблема создания эффективных формовочных смесей с регулируемыми сроками схватывания и загустевания, с достаточно высокими показателями прочности, однородности и прочности сцепления между различными слоями и др. [1–9].

В основном в малоэтажном строительстве с помощью 3D-технологий в качестве вяжущего применяют различные виды портландцемента, но по причине медленного твердения их использование не всегда рационально. Эффективными для этих целей являются формовочные смеси на основе композиционных гипсовых вяжущих (КГВ), в состав которых входят клинкерные минералы, гипсовое вяжущее и модифицирующие органоминеральные добавки, активно влияющие на процессы гидратации, формирование структуры и свойств затвердевших смесей. Формовочные смеси на КГВ обладают значительными преимуществами в возможности регулирования в широких пределах сроков схватывания и скорости твердения по сравнению со смесями на портландцементе [10–13].

Важными характеристиками формовочных смесей для 3D-технологии строительства являются показатели их экструзируемости и способности держать форму, определяемые вязкопластическими свойствами смесей (вязкостью и показателями пределов текучести), и особенно продолжительность индукционного периода, предшествующего интенсивному росту коагуляционной структуры [14, 15].

Были изучены реологические свойства формовочных смесей при температуре окружающего воздуха 24°C (напряжение сдвига, вязкость, градиент скорости сдвига) на КГВ без заполнителя, а также с кварцевым песком в качестве мелкого заполнителя и с комплексом органических добавок.

Для получения специальных формовочных смесей был разработан состав КГВ, включающий:

- 58% гипсовых вяжущих (70% Г-5БII + 30% ГВВС-16 (Г-16);
- 20% портландцемента ЦЕМ I 42,5Н (ПЦ);
- 20% тонкомолотых до удельной поверхности 500 м²/кг отходов мокрой магнитной сепарации железистых кварцитов, отходов ММС;
- 0,5% метакаолина;

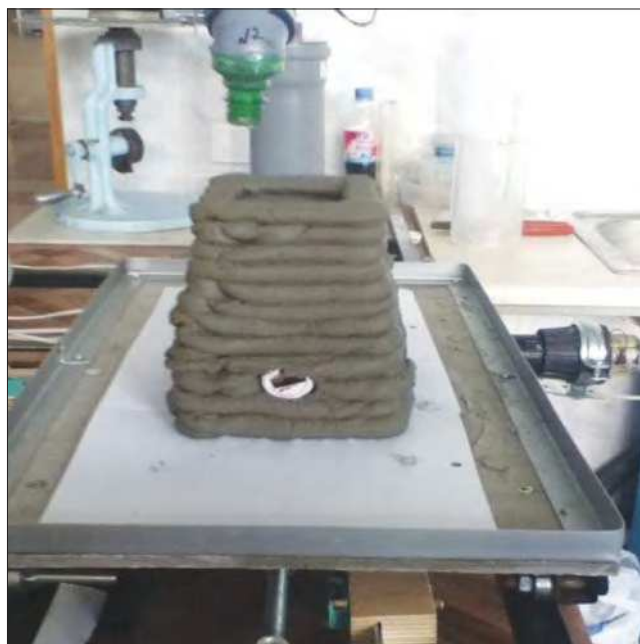


Рис. 1. Экспериментальная лабораторная установка для строительной печати 3D

Fig. 1. Experimental laboratory setup for 3D construction printing

– 1,5% дисперсного мела с содержанием CaCO₃ не менее 96%.

Вяжущее готовили по отдельной технологии, согласно которой отходы ММС предварительно помоли до удельной поверхности 500 м²/кг, а затем совместно с портландцементом, гипсовым вяжущим, метакаолином и мелом в лабораторной шаровой мельнице смешивали, совмещая с кратковременным домолом (в течение 5 мин).

Для регулирования технических свойств формовочных смесей на КГВ применяли сухие органические модификаторы производства ООО «АДДИТИВ ПЛЮС», г. Подольск Московской обл.: суперпластификатор марки MAPF SU 84 – 0,3% (от массы КГВ); стабилизатор марки MAPF Forbo-Crete S 010 – 0,07% (по воде); загуститель марки MAPF № T10 – 0,1%, карбоксиметилцеллюлозу (КМЦ) – 2% и замедлитель сроков схватывания (лимонную кислоту) – 0,2% (от массы КГВ).

Для приготовления формовочной смеси первоначально в необходимое количество воды добавляли лимонную кислоту с целью увеличения временного интервала между началом и концом ее схватывания, а затем при постоянном перемешивании в получен-

Таблица 1
Table 1

Свойства формовочных смесей на КГВ с модифицирующими добавками
Properties of molding sands on composite gypsum binders (CGB) with modifying additives

№	СП	СТ	ЗГ	КМЦ	В/В	Сроки схватывания, мин-с		R _{сж} , МПа, в сроки		
						начало	конец	2 ч	1 сут	7 сут
1	–	–	–	–	0,55	10-30	11-30	3,3	5,8	9,6
2	0,3	0,07	0,1	2	0,4	9-30	10-30	9	10,8	23,6

Примечание. Расплав мини-конуса – 80 мм.

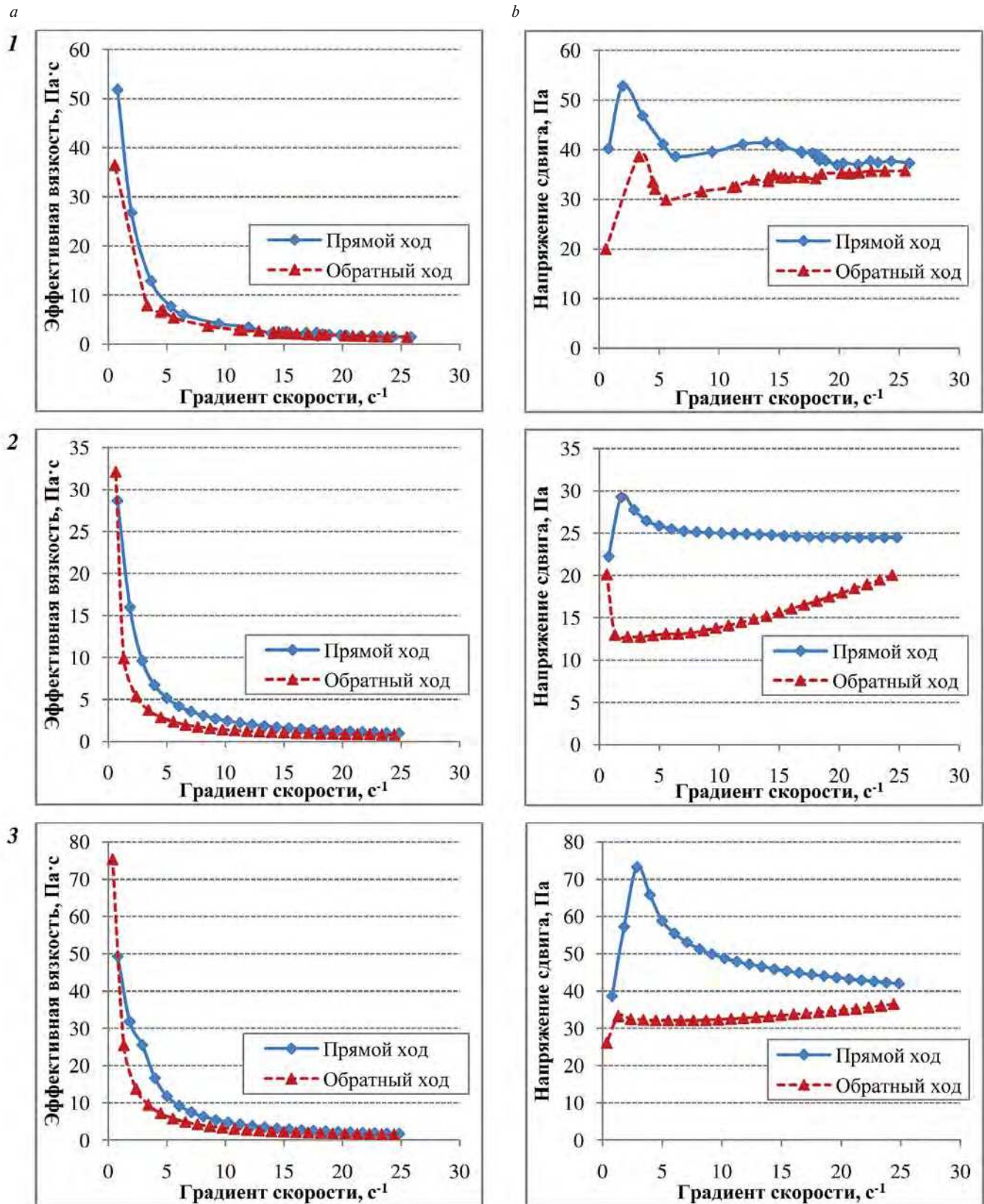


Рис. 2. Реограммы равноподвижных формовочных смесей на КГВ: 1 – КГВ без добавок, В/В=0,55; 2 – КГВ+СП MAPF SU 84 – 0,3%, В/В=0,33; 3 – КГВ+ MAPF Forbo-Crete S 010 – 0,07%, В/В=0,58; а – зависимость эффективной вязкости от градиента скорости сдвига; б – зависимость напряжения сдвига от градиента скорости сдвига

Fig. 2. Rheogram of equidistant molding sands on composite gypsum binders (CGB): 1 – CGB without additives, water/binder ratio = 0.55; 2 – CGB + SP MAPF SU 84 – 0.3%, water/binder ratio = 0.33; 3 – CGB + MAPF Forbo-Crete S 010 – 0.07%, water/binder ratio = 0.58; a – the dependence of the effective viscosity on the shear rate gradient; b – the dependence of the shear stress on the shear rate gradient

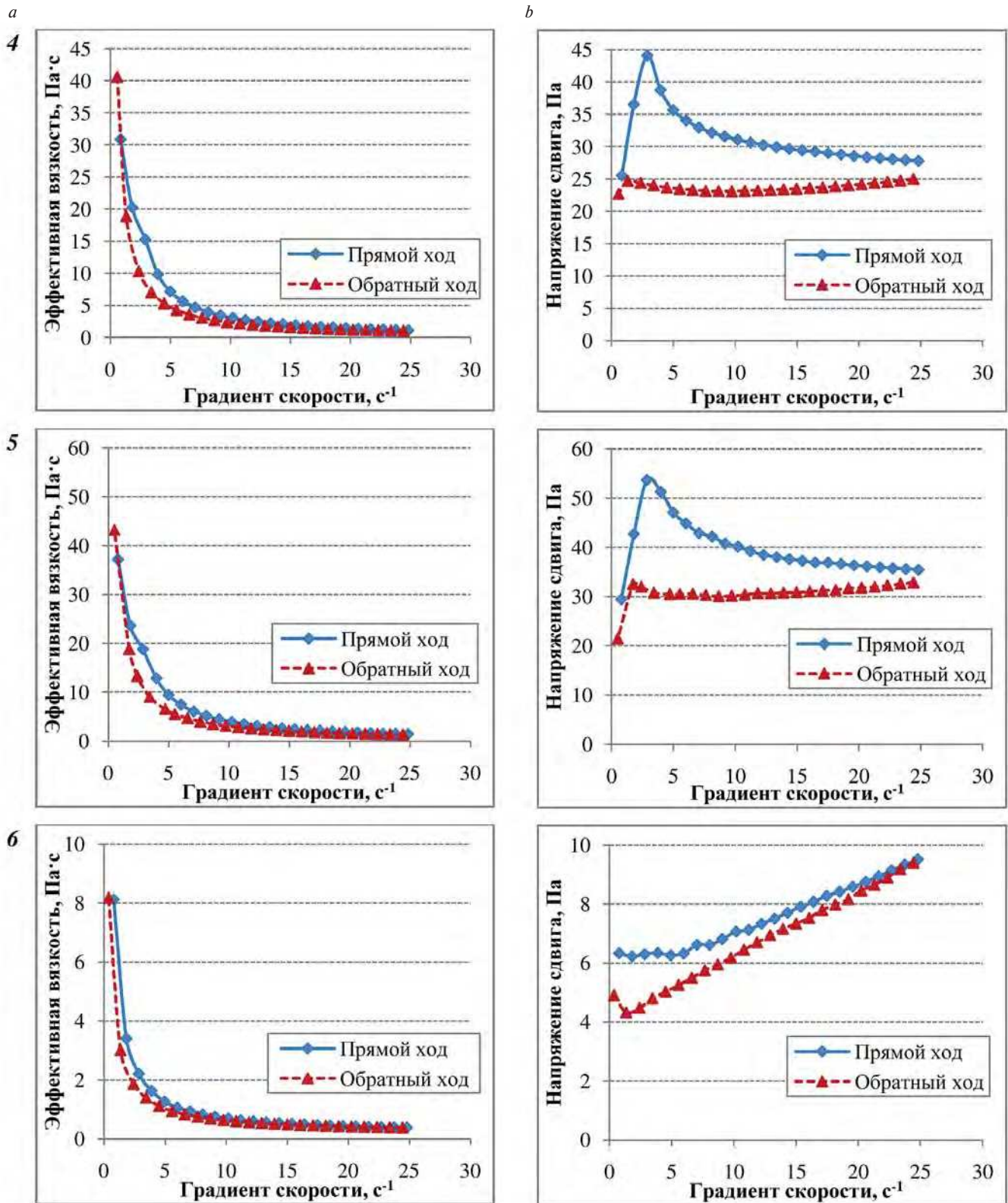


Рис. 3. Реограммы равноподвижных формовочных смесей на КГВ: 4 – КГВ+ MAPF № T10, В/В=0,59; 5 – КГВ+КМЦ, В/В=0,58; 6 – КГВ+MAPF SU 84+ MAPF Forbo-Crete S 010 +MAPF № T10+КМЦ, В/В=0,4; а – зависимость эффективной вязкости от градиента скорости сдвига; б – зависимость напряжения сдвига от градиента скорости сдвига

Fig. 3. Rheogram of equidistant molding sands on composite gypsum binders (CGB): 4 – CGB MAPF No.T10, water/binder ratio = 0.59; 5 – CGB + carboxymethylcellulose (CMC), water/binder ratio = 0.58; 6 – CGB + MAPF SU 84+ MAPF Forbo-Crete S 010 + MAPF No.T10 + CMC, water/binder ratio = 0.4; а – the dependence of the effective viscosity on the shear rate gradient; б – the dependence of the shear stress on the shear rate gradient

ный раствор вводили предварительно приготовленное КГВ (с органоминеральными добавками) и КМЦ для придания формовочной смеси требуемой вязкости и пластичности.

Послойный синтез модельных конструкций формовочной смесью осуществляли на экспериментальном лабораторном 3D-принтере, который состоит из передвигающейся платформы, миксера, бункера, формирующей головки со сменными насадками, вибратора и пульта управления (рис. 1).

В процессе экструдирования фиксировали подвижность формовочной смеси, ее сроки схватывания. Предел прочности при сжатии затвердевших формовочных смесей определяли на образцах-кубах с ребром 7,07 см. В табл. 1 представлены показатели свойств разработанного состава формовочной смеси на КГВ без заполнителя с комплексом органических добавок.

Оценку реологических свойств формовочных смесей с комплексом рассмотренных выше органических добавок на КГВ без заполнителя (рис. 2, 3) и с кварцевым песком в качестве мелкого заполнителя (рис. 4) осуществляли с помощью вискозиметра «RHEOTEST RN 4.1». Изучали напряжение сдвига, вязкость, градиент скорости сдвига при температуре окружающего воздуха 24°C.

Специальная формовочная смесь на КГВ без заполнителя (табл. 2, состав 1) отличается ярко выраженными свойствами тиксотропного нелинейного вязкопластического тела со снижением эффективной вязкости (η) до минимального значения при увеличении градиента скорости сдвига (γ) (рис. 2, 1). Реограмма формовочной смеси в координатах «напряжение сдвига – градиент скорости сдвига» в данных условиях имеет резко выраженный пик в начальной области начиная с величины сдвигового напряжения 40,18 Па и вязкости 51,74 Па·с, свидетельствующий о повышенном предельном напряжении сдвига, при котором начинается течение. С одной стороны, это является положительным для фиксации структуры напечатанного слоя конструкции, а с другой – существенно усложняет подачу смеси в формирующее устройство. При достижении значения градиента скорости сдвига 11,97 с⁻¹ наблюдается снижение значений вязкости до 3,43 Па·с (первоначальная структура разрушается) и затем следует участок вязкого течения.

Обратная ветвь исследуемой реограммы практически идентична прямой ветви. Формовочная смесь на КГВ без заполнителя подвергается тиксотропному разжижению, а при снятии внешних воздействий восстанавливает свою структуру.

При введении в формовочную смесь СП MAPF SU 84 (табл. 2, состав 2) значения реологических характеристик смеси изменяются. Формовочная смесь (рис. 2, 2) обладает в 1,8 раза меньшей вязкостью (28,67 Па·с) и предельным напряжением сдвига (22,24 Па), при котором происходит разрушение первоначальной структуры по сравнению с аналогичным показателем у бездобавочного состава. При этом в 1,7 раза снижается В/В отношение, что способствует уменьшению усадки и повышению прочности.

Обратная ветвь реограммы формовочной смеси с СП практически идентична прямой и отличается снижением показателей напряжения сдвига до 22 Па и вязкости – до 3 с⁻¹, что способствует снижению нагрузки на электродвигатель бетонного смесителя и 3D-принтера.

Введение в формовочную гипсоцементную смесь стабилизатора MAPF Forbo-Crete S 010 (табл. 2, состав 3) позволяет контролировать реологию смеси без потери удобоукладываемости и способствует ее сопротивлению к расслоению (рис. 2, 3). При приложении напряжения сдвига вязкость системы резко падает, а при прекращении воздействия силы – восстанавливается. Гидратируясь в водной фазе смеси и модифицируя воду, добавка MAPF Forbo-Crete S 010 способствует стабилизации вязкости смеси и снижению трения между ее частицами, что хорошо для повышения ее пригодности при экструдировании.

Для улучшения реологических свойств (вязкости, противодействию расслоения) смесей на КГВ применяли добавку MAPF №Т10 (табл. 2, состав 4), обладающую выраженным тиксотропным эффектом загущения и снижающую водопоглощение (рис. 3, 4), а также дополнительно вводили добавку КМЦ (табл. 2, состав 5; рис. 3, 5). Было установлено, что характер течения исследуемых формовочных смесей аналогичен, однако в смеси с MAPF №Т10 наблюдается меньшее значения вязкости. Поскольку у КМЦ хорошее пленкообразование (пленка хорошо удерживается на частицах), значительно снижается тре-

Таблица 2
Table 2

Составы формовочных смесей на КГВ с модифицирующими добавками
Compositions of molding sands on CGB with modifying additives

Состав	СП	СТ	ЗГ	КМЦ	В/В	Расплав мини-конуса, мм
1	–	–	–	–	0,55	79
2	0,3	–	–	–	0,33	83
3	–	0,07	–	–	0,58	80
4	–	–	0,1	–	0,59	80
5	–	–	–	2	0,58	79
6	0,3	0,07	0,1	2	0,4	80

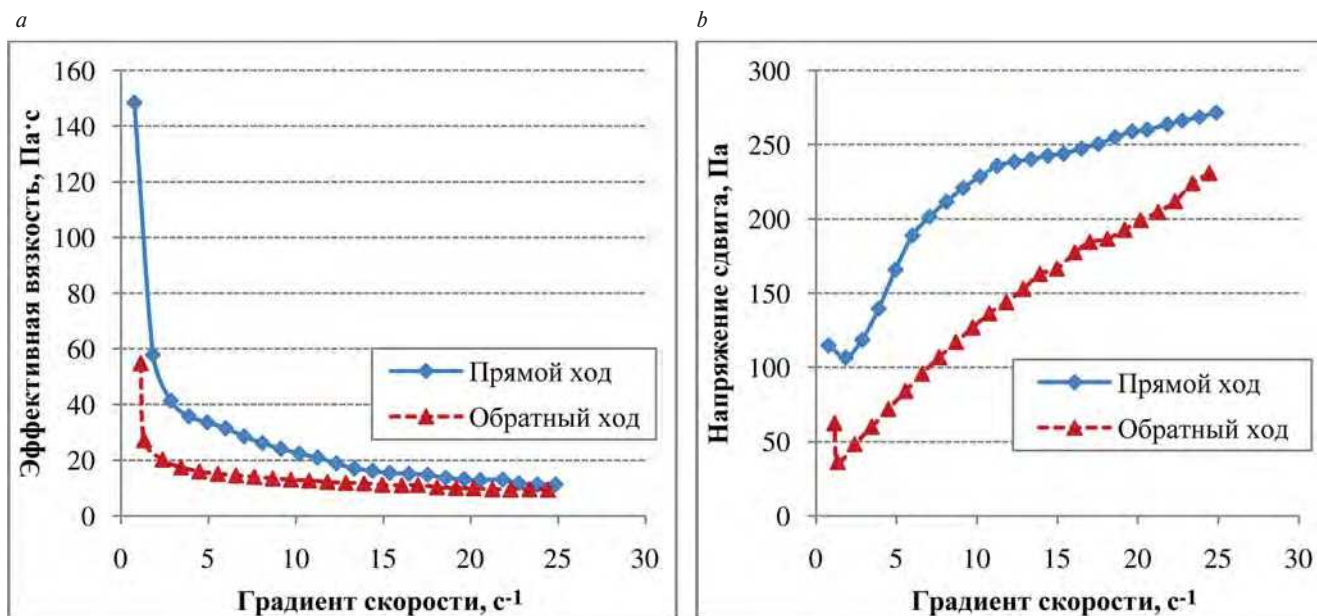


Рис. 4. Реограмма мелкозернистой формовочной смеси на КГВ с комплексом органических добавок: а – зависимость эффективной вязкости от градиента скорости сдвига; б – зависимость напряжения сдвига от градиента скорости сдвига

Fig. 4. Rheogram of fine-grained molding sand on CGB with a complex of organic additives: а – the dependence of the effective viscosity on the shear rate gradient; б – the dependence of the shear stress on the shear rate gradient

Таблица 3
Table 3

Состав и свойства мелкозернистой формовочной смеси на КГВ
Composition and properties of fine-grained molding sand on CGB

КГВ:песок	В/В	Сроки схватывания, мин-с		R _{сж} , МПа, в сроки			
		Начало	Конец	2 ч	1 сут	7 сут	28 сут
1:2	0,47	36-00	40-00	3,2	5,6	11,8	13,6

Таблица 4
Table 4

Зерновой состав кварцевого песка
Grain composition of quartz sand

№	Фракция, мм	Фракционный состав, мас. %
1	2,5–5	–
2	1,25–2,5	1
3	0,63–1,25	3
4	0,315–0,63	49
5	0,14–0,315	47
6	Модуль крупности	1,6

ние между частицами, это способствует ее хорошему продавливанию и формоустойчивости. Эти составы восстанавливают свою структуру при снятии внешних воздействий. Обратные ветви реограмм исследуемых формовочных смесей практически идентичны прямой. В основном они имеют достаточно высокую степень структурированности, что может создавать предпосылки для достижения хорошей фиксирующей способности у растворов на их основе.

Формовочная смесь с комплексом органических добавок (табл. 2, состав б) имеет наименьшую вязкость, предельное напряжение сдвига (начало течения) и структурированность системы КГВ–вода во всем рассмотренном диапазоне градиентов скорости сдвига, что создает потенциал по снижению В/В отношения и соответственно по повышению прочности (рис. 3, б).

Наблюдается синергетический эффект как результат совместного действия применяемых органических добавок, существенно превышающий сумму действий каждой из них. Это позволило получить оптимальное соотношение свойств формовочной смеси на всех этапах цикла: питание формующего устройства, нагнетание смеси и прохождение через наиболее узкое сечение экструдера (сопла), первичная фиксация структуры свежотформованного слоя.

Низкий зазор между прямой и обратной ветвями реограммы (малая площадь петли гистерезиса) свидетельствует о возможности быстрого восстановления структуры, что и требуется для специальных формовочных смесей, используемых в строительных 3D-технологиях с целью быстрой фиксации выдавливаемого слоя. Отсутствие пика на прямой ветви реограммы является положительным с точки зрения питания формующего устройства.

Подобные смеси на КГВ способствуют снижению нагрузки на электродвигатель бетонного смесителя и 3D-принтера и в наибольшей степени подходят для приготовления мелкозернистой формовочной смеси.

В случае использования формовочной смеси на КГВ с кварцевым песком в качестве мелкого заполнителя и с комплексом рассмотренных органических добавок было выявлено следующее: на общем фоне закономерного повышения вязкости полученная мелко-

зернистая формовочная смесь на КГВ демонстрирует преимущество основных реологических особенностей характера течения смеси без наполнителя (рис. 4).

Формовочная смесь на основе КГВ с кварцевым песком в качестве мелкого наполнителя (табл. 3) для 3D-аддитивных технологий быстро набирает прочность, обеспечивая в ранние сроки твердения (1 сут) класс бетона по прочности при сжатии В3,5, в возрасте 7 и 28 сут – В7,5–В10 (табл. 4).

Список литературы

1. Bazhenov Y.M., Zagorodnjuk L.H., Lesovik V.S., Yerofeyeva I.V., Chernysheva N.V., Sumskey D.A. Concerning the role of mineral additives in composite binder content // *International Journal of Pharmacy and Technology*. 2016. Vol. 8. No. 4, pp. 22649–22661.
2. Пермяков М.Б., Пермяков А.Ф., Давыдова А.М. Аддитивные технологии в строительстве // *European Research*. 2017. № 1 (24). С. 4–18.
3. Ватин Н.И., Чумадова Л.И., Гончаров И.С., Зыкова В.В., Карпеня А.Н., Ким А.А., Финашенков Е.А. 3D-печать в строительстве // *Строительство уникальных зданий и сооружений*. 2017. № 1 (52). С. 27–46.
4. Лунева Д.А., Кожевникова Е.О., Калошина С.В. Применение 3D-печати в строительстве и перспективы ее развития // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура*. 2017. Т. 8. № 1. С. 90–101.
5. Пустовгар А.П., Адамцевич А.О., Волков А.А. Технология и организация аддитивного строительства // *Промышленное и гражданское строительство*. 2018. № 9. С. 12–20.
6. Иноземцев А.С., Королев Е.В., Зыонг Т.К. Анализ существующих технологических решений 3D-печати в строительстве // *Вестник МГСУ*. 2018. Т. 13. № 7 (118). С. 863–876.
7. Elistratkin M.Y., Lesovik V.S., Alfimova N.I., Shurakov I.M. The question of mix composition selection for construction 3D printing // *Materials Science Forum*. 2019. Vol. 945, pp. 218–225. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.945.218>
8. Glagolev E.S., Chernysheva N.V., Lesovik V.S., Lesnichenko E.N. Compounding features of special molding mixes for 3D printing technology. In book: *Proceedings of the International Conference Industrial and Civil Construction*. 2021, pp. 250–257. DOI: 10.1007/978-3-030-68984-1_37
9. Klyuev S.V., Klyuev A.V., Shorstova E.S. The micro silicon additive effects on the fine-grassed concrete properties for 3-D additive technologies // *Materials Science Forum*. 2019. Vol. 974, pp. 131–135. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.974.131>
10. Slavcheva G.S., Artamonova O.V., Shvedova M.A., Britvina E.A. Effect of viscosity modifiers on structure formation in cement systems for construction 3D printing

Выводы

Таким образом, выполненные исследования подтвердили возможность управления реологическими свойствами специальных формовочных смесей на КГВ за счет комбинированных функциональных и реологически активных добавок с обеспечением оптимизации их свойств под особенности различных типов формовочного оборудования и решаемых задач.

References

1. Bazhenov Y.M., Zagorodnjuk L.H., Lesovik V.S., Yerofeyeva I.V., Chernysheva N.V., Sumskey D.A. Concerning the role of mineral additives in composite binder content. *International Journal of Pharmacy and Technology*. 2016. Vol. 8. No. 4, pp. 22649–22661.
2. Permyakov M.B., Permyakov A.F., Davydova A.M. Additive technologies in construction. *European Research*. 2017. No. 1 (24), pp. 4–18. (In Russian).
3. Vatin N.I., Chumadova L.I., Goncharov I.S., Zykova V.V., Karpenya A.N., Kim A.A., Finashenkov E.A. 3D printing in construction. *Stroitel'stvo unikal'nykh zdaniy i sooruzheniy*. 2017. No. 1 (52), pp. 27–46. (In Russian).
4. Luneva D.A., Kozhevnikova E.O., Kaloshina S.V. The use of 3D printing in construction and the prospects for its development. *Vestnik of the Perm National Research Polytechnic University. Construction and architecture*. 2017. Vol. 8. No. 1, pp. 90–101. (In Russian).
5. Pustovgar A.P., Adamtsevich A.O., Volkov A.A. Technology and organization of additive construction. *Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo*. 2018. No. 9, pp. 12–20. (In Russian).
6. Inozemtsev A.S., Korolev E.V., Zyong T.K. Analysis of existing technological solutions for 3D printing in construction. *Vestnik MGSU*. 2018. Vol. 13. No. 7 (118), pp. 863–876. (In Russian).
7. Elistratkin M.Y., Lesovik V.S., Alfimova N.I., Shurakov I.M. The question of mix composition selection for construction 3D printing. *Materials Science Forum*. 2019. Vol. 945, pp. 218–225. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.945.218>
8. Glagolev E.S., Chernysheva N.V., Lesovik V.S., Lesnichenko E.N. Compounding features of special molding mixes for 3D printing technology. In book: *Proceedings of the International Conference Industrial and Civil Construction*. 2021, pp. 250–257. DOI: 10.1007/978-3-030-68984-1_37
9. Klyuev S.V., Klyuev A.V., Shorstova E.S. The micro silicon additive effects on the fine-grassed concrete properties for 3-D additive technologies. *Materials Science Forum*. 2019. Vol. 974, pp. 131–135. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.974.131>
10. Slavcheva G.S., Artamonova O.V., Shvedova M.A., Britvina E.A. Effect of viscosity modifiers on structure formation in cement systems for construction 3D printing. *Inorganic Materials*. 2021. Vol. 57 (1), pp. 94–100. <https://doi.org/10.1134/S0020168521010143>

- // *Inorganic Materials*. 2021. Vol. 57 (1), pp. 94–100. <https://doi.org/10.1134/S0020168521010143>
11. Урьев Н.Б. Динамика структурированных дисперсных систем // *Коллоидный журнал*. 1998. № 5. С. 662–683.
 12. Дребезгова М.Ю. Реологические свойства системы «композиционное гипсовое вяжущее – суперпластификатор – вода» // *Строительные материалы*. 2017. № 12. С. 68–70. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2017-755-12-68-70>
 13. Glagolev E.S., Chernysheva N.V., Drebezgova M.Y., Motorykin D.A. Rheological properties of molding mixes on composite gypsum binders for 3D-additive technologies of low-height monolithic construction // *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2021. Vol. 160, pp. 23–29. https://doi.org/10.1007/978-3-030-75182-1_4
 14. Slavcheva G., Artamonova O., Babenko D., Ibryaeva A. Effect of limestone filler dosage and granulometry on the 3D printable mixture rheology // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 972 (1). 012042. DOI: 10.1088/1757-899X/972/1/012042
 15. Славчева Г.С., Шведова М.А., Бабенко Д.С. Анализ и критериальная оценка реологического поведения смесей для строительной 3D-печати // *Строительные материалы*. 2018. № 12. С. 34–40. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2018-766-12-34-40>
 11. Uriev NB Dynamics of structured dispersed systems. *Kolloidnyy zhurnal*. 1998. No. 5, pp. 662–683. (In Russian).
 12. Drebezgova M.Yu. Rheological properties of the system «composite gypsum binder – superplasticizer – water». *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2017. No. 12, pp. 68–70. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2017-755-12-68-70>. (In Russian).
 13. Glagolev E.S., Chernysheva N.V., Drebezgova M.Y., Motorykin D.A. Rheological properties of molding mixes on composite gypsum binders for 3D-additive technologies of low-height monolithic construction. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2021. Vol. 160, pp. 23–29. https://doi.org/10.1007/978-3-030-75182-1_4
 14. Slavcheva G., Artamonova O., Babenko D., Ibryaeva A. Effect of limestone filler dosage and granulometry on the 3D printable mixture rheology. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 972 (1). 012042. DOI: 10.1088/1757-899X/972/1/012042
 15. Slavcheva G.S., Shvedova M.A., Babenko D.S. Analysis and criteria assessment of rheological behavior of mixes for construction 3-D printing. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2018. No. 12, pp. 34–40. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2018-766-12-34-40>

СПЕЦИАЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА**Энциклопедия старинных кирпичей и черепицы из собрания музея «Кирпичная библиотека»****Автор: Талпа Б.В.****Издательство Южного федерального университета, 2021. 432 с.**

Энциклопедия состоит из девяти разделов. Представлены старинные кирпичи и черепица Российской империи (42 региона), Австро-Венгерской, Британской, Византийской, Османской, Римской империй, Древнего Египта и Греции и других европейских и азиатских стран. Имеются редкие кирпичи из Карнакского храма (Египет, IV тыс. до н. э.), Московского, Казанского, Тульского, Астраханского, Ярославского, Свяжского Кремля, а также Китай-города, Помпеев, Рима, Вены, Лондона, Сиены, Ливорно, Риги, Санкт-Петербурга, Свято-Троицкой Сергиевой лавры, Валаамского, Новодевичьего монастырей, Гефсиманского Черниговского скита, крепостей Дальнего Востока, замков рыцарей Ливонского и Тевтонского орденов, Китая, Японии, Швеции, Дании, Индии, Туниса, Таиланда и др. Каждый образец кирпича и черепицы сопровождается информацией (статьей) о месте находки, производителе, сырьевой базе, технологии и времени производства, а также об исторических сооружениях, построенных из этих материалов. Прилагаются исторические

документы, картографические материалы, биографические сведения о производителях, ссылки на исторические справочники. Энциклопедия содержит более 2000 фотографий, рисунков, карт. Кирпич – один из первых инновационных материалов, созданных человеком, полностью преобразивший образ его жизни. Древние кирпичные постройки заложили основы архитектуры, культуры и технологии строительства. Кирпич позволил людям расселиться в неблагоприятных для проживания климатических условиях. Необходимость в качественном керамическом сырье заложила первые знания о геологическом строении, минералогических особенностях и технологических свойствах глинистых пород. Энциклопедия предназначена для широкого круга специалистов в области керамической промышленности, строительства и архитектуры, наук о Земле, истории и археологии, коллекционеров, молодых ученых, аспирантов, студентов и школьников старших классов.

Энциклопедия реализуется по предварительному заказу. Возможна доставка по почте (добавляется стоимость почтовых расходов). Заказ высылать на электронную почту talpabv@gmail.com, по телефону или WhatsApp +7-928-188-41-41, Талпа Борис Васильевич. Тираж ограничен.

УДК 666.973

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-794-8-53-59>

Н.П. ЛУКУТЦОВА¹, д-р техн. наук (natluk58@mail.ru),
 А.А. ПЫКИН¹, канд. техн. наук (alexem87@yandex.ru),
 Г.Н. СОБОЛЕВА¹, канд. техн. наук (soboleva.g.n@mail.ru);
 Н.В. ЗОЛОТУХИНА², инженер (аспирант) (nvm-proekt@mail.ru);
 А.А. ОБЫДЕННАЯ¹, студентка (anya.obydennaya@mail.ru)

¹ Брянский государственный инженерно-технологический университет (241037, г. Брянск, пр-т Станке Димитрова, 3)

² Бендерский политехнический филиал государственного образовательного учреждения «Приднестровский государственный университет им. Т.Г. Шевченко» (3200, Молдавская Республика, г. Бендеры, ул. Бендерского Восстания, 7)

Композиционный наполнитель для легких бетонов с использованием хризотилцементных и золошлаковых отходов

Разработан состав и исследованы физико-механические свойства композиционного наполнителя (КЗ) со структурой типа ядро-оболочка для легких бетонов с использованием хризотилцементного шлама (ХЦШ) и золошлаковой смеси (ЗШС) тепловой электростанции. Представлен способ изготовления КЗ, включающий гранулирование ядра из ХЦШ влажностью 50–60%, формирование оболочки на поверхности ядра путем опудривания его в сухой смеси с удельной поверхностью частиц 320–340 м²/кг, приготовленной совместным помолом портландцемента, кислой ЗШС и предварительно высушенного хризотилцементного шлама при температуре 110°C, тепловлажностную обработку готовых гранул. Построены математические модели зависимости насыпной плотности и прочности при сжатии композиционного наполнителя от количественного соотношения компонентов смеси для опудривания ядра и влажности ХЦШ. Предложен рациональный состав, позволяющий получать композиционный наполнитель для легких бетонов с насыпной плотностью до 380 кг/м³, теплопроводностью до 0,09 Вт/(м·°C), прочностью при сжатии до 3 МПа, водопоглощением 30 мас. %. Обоснована возможность утилизации хризотилцементных и золошлаковых отходов в производстве эффективных и экологически безопасных наполнителей для бетонов с низкой насыпной плотностью и теплопроводностью.

Ключевые слова: хризотилцементный шлам, золошлаковая смесь, композиционный наполнитель для легких бетонов, гранулирование, опудривание, состав, физико-механические свойства.

Для цитирования: Лукутцова Н.П., Пыкин А.А., Соболева Г.Н., Золотухина Н.В., Обыденная А.А. Композиционный наполнитель для легких бетонов с использованием хризотилцементных и золошлаковых отходов // *Строительные материалы*. 2021. № 8. С. 53–59. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-794-8-53-59>

N.P. LUKUTTSOVA¹, Doctor of Sciences (Engineering) (natluk58@mail.ru), A.A. PYKIN¹, Candidate of Sciences (Engineering) (alexem87@yandex.ru), G.N. SOBOLEVA¹, Candidate of Sciences (Engineering) (soboleva.g.n@mail.ru); N.V. ZOLOTUKHINA², Graduate student (nvm-proekt@mail.ru); A.A. OBYDENNAYA¹, Student

¹ Bryansk state engineering-technological university (3, Stanke Dimitrova Avenue, Bryansk, 241037, Russian Federation)

² Bendery Polytechnic Branch of the State Educational Institution «Pridnestrovian State University named after T.G. Shevchenko» (7, Bendery Uprising Street, Bendery, 3200, Moldavian Republic)

Composite Aggregate for Lightweight Concrete Using Chrysotile Cement and Ash and Slag Waste

The composition has been developed and the physical and mechanical properties of a composite aggregate (CA) with a «core-shell» structure for lightweight concrete using chrysotile cement slurry (CCS) and ash and slag mixture (ASM) of a thermal power plant have been developed. A method for the manufacture of CA is presented, including the granulation of a core from CCS with a moisture content of 50–60%, the formation of a shell on the surface of the core by dusting it in a dry mixture with a specific surface area of particles of 320–340 м²/kg, prepared by joint grinding of Portland cement, acidic ash and slag mixture and pre-dried chrysotile cement slurry at a temperature of 110°C, heat and moisture treatment of finished granules. Mathematical models of the dependence of the bulk density and compressive strength of the CA on the quantitative ratio of the components of the mixture for dusting the core and the moisture content of the CCS have been constructed. A rational composition has been proposed that makes it possible to obtain a composite aggregate for lightweight concrete with a bulk density of up to 380 kg/m³, thermal conductivity up to 0.09 W/(m·°C), compressive strength up to 3 MPa, and water absorption by weight of 30%. The possibility of utilization of chrysotile-cement and ash and slag waste in the production of efficient and environmentally friendly aggregates for concrete with low bulk density and thermal conductivity has been substantiated.

Keywords: chrysotile cement slurry, ash and slag mixture, composite aggregate for lightweight concrete, granulation, dusting, composition, physical and mechanical properties.

For citation: Lukutsova N.P., Pykin A.A., Soboleva G.N., Zolotukhina N.V., Obydennaya A.A. Composite aggregate for lightweight concrete using chrysotile cement and ash and slag waste. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2021. No. 8, pp. 53–59. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-794-8-53-59>

Современные тенденции развития строительного материаловедения связаны с необходимостью разработки новых ресурсосберегающих технологий получения эффективных и экологически безопасных ма-

териалов, в том числе наполнителей для цементных бетонов, с использованием различных промышленных отходов [1]. В данном направлении большой научно-практический интерес представляет утилиза-

ция хризотилцементных отходов (ХЦО), состоящих из продуктов гидратации минералов портландцементного клинкера, включая гидроксид кальция и мелкие волокна хризотила [2–6].

Хризотил (белый асбест) (по ГОСТ 12871–2013 «Хризотил. Общие технические условия») представляет собой волокнистый минерал группы серпентина ($Mg_3[Si_2O_5](OH)_4$), который способен расщепляться на тончайшие длинные волокна диаметром до 0,5 мкм [7, 8].

По сравнению с запрещенными к применению кислотостойкими амфиболовыми асбестами (актинолитом, амозитом, антофиллитом и др.) хризотил является щелочестойким гидросиликатом магния, который под воздействием кислой среды человеческого организма разрушается и выводится из него [9, 10].

В настоящее время мировое производство хризотила превышает 2 млн т/г. Более 90% его идет на изготовление хризотилцементных строительных изделий (плоских и волнистых прессованных листов, кровельных и стеновых панелей, перегородок зданий и сооружений, фасадных и облицовочных плит, напорных и безнапорных труб и др.). Общий объем выпуска данных изделий составляет свыше 10 млн т/г. При этом Россия является ведущей страной по добыче и переработке хризотила [11].

Тем не менее хризотилцементная промышленность сопровождается негативным экологическим эффектом, связанным с образованием специфических отходов (шлама, рекуперационной воды, влажных и сухих обрезков изделий и др.), утилизация которых, в частности для получения цементных систем, затруднена ввиду их низкой гидравлической активности.

Анализ многочисленных исследований показывает, что повышение вяжущих свойств ХЦО достигается механическим, термическим, химическим и смешанным видами активации [12, 13].

Известно, что тонкое измельчение ХЦО приводит к нарушению гидратных пленок и обнажению клинкерного фонда, а высушивание и обжиг способствуют увеличению количества гидратируемых соединений. При введении активных минеральных добавок (трепела, микрокремнезема, золошлаковых отходов и др.) могут образоваться низкоосновные гидросиликаты кальция за счет реакции пуццоланизации [14, 15].

Цель данной работы заключается в разработке композиционного заполнителя (КЗ) для легких бетонов с низкой насыпной плотностью и теплопроводностью с использованием хризотилцементного шлама (ХЦШ) и золошлаковой смеси (ЗШС) тепловой электростанции.

Материалы и методы исследования

В качестве сырьевых компонентов для получения КЗ применялись:

– портландцемент (ПЦ) ЦЕМ I 42,5Н по ГОСТ 31108–2020 (АО «Мальцовский портландцемент») химического состава, мас. %: CaO – 65,8;

SiO₂ – 21,8; Al₂O₃ – 4,9; Fe₂O₃ – 4,3; MgO – 0,9; SO₃ – 0,8; (Na₂O+K₂O) – 0,66; минерального состава, мас. %: C₃S – 68,6; C₂S – 7,4; C₃A – 6,4; C₄AF – 12,7; удельной поверхности – 370 м²/кг; нормальной плотности цементного теста – 24%; активности – 51 МПа;

– хризотилцементный шлам (4-й класс, малоопасный в соответствии с Федеральным классификационным каталогом отходов) в виде пастообразной массы влажностью 50–60% с содержанием до 20% волокон хризотила диаметром 15–40 мкм, длиной 1350–4800 мкм (Брянская область);

– золошлаковая смесь (4-й класс, малоопасная) от сжигания антрацита и тощего каменного угля при совместном гидроудалении золы-уноса и шлака с содержанием зольной составляющей более 85% (ЗАО «Молдавская ГРЭС», г. Днестровск, Приднестровье).

При проведении исследования химический состав усредненных проб ХЦШ и ЗШС определялся с помощью рентгенофлуоресцентной спектроскопии (РФС) на приборе ARL OPTIM'X (США); минеральный состав ХЦШ – рентгенофазовым анализом (РФА) на дифрактометре ARL X'TRA (США).

Гранулометрический состав ЗШС анализировался методом лазерной гранулометрии на приборе Analysette 22 NanoTec Plus (Германия).

Морфология частиц ЗШС изучалась методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) на микроскопе TESCAN MIRA 3 LMU (Чехия).

Насыпная плотность, прочность при сжатии (при сдавливании в цилиндре), водопоглощение по массе композиционного заполнителя определялись по ГОСТ 9758–2012 «Заполнители пористые неорганические для строительных работ. Методы испытаний», а его теплопроводность (в засыпке) – на приборе ИТП-МГ4 при стационарном тепловом режиме по ГОСТ 7076–99 «Материалы и изделия строительные. Метод определения теплопроводности и термического сопротивления при стационарном тепловом режиме».

Результаты исследования

Изготовление КЗ в виде гранул диаметром 10–20 мм со структурой типа ядро–оболочка осуществлялось способом, включающим следующие этапы:

– гранулирование ядра из ХЦШ влажностью 50–60%;

– формирование оболочки на поверхности ядра путем опудривания его в сухой смеси с удельной поверхностью частиц 320–340 м²/кг, приготовленной совместным помолотом в шаровой мельнице портландцемента, ЗШС (добавки-заменителя части ПЦ) и предварительно высушенного ХЦШ при температуре 110°C;

– тепловлажностная обработка гранул в пропарочной камере КПУ-1М при температуре изотермической выдержки 85°C по режиму (1,5+3+1,5 ч).

Таблица 1
Table 1

Химический состав сырьевых компонентов для получения композиционного заполнителя
Chemical composition of raw materials for obtaining composite aggregate

Компо- нент	Содержание оксидов, мас. %									
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	SO ₃	Прочие
ХЦШ	21,4	4	5,6	47,4	5,6	–	–	–	4,2	11,8
ЗШС	49,3	23,7	10,6	2,4	1,3	0,8	3,3	0,9	0,3	7,4



Рис. 1. Гранулы композиционного заполнителя

Fig. 1. Composite aggregate granules

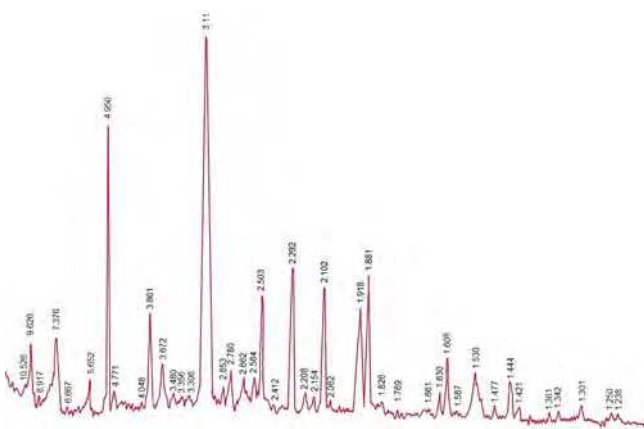


Рис. 2. Рентгенограмма хризотилцементного шлама
Fig. 2. X-ray diffraction pattern of chrysotile cement slurry

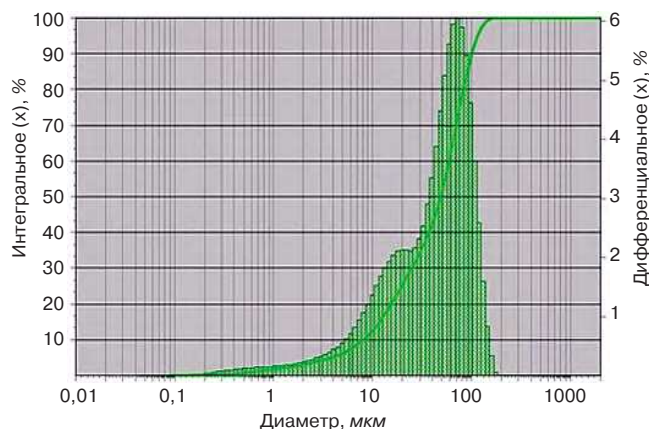


Рис. 3. Гистограмма распределения частиц золошлаковой смеси по размерам
Fig. 3. Particle distribution histogram of ash and slag mixture by size

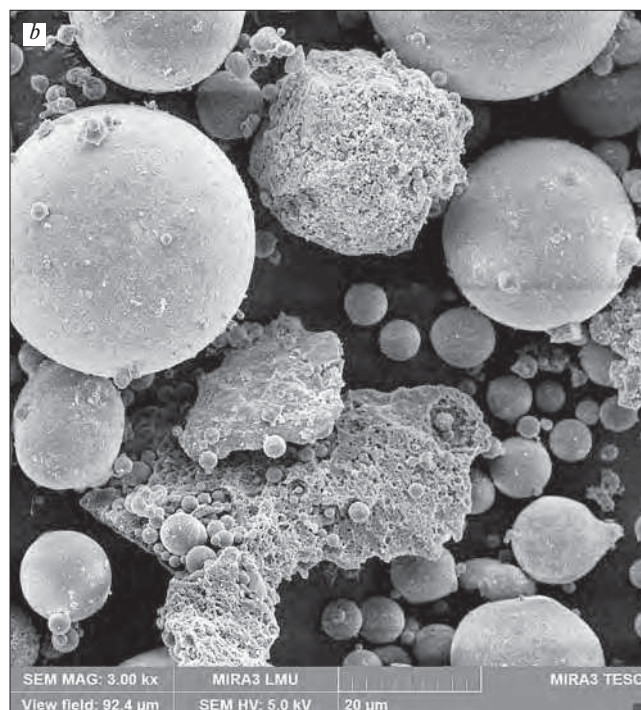
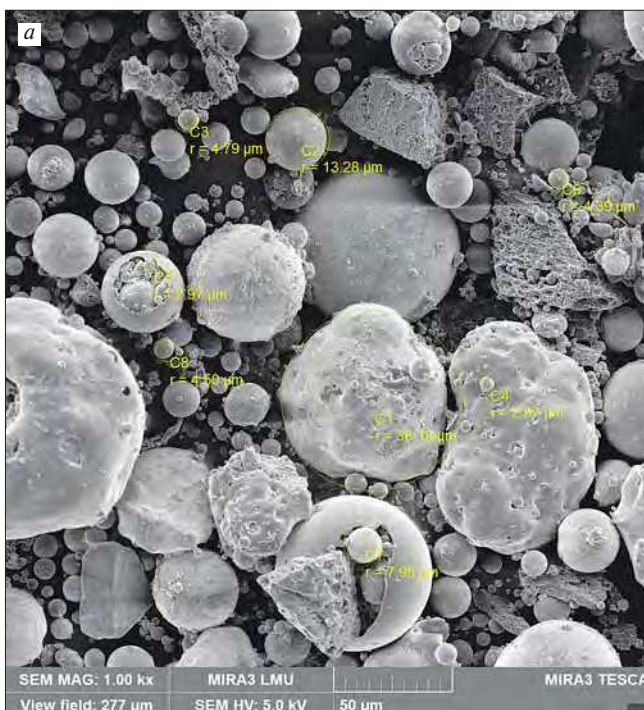


Рис. 4. Микрофотографии золошлаковой смеси: а – увеличение 1000×; б – увеличение 3000×
Fig. 4. Micrographs of ash and slag mixture: a – an increase of 1000×; b – an increase of 3000×

Гранулирование и опудривание ядра заполнителя (рис. 1) проводилось в лабораторном тарельчатом грануляторе в течение 5 мин при скорости его вращения 11 об/мин и угле наклона 45°.

Результаты РФА показали, что минеральный состав хризотилцементного шлама представлен содержанием 20% хризотила, 80% продуктов гидратации и карбони-

зации клинкерных минералов. На рентгенограмме ХЦШ (рис. 2) имеются дифракционные максимумы со значениями межплоскостных расстояний (d, нм), соответствующие порландиту Ca(OH)₂ (0,495, 0,311, 0,266, 0,192, 0,177), кальциту CaCO₃ (0,386, 0,304, 0,250, 0,229, 0,188), гидросульфалюминату кальция типа этрингита Ca₆Al₂(OH)₁₂·(SO₄)₃·26H₂O (0,963,

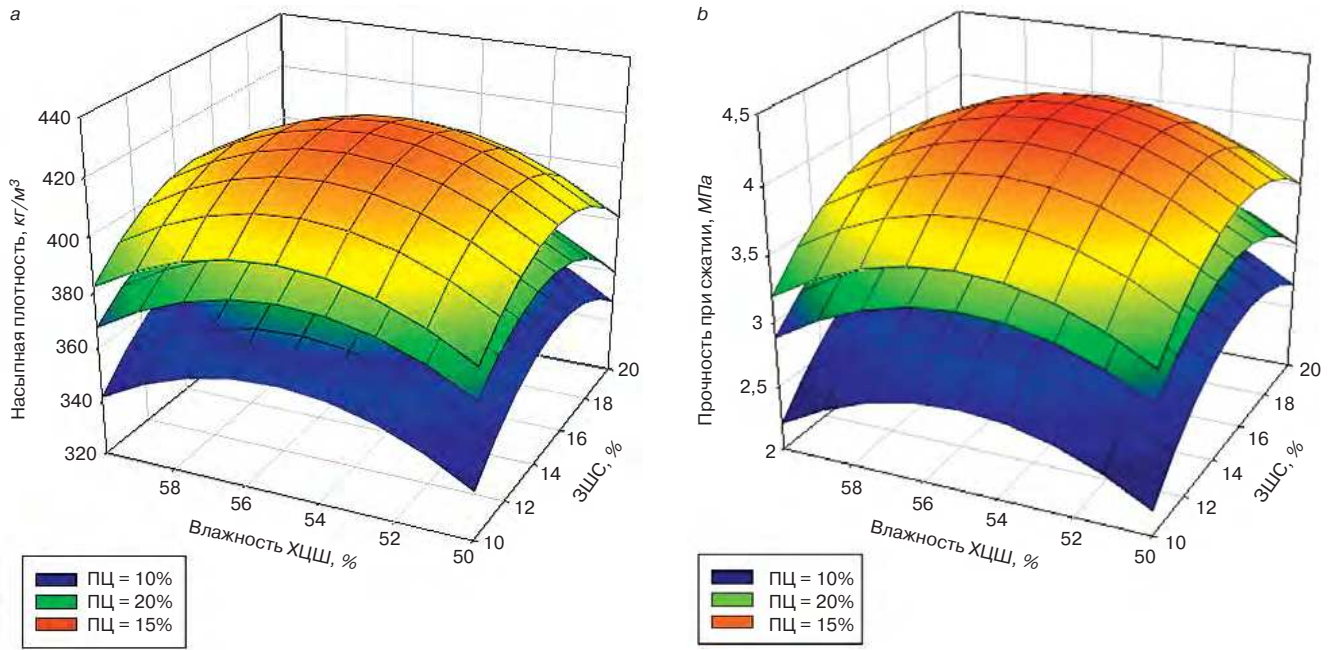


Рис. 5. Номограммы отклика насыпной плотности (а) и прочности при сжатии (b) композиционного заполнителя от количественного соотношения компонентов смеси для опудривания ядра и влажности хризотилцементного шлама

Fig. 5. Nomograms of the response of the bulk density (a) and compressive strength (b) of the composite aggregate from the quantitative ratio of the components of the mixture for powdering the core and moisture content of chrysotile cement slurry

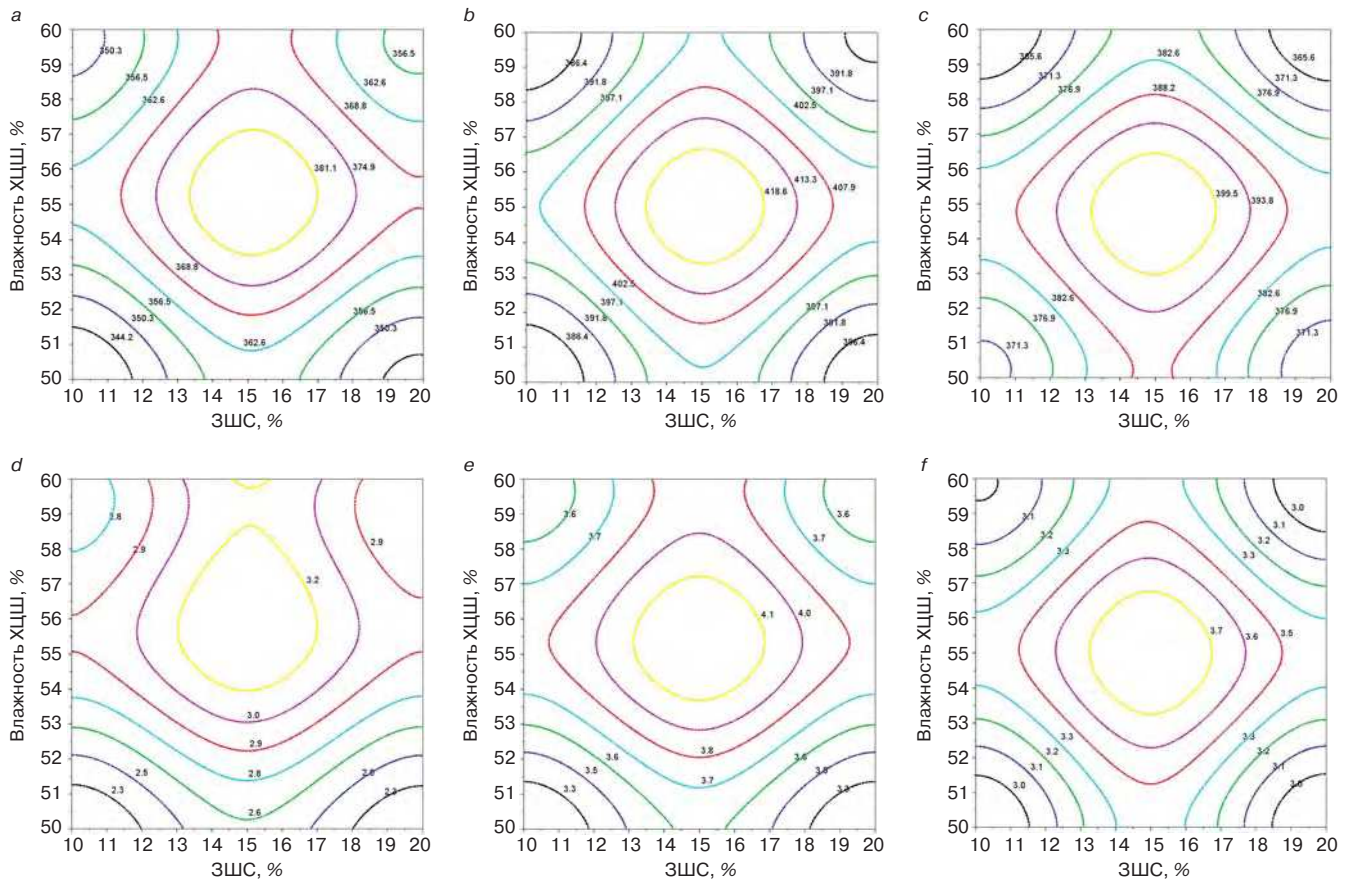


Рис. 6. Графики интерполирования насыпной плотности (а–с) и прочности при сжатии (d–f) композиционного заполнителя

Fig. 6. Graphs of interpolation of bulk density (a–c) and compressive strength (d–f) of composite aggregate

Таблица 2
Table 2Состав и физико-механические свойства композиционного заполнителя
Composition and physical and mechanical properties of composite aggregate

Количественное соотношение компонентов, мас. %			Ядро	Влажность ХЦШ для получения ядра, %	Насыпная плотность, кг/м ³	Прочность при сжатии, МПа	Водопоглощение, мас. %	Теплопроводность, Вт/(м·°С)
Оболочка		Исходный ХЦШ						
Высушенный ХЦШ	ПЦ		ЗШС					
45	4,3	0,7	50	55	380	3	30	0,09
42,5	6,4	1,1	50	55	424	4,2	22	0,12
40	8,5	1,5	50	55	405	3,8	28	0,11

0,565, 0,348, 0,256, 0,221) и хризотилу $Mg_3[Si_2O_5] \cdot (OH)_4$ (0,738, 0,367, 0,241, 0,153, 0,13).

Методом РФС установлено, что в ХЦШ содержатся преимущественно оксиды кальция и кремния (CaO и SiO_2), суммарное количество которых превышает 68% (табл. 1).

По данным химического анализа золошлаковой смеси (табл. 1) рассчитано, что модуль основности ЗШС составляет 0,1; силикатный модуль – 1,4, а коэффициент качества (гидравлическая активность) – 0,5. При этом по содержанию оксида кальция (2,4%) и модулю основности (менее 1) ЗШС относится к кислой (по ГОСТ 25592–2019 «Смеси золошлаковые тепловых электростанций для бетонов. Технические условия»), способной проявлять пуццолановые свойства, а по удельной поверхности ($170 \text{ м}^2/\text{кг}$) – к среднedisперсной.

Гранулометрический состав ЗШС характеризуется одномодальным распределением частиц по размерам в диапазоне от 0,13 до 196 мкм со средним диаметром 72 мкм. На долю частиц размерами от 0,13 до 1 мкм приходится 1,8%; от 1 до 10 мкм – 11,5%; от 10 до 100 мкм – 79,1%; от 100 до 196 мкм – 7,6% (рис. 3).

Методом СЭМ выявлено, что основная масса ЗШС представлена полидисперсными сферическими частицами золы-уноса с гладкой остеклованной поверхностью, а также шлаковыми частицами губчатой структуры (рис. 4).

Разработка состава КЗ выполнялась методами ортогонального центрального композиционного планирования (программные обеспечения Urofy, Excel, Sigma Plot) и прямого интерполирования (программа Extr.sce для экстремального моделирования экспериментальных данных на базе Scilab [16]) с построением математических моделей зависимости насыпной плотности ($y_1 - \rho_n$) и прочности при сжатии ($y_2 - R_{сж}$) заполнителя от варьируемых факторов: x_1 – количество портландцемента (10–20% от общей массы смеси для опудривания ядра); x_2 – содержание золошлаковой смеси (10–20% от массы ПЦ); x_3 – влажность хризотилцементного шлама (50–60%).

Функции отклика значений ρ_n , $R_{сж}$ композиционного заполнителя от заданных факторов представлены уравнениями регрессии:

$$y_1 = 423,6 + 9,4 \cdot x_1 + 0,7 \cdot x_2 + 1,14 \cdot x_3 - 27,6 \cdot x_1^2 - 20,9 \cdot x_2^2 - 20,2 \cdot x_3^2 - 5 \cdot x_1 \cdot x_2 - 1,5 \cdot x_1 \cdot x_3 - 0,8 \cdot x_2 \cdot x_3, \quad (1)$$

$$y_2 = 4,2 + 0,3 \cdot x_1 + 0,2 \cdot x_2 - 0,7 \cdot x_1^2 - 0,5 \cdot x_2^2 - 0,4 \cdot x_3^2 - 0,1 \cdot x_1 \cdot x_2. \quad (2)$$

Полученные полиномиальные модели содержат значимые (по критерию Стьюдента) коэффициенты и адекватны (по критерию Фишера) с доверительной вероятностью 95%.

Из уравнений (1, 2), номограмм отклика (рис. 5) и графиков интерполирования значений ρ_n , $R_{сж}$ (рис. 6) следует, что для получения заполнителя с низкой насыпной плотностью наиболее рациональным является состав, включающий 10% ПЦ (от массы смеси для опудривания ядра) и 15% ЗШС (от массы портландцемента) при влажности ХЦШ 55%.

Анализ фактических значений физико-механических свойств КЗ (табл. 2) показал, что при установленном рациональном составе его насыпная плотность равна 380 кг/м^3 ; прочность при сжатии 3 МПа; водопоглощение 30 мас.%; теплопроводность $0,09 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°С)}$.

Повышение количества портландцемента в составе сухой смеси для оболочки от 10 до 20% нецелесообразно, поскольку приводит к повышению насыпной плотности (до 424 кг/м^3) и теплопроводности (до $0,12 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°С)}$) композита.

Выводы

Экспериментально обоснована возможность получения эффективного и экологически безопасного композиционного заполнителя со структурной оболочкой для легких бетонов, изготовленного гранулированием ядра из хризотилцементного шлама и формированием оболочки на поверхности ядра путем опудривания его в сухой смеси совместного помола портландцемента, кислой золошлаковой смеси тепловой электростанции и предварительно высушенного хризотилцементного шлама. Методами ортогонального центрального композиционного планирования и прямого интерполирования установлен рациональный состав композиционного заполнителя с насыпной плотностью до 380 кг/м^3 , теплопроводностью до $0,09 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°С)}$, прочностью при сжатии до 3 МПа.

Список литературы

1. Davydov S.Y., Apakashev R.A., Valiev N.G., Kozhushko G.G. Chrysotile asbestos: raw materials for the construction industry from deep quarries // *Refractories and Industrial Ceramics*. 2020. Vol. 61, pp. 249–252. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11148-020-00466-4>
2. Хозин В.Г., Хританков В.Ф., Пичугин А.П. Роль стройиндустрии в становлении циркулярной экономики промышленных регионов России // *Строительные материалы*. 2021. № 1–2. С. 6–12. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-788-1-2-6-12>
3. Умаров Т.Ю., Раззоков С.З. Регенерация хризотил-асбеста из техногенных отходов хризотилцементной промышленности // *Строительные материалы*. 2021. № 3. С. 52–56. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-789-3-52-56>
4. Щеткова Е.А., Севастьянов Р.В. Хризотил как оптимальный армирующий агент для фибробетонов // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура*. 2015. № 2. С. 174–191. DOI: <https://doi.org/10.15593/2224-9826/2015.2.12>
5. Плигина А.И., Семенов В.С., Егорова Л.В., Асхадуллин А.А. Применение хризотилцементных отходов в производстве железобетонных изделий // *Научное обозрение*. 2015. № 10–2. С. 84–88.
6. Козлов В.В., Попов К.Н., Межов А.Г., Лиляк А.П. Пути использования отходов хризотилцементного производства // *Вестник МГСУ*. 2011. № 1–2. С. 284–287.
7. Яковлев Г.И., Дрохитка Р., Первушин Г.Н., Грахов В.П., Саидова З.С., Гордина А.Ф., Шайбадуллина А.В., Пудов И.А., Эльрефаи А.Э.М.М. Мелкозернистый бетон, модифицированный суспензией хризотилеволокна // *Строительные материалы*. 2019. № 1–2. С. 4–10. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-767-1-2-4-10>
8. Строкова В.В., Везенцев А.И., Колесников Д.А., Солоха А.С. Хризотил – природный нанотубулярный материал // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2010. № 2. С. 34–38.
9. Naumova L.N., Pavlenko V.I., Cherkashina N.I. Modification of chrysotile fiber surface and its effect on the physical and mechanical characteristics of chrysotile cement // *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*. 2019. Vol. 55, pp. 330–334. DOI: <https://doi.org/10.1134/S2070205119020229>
10. Везенцев А.И., Гудкова Е.А., Пылев Л.Н., Смирнова О.В. К вопросу об изменении поверхностных и биологических свойств хризотила в асбестоцементе // *Строительные материалы*. 2008. № 9. С. 26–27.

References

1. Davydov S.Y., Apakashev R.A., Valiev N.G., Kozhushko G.G. Chrysotile Asbestos: raw materials for the construction industry from deep quarries. *Refractories and Industrial Ceramics*. 2020. Vol. 61, pp. 249–252. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11148-020-00466-4>
2. Khozin V.G., Khritankov V.F., Pichugin A.P. A role of the building industry in the development of a circular economy of industrial regions of Russia. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2021. No. 1–2, pp. 6–12. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-788-1-2-6-12>
3. Umarov T.Yu., Razzokov S.Z. Chrysotile-asbestos regeneration from technogenic waste of the chrysotile-cement industry. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2021. No. 3, pp. 52–56. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-789-3-52-56>
4. Shchetkova E.A., Sevast'yanov R.V. Chrysotile as optimal reinforcing agent for fiber-reinforced concrete. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Stroitel'stvo i arkhitektura*. 2015. No. 2, pp. 174–191. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.15593/2224-9826/2015.2.12>
5. Pligina A.I., Semenov V.S., Egorova L.V., Ashadullin A.A. Usage of chrysotile-cement waste in manufacturing ferroconcrete products. *Nauchnoye obozreniye*. 2015. No. 10–2, pp. 84–88. (In Russian).
6. Kozlov V.V., Popov K.N., Mezhev A.G., Liljak A.I. Ways of using chrysotile cement industry waste. *Vestnik MGSU*. 2011. No 1–2, pp. 284–287. (In Russian).
7. Yakovlev G.I., Drochytka R., Pervushin G.N., Grakhov V.P., Saidova Z.S., Gordina A.F., Shaybadullina A.V., Pudov I.A., Elrefai A.E.M.M. Fine-grained concrete modified with a suspension of chrysotile nanofibers. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2019. No. 1–2, pp. 4–10. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-767-1-2-4-10>
8. Strokova V.V., Vezentsev A.I., Kolesnikov D.A., Solokha A.S. Chrysotile is a natural nanotubular material. *Vestnik BGTU im. V.G. Shukhova*. 2010. No. 2, pp. 34–38 (In Russian).
9. Naumova L.N., Pavlenko V.I., Cherkashina N.I. Modification of chrysotile fiber surface and its effect on the physical and mechanical characteristics of chrysotile cement. *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*. 2019. Vol. 55, pp. 330–334. DOI: <https://doi.org/10.1134/S2070205119020229>
10. Vezentsev A.I., Gudkova Ye.A., Pylev L.N., Smirnova O.V. On the question of changing the surface and biological properties of chrysotile in asbestos cement. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2008. No. 9, pp. 26–27. (In Russian).
11. Repina Zh.V., Chemyakina N.A., Tarskaya-Lapteva E.G. Khризотилцементные stroitel'nyye materi-

11. Репина Ж.В., Чемякина Н.А., Тарская-Лаптева Е.Г. Хризотилцементные строительные материалы. Области применения. Екатеринбург: АМБ, 2009. 152 с.
12. Орешкин Д.В., Попов К.Н., Лиляк А.И., Межов А.Г. Утилизация асбестоцементных отходов в строительстве // *Вестник МГСУ*. 2011. № 1–2. С. 296–298.
13. Гуюмджян П.П., Кашникова М.Л., Кулигина Т.Н. Использование отходов асбестоцементной промышленности // *Строительные материалы*. 2006. № 9. С. 20–21.
14. Лукутцова Н.П., Пыкин А.А., Чивикова Е.В. Использование опал-кристобалит-тридимитового микронаполнителя в тяжелом бетоне // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2020. № 2. С. 8–17. DOI: <https://doi.org/10.34031/2071-7318-2020-5-2-8-17>
15. Орентлихер Л.П., Соболева Г.Н. Безобжиговый композиционный пористый заполнитель из влажных асбестоцементных отходов и легкие бетоны на его основе // *Строительные материалы*. 2000. № 7. С. 18–19.
16. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2018616850. Программа моделирования экспериментальных данных Extr.sce / Карпиков Е.Г., Янченко В.С., Лукутцова Н.П., Головин С.Н. Заявл. 25.04.2018. Опубл. 07.06.2018.
17. аly. Oblasti primeneniya [Chrysotile cement building materials. Areas of use]. Yekaterinburg: AMB. 2009. 152 p.
18. Oreshkin D.V., Popov K.N., Liljak A.I., Mezhev A.G. Utilization of asbestos cement waste in the building materials. *Vestnik MGSU*. 2011. No. 1–2, pp. 296–298. (In Russian).
19. Guyumdzhyan P.P., Kashnikova M.L., Kuligina T.N. Use of wastes from the asbestos-cement industry. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2006. No. 9, pp. 20–21. (In Russian).
20. Lukutsova N.P., Pykin A.A., Chivikova E.V. Use of opal-crystobalite-tridimite micro-filler in dense aggregate concrete. *Vestnik BGTU im. V.G. Shukhova*. 2020. No. 2, pp. 8–17. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.34031/2071-7318-2020-5-2-8-17>
21. Orentlikher L.P., Soboleva G.N. Non-fired composite porous aggregate from wet asbestos-cement waste and lightweight concrete based on it. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2000. No. 7, pp. 18–19. (In Russian).
22. Certificate of state registration of a computer program 2018616850. Experimental data modeling program Extr.sce. Karpikov E.G., Yanchenko V.S., Lukutsova N.P., Golovin S.N. Declared 25.04.2018. Published 07.06.2018. (In Russian).

СПЕЦИАЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

В издательстве «Стройматериалы» вы можете приобрести книги:

Монография «Защита деревянных конструкций»

Автор – Ломакин А.Д.

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

**Монография «Производство деревянных клееных конструкций»**

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

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



**Заявки направляйте в редакцию по e-mail: mail@rifsm.ru,
по тел.: (499) 976-22-08, 976-20-36.**

Оформляйте заказ на сайте www.rifsm.ru

Н.Н. ФОМИНА, канд. техн. наук (fominanani@yandex.ru), А.Р. ИСМАГИЛОВ, инженер (аспирант)
Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю.А. (410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77)

Фасадные краски на основе наполненных стирол-акриловых дисперсий

Обоснована актуальность разработки отечественных конкурентоспособных лакокрасочных материалов строительного назначения на водно-дисперсионной основе. Такие разработки сдерживаются недостатком информации по наполнению, пигментированию и модификации современных водно-дисперсионных связующих. В исследованиях использовались стирол-акриловые дисперсии, пигментный диоксид титана, пеногасители и другие модифицирующие добавки отечественного и импортного производства, а также минеральные наполнители – микрокальцит и каолин. Показано, что стирол-акриловую дисперсию турецкого производства Orgal Pst 65 с повышенным содержанием акриловых звеньев в сополимере целесообразно использовать в малопигментированных составах, а для фасадных красок с объемной концентрацией пигментной части более 30% рационально применять отечественную дисперсию Акрилан 101. Повышенное пенообразование данной дисперсии в процессе переработки эффективно устраняется применением пеногасителя на основе минеральных масел. Оптимизировано количество пигментного диоксида титана в рецептуре фасадной краски – его дозировка снижена с 9 до 5% по массе путем замены на каолин. Укрывистость при этом сохранилась на прежнем уровне, реологические показатели улучшились, снижился расход загустителя, снизилась степень белизны покрытий, что некритично для фасадных и базисных красок. Предложены информативные критерии выбора пигмента по параметрам дисперсности, определяемым лазерными анализаторами: качественный пигмент должен иметь достаточное количество частиц с размерами в диапазоне 0,2–0,25 мкм и вероятнейший размер частиц, близкий к 0,25 мкм. Отечественный пигмент TiO₂ 230 удовлетворяет этим требованиям. В результате разработана эффективная рецептура фасадной краски, включающая связующее, пигмент и наполнители отечественного производства, а также необходимый и достаточный комплекс модифицирующих добавок. В апреле 2021 г. выпущена опытная партия разработанной краски и произведены отделочные работы фасада жилого дома.

Ключевые слова: водно-дисперсионные лакокрасочные материалы, фасадные краски, стирол-акриловая дисперсия, пигментный диоксид титана, пеногаситель, параметры дисперсности.

Для цитирования: Фомина Н.Н., Исмагилов А.Р. Фасадные краски на основе наполненных стирол-акриловых дисперсий // *Строительные материалы*. 2021. № 8. С. 60–66. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-794-8-60-66>

N.N. FOMINA, Candidate of Sciences (Engineering) (fominanani@yandex.ru); A.R. ISMAGILOV, Engineer (Postgraduate)
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov (77, Politechnicheskaya Street, Saratov, 410054, Russian Federation)

Facade Paints Based on Filled Styrene-Acrylic Dispersions

The relevance of the development of domestic competitive paint and varnish materials for construction purposes on a water-dispersion basis is justified. Such developments are hindered by the lack of information on filling, pigmentation and modification of modern water-dispersion binders. Styrene-acrylic dispersions, pigment titanium dioxide, defoamers and other modifying additives of domestic and imported production, as well as mineral fillers – microcalcite and kaolin were used in the studies. It is shown that the styrene-acrylic dispersion Orgal Pst 65 of the Turkish production with an increased content of acrylic links in the copolymer is advisable to use in low-pigmented compositions, and for facade paints with a volume concentration of the pigment part of more than 30%, it is rational to use the domestic dispersion Acrylan 101. The increased foam formation of this dispersion during processing is effectively eliminated by the use of a mineral oils-based defoamer. The amount of pigment titanium dioxide in the facade paint formulation has been optimized – its dosage has been reduced from 9 to 5% by weight by replacing it with kaolin. At the same time, the covering capacity remained at the same level, rheological indicators improved, the consumption of thickener decreased, the degree of whiteness of coatings decreased, which is not critical for facade and base paints. Informative criteria for choosing a pigment based on the dispersion parameters determined by laser analyzers are proposed: a high-quality pigment should have a sufficient number of particles with sizes in the range of 0.2–0.25 microns and the most likely particle size close to 0.25 microns. The domestic TiO₂ 230 pigment meets these requirements. As a result, an effective recipe for facade paint has been developed, including a binder, pigment and fillers of domestic production, as well as the necessary and sufficient complex of modifying additives. In April 2021, an experimental batch of the developed paint was released and finishing works were carried out on the facade of a residential building.

Keywords: water-dispersion paint and varnish materials; facade paints; styrene-acrylic dispersion; pigment titanium dioxide; defoamer; dispersion parameters.

For citation: Fomina N.N., Ismagilov A.R. Facade paints based on filled styrene-acrylic dispersions. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2021. No. 8, pp. 60–66. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-794-8-60-66>

Возрастающее внимание к экологическим проблемам и ужесточение экологических законодательств способствуют переходу от органорастворимых лакокрасочных материалов (ЛКМ) к водно-дисперсионным (ВД). Это относится и к строительной продукции, поэтому в отделке фасадов и интерьеров преобладают ЛКМ на ВД основе. Помимо экологической чистоты и пожаробезопасности, краски на

водной основе имеют ряд технологических и эксплуатационных преимуществ (табл. 1).

Российский рынок ЛКМ представлен около 100 участниками (Рейтинг крупнейших производителей лакокрасочных материалов в России за 2020 г. URL: <https://delprof.ru/press-center/open-analytics/rynok-lakokrasochnoy-produktsii-v-rossii-tendentsii-razvitiya-i-posledstviya-pandemii->). Импортная про-

Таблица 1
Table 1Водно-дисперсионные лакокрасочные материалы:
преимущества и недостатки
Advantages and negative qualities
of water-dispersion paints

Преимущества	Недостатки
<ul style="list-style-type: none"> – отсутствие огнеопасных и токсичных растворителей; – простота, пожаро-, взрывобезопасность технологий приготовления и нанесения; – отсутствие запаха; – низкий расход энергии при производстве и нанесении; – быстрота образования покрытий; – высокая адгезионная прочность ко многим поверхностям; – хорошие адгезионные показатели при нанесении на влажные поверхности; – высокая концентрация твердой фазы; – водостойкость, паропроницаемость покрытия; – длительный срок службы (10–15 лет) 	<ul style="list-style-type: none"> – высокое поверхностное натяжение, что затрудняет процесс перетира пигментов и наполнителей со связующим; – сравнительно невысокие стабильность и морозостойкость, что приводит к сезонности применения; – склонность к пенообразованию при диспергировании пигментов и наполнителей

дукция составляет третью часть объема рынка и отличается дороговизной. Крайне актуально преодолеть импортозависимость в секторе ЛКМ [1–3]. Эксперты отмечают, что большинство потребителей не имеют четко выраженной позиции относительно предпочтения отечественных или зарубежных ЛКМ, следовательно, есть высокий потенциал импортозамещения. Необходимы разработки отечественных качественных ЛКМ с использованием по возможности компонентов также российского производства и грамотное продвижение их на рынке. Такие разработки сдерживаются недостатком информации по наполнению, пигментированию и модификации современных ВД связующих.

Перспективные ВД связующие – универсальные стирол-акриловые дисперсии. Сополимеризация акрилатов со стиролом открывает большие возможности выбора температуры стеклования, твердости пленки и параметров светостойкости полимера [4–8]. Производство таких дисперсий в РФ расширяется в основном за счет размещения мощностей компании DOW (предприятие ФиннДисп, г. Раменское), а также в связи с наращиванием мощностей предприятиями «Хома» (г. Дзержинск), «Акрилан» (г. Владимир). Дисперсии импортного производства (Acronal производства BASF, Германия; Rhodopas производства Rhodia, Франция; Orgal производства Organik Kimya, Турция; Argacril производства Argon, Турция) также достаточно востребованы.

Основной применяемый в ЛКМ белый пигмент – рутильный диоксид титана (TiO_2), обладающий щелоче-, кислото-, атмосферостойкостью и высоким коэффициентом преломления (2,72–2,75). Извест-

ными производителями диоксида титана являются компании: «Сумыхимпром» (пигменты SumTitan), «Крымский титан (Титановые инвестиции)», «Du Pont» (пигменты Ti-Pure®), «Kronos Titan GmbH & Co. Ohg» (пигменты Kronos), «Sichuan Lomon Titanium Industry Co. Ltd» (пигменты Lomon). Высококачественные марки диоксида титана (с высокой степенью белизны и высокой степенью перетира) европейских производителей дорогостоящи. В то же время часто дозировки пигментов в краски неоправданно завышены, так как с увеличением объемной доли пигмента эффективность его действия снижается. Целесообразно в большей степени использовать наполнители в комплексе с пигментом, и положительные примеры этого подхода показаны, например, в [9, 10]. Для частичной замены диоксида титана на минеральные порошки с достаточной степенью белизны и укрупненностью могут быть использованы широко распространенные карбонатные и алюмосиликатные наполнители.

Химической отрасли предлагается широкий спектр модифицирующих добавок в ЛКМ, но без должного обоснования зачастую используются так называемые спиральные рецептуры, когда следующая добавка вводится в попытке устранить негативное действие предыдущей.

Целью проведенных исследований ставилась разработка эффективных и экономичных составов ЛКМ на основе наполненных стирол-акриловых дисперсий для получения качественных фасадных покрытий.

Материалы и методы

При разработке ЛКМ использовались следующие материалы:

– стирол-акриловые дисперсии: Акрилан 101, Orgal Pst 65;

– модифицирующие добавки: пеногасители ВУК 037 (силиконосодержащая эмульсия минеральных масел на основе парафина и гидрофобных компонентов, «ВУК-Chemie», Нидерланды) и SN-Defoamer NXZ (смесь алифатических углеводородов и неионных ПАВ, «San Nopco Limited», Япония); диспергатор («Метахим», г. Волхов); загуститель; коалесцент; консервант;

– пигментный диоксид титана: TiPure 706 («DuPont», США); TiOx 230 (ООО «Титановые инвестиции», Россия);

– наполнители: микродоломит марок МД-2, МД-5 (Балаковский завод минеральных наполнителей); каолин.

Исследования проводились как стандартными для ЛКМ методами, так и с привлечением физико-химических методик. Для анализа параметров дисперсности минеральных частиц применялись методы статического рассеяния света (*SLS – Static light scattering*), динамического рассеяния света (*DLS – Dynamic light scattering*), просвечивающей электронной микроскопии (*TEM – Transmission electron microscopy*); для

Таблица 2
Table 2

Характерные полосы поглощения на ИКС
и их интерпретация
Typical IR absorption bands and their interpretation

Характерные полосы поглощения	Интерпретация
ИК-спектр полиакрилатов	
Дуплет при 1260 и 1170 см ⁻¹	Связь С–О
Область 1720–1730 см ⁻¹	Связь С=О
ИК-спектр полистирола	
750 см ⁻¹ ; 700 см ⁻¹	Интенсивные и широкие полосы
1250 см ⁻¹ , 830 см ⁻¹	Несколько полос средней и малой интенсивности
1585–1625 см ⁻¹	Валентные колебания сопряженных С=C связей бензольного кольца

Таблица 3
Table 3

Количественный анализ ИК-спектров
Quantitative analysis of IR spectra

Дисперсия	Отношения абсолютных интенсивностей полос поглощения в области волновых чисел, см ⁻¹ /см ⁻¹	
	1730/1600	1730/700
Акрилан	6,8	1,13
Orgal	14,8	2,4

химического анализа – рентгено-флюоресцентная спектродотометрия; для изучения микроструктуры стирол-акриловых сополимеров и идентификации функциональных групп – инфракрасная спектроскопия (ИКС).

Результаты и обсуждение

На первом этапе исследовались стирол-акриловые дисперсии отечественного и импортного производства. Минимальная температура пленкообразования обеих дисперсий находится в интервале от 13 до 22°C [11], что указывает на необходимость использования в рецептурах ЛКМ коалесцентов. Пленка, полученная из дисперсии Orgal, бездефектная, а в пленке из дисперсии Акрилан наблюдаются дефекты в виде мелких пузырьков, что указывает на повышенное пенообразование и необходимость введения в состав ЛКМ пеногасителей.

Одним из определяющих свойства ЛКМ и покрытий факторов является соотношение между акриловыми и стирольными звеньями в сополимере дисперсий, которое определялось при помощи ИКС. Количественный анализ спектров (табл. 2–3) показал, что в сополимере дисперсии Orgal более высокое содержание акриловых звеньев по сравнению с дисперсией Акрилан. Соответственно, следует ожидать большей стойкости полимера при УФ-облучении и целесообразности использования

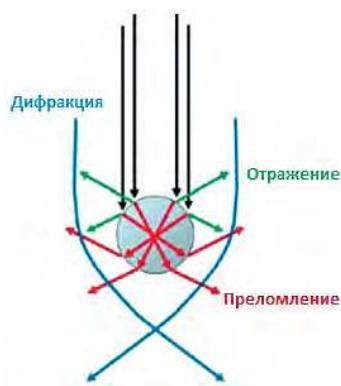


Рис. 1. Преломление, отражение и дифракция света вокруг частицы [15]
Fig. 1. Refraction, reflection and diffraction of light around a particle [15]

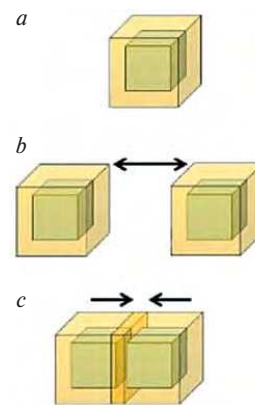


Рис. 2. Рассеивающие объемы частиц [15]: а – одиночная частица; б – две широко разделенные частицы; с – две близкие частицы – перекрытие рассеивающих объемов
Fig. 2. Scattering volume overlap of two particles [15]: a – single particle; b – two widely separated particles; c – two close particles

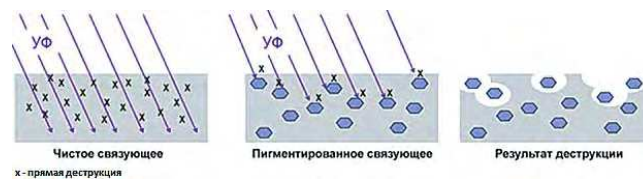


Рис. 3. Влияние TiO₂ на долговечность покрытий [15]
Fig. 3. Influence of TiO₂ on the durability of coatings [15]

этой дисперсии в малопигментированных составах. Дисперсию Акрилан целесообразно применять в составах с достаточно высокой объемной концентрацией пигментной части (не менее 30%). Данная дисперсия использовалась для дальнейших исследований.

Для ВД ЛКМ характерно сильное пенообразование при диспергировании пигментов и наполнителей, обусловленное неизбежным физико-химическим взаимодействием используемых поверхностно-активных веществ и воды в условиях интенсивного перемешивания [12]. Образование пены приводит к серьезным осложнениям технологического процесса и появлению дефектов на поверхности покрытий. Поэтому на следующем этапе исследований анализировалась эффективность пеногасителей. В состав ЛКМ вводились пеногасители, различающиеся действующим веществом (в одном – минеральные масла, в другом – смесь углеводов и эмульгаторов). Критерием оценки качества пеногашения являлась скорость оседания макропены, а также визуальная оценка на наличие дефектов покрытия, таких как кратеры, пузыри и неровности слоя (табл. 4). Эффективнее оказался пеногаситель на основе минеральных масел при дозировке 0,3 мас. % [14].

Далее оптимизировалось количество диоксида титана в рецептуре ЛКМ. Известно [14–16], что рас-

Таблица 4
Table 4Влияние пеногасителей на время оседания макропены и декоративные свойства покрытий
Influence of defoamers on macrofoam and decorative properties of coatings

Вид пеногасителя в составе ЛКМ	Время оседания макропены	Наличие пузырей на поверхности через 2 ч	Наличие пузырей в объеме через 2 ч	Наличие дефектов на высохшем покрытии
ВУК 037	2 мин	Присутствует в незначительном количестве	Отсутствует	Отсутствует
SN-Defoamer NXZ	3 мин	Присутствует в значительном количестве	Присутствует в значительном количестве	Кратеры, проколы

Таблица 5
Table 5Изменения свойств ЛКМ и покрытий в зависимости от состава пигментной части
Influence of the composition of the pigment part on the properties of paints and coatings

Компоненты композиции, % от общей массы ЛКМ	Пигментная часть	
	TiO ₂	TiO ₂ + каолин
Пигмент TiO _x 230	9	5
Каолин	–	8
Микродоломит	43,5	39,5
Загуститель	0,2	0,15
Остальное (дисперсия, вода, модифицирующие добавки)	52,7	52,7
Свойства ЛКМ и покрытий		
Укрывистость, г/м ²	90	93
Цвет	Белый	Молочный
Условная вязкость, с	51	63

Таблица 6
Table 6Среднее значение размеров частиц пигментов и наполнителей, полученных различными методами
Average value of the particle sizes of pigments and fillers, obtained by various methods

Вид минерального порошка	Среднее значение размеров частиц, мкм, полученное методом		
	SLS	DRS	TEM
Пигмент TiPure 706	0,351	0,754	0,233
Пигмент TiO _x 230	0,421	1,361	0,301
Микродоломит МД2	4,986	–	–
Каолин	2,983	–	–

сеивающий объем частицы пигмента больше ее фактического объема из-за дифракции (рис. 1). Поэтому наилучшая рассеивающая способность у полностью разделенных частиц (рис. 2). А этого сложно добиться при высоких объемных концентрациях пигмента. Потеря рассеивающего объема происходит при объемной концентрации более 4%, и то при условии идеально разделенных частиц, что в реальных усло-

виях не достигается. Практически это значит, что последняя добавленная порция пигмента наименее эффективна и логичный способ оптимизации рецептуры краски – убрать лишнее неэффективное, но дорогостоящее количество пигмента.

Снизив дозировку пигмента с 9 до 5 мас. %, авторы заменили его на каолин. Укрывистость при этом сохранилась на прежнем уровне; кроме того, каолин улучшил реологические показатели, снизив расход загустителя (табл. 5). Степень белизны покрытий снизилась, но некритично для фасадных, а также для базисных красок.

В процессе поиска критериев выбора пигментов и наполнителей были анализированы параметры их дисперсности. Данные о дисперсности проб пигментов и наполнителей, полученные авторами разными методами [17], ожидаемо различаются абсолютными значениями. Значения среднего размера частиц расходятся существенно (табл. 6). Методы SLS и DLS дают массовое (или объемное) распределение частиц по размерам, и средний размер частиц представляет собой математическое ожидание. Метод TEM позволяет понять форму частиц, качественно оценить, присутствуют ли в системе агломераты. Однако в случае количественного анализа велика вероятность случайных и систематических погрешностей [16]. Метод SLS с использованием лазерного анализатора показал высокую воспроизводимость результатов как по пигментам, так и по наполнителям.

Помимо укрывистости и белизны пигмент во многом определяет долговечность покрытий. Характерная особенность пигментного TiO₂ – высокая фотохимическая активность, проявляющаяся при действии видимого и УФ света, что может вызывать деструкцию пленкообразующего вещества, меление и разрушение покрытия [4, 16].

Механизм фотокаталитической деструкции полимерного покрытия, содержащего TiO₂:

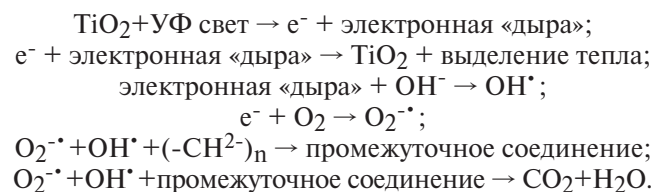


Таблица 7
Table 7

Анализ распределения частиц пигментов по размерам (методом SLS) [19]
Analysis of pigment particle size distribution (SLS method) [19]

Вид пигмента	Количество частиц размерами, мкм, в % от общего объема (массы)					Среднее значение, мкм	Медиана, мкм	Мода, мкм
	Менее 1				1,005–10			
	Менее 0,115	0,115–0,197	0,197–0,259	0,259–1,005				
Пигмент TiPure 706	3,7	31,2	14,8	47,7	2,6	0,351	0,26	0,141
Пигмент TiOx 230	1,5	22,6	14,4	56,4	5,1	0,421	0,325	0,241

С другой стороны, из-за поглощения диоксидом титана УФ лучей он защищает глубинные слои покрытия от разрушающего действия солнечной радиации (рис. 3).

Известно, что фотохимическая активность TiO₂ возрастает с уменьшением степени дисперсности и переходом частиц пигмента в нанодисперсный диапазон [4, 16, 18]. В исследованных пигментах присутствуют частицы TiO₂ нанодисперсного диапазона размерами менее 115 нм (табл. 7, столбец 2). Объемное содержание их невелико, но если рассматривать удельную поверхность, то наночастицы пигмента TiPure 706 составят не менее 14%, а пигмента TiOx 230 – не менее 7% от общей удельной поверхности всех частиц этих пигментов, и это может негативно сказываться на долговечности покрытия. В целом отмечается положительное влияние диоксида титана на долговечность полимерных покрытий – увеличение стойкости покрытия к солнечному излучению. Покрытия с нестойким к прямой деструкции полимером будут быстро разлагаться, и даже качественный пигмент несущественно замедлит этот процесс [14–16].

Оптимальный для светорассеивания размер частиц пигмента составляет половину среднего значения длины волны дневного света в воздухе – 0,25 мкм [4, 15, 18]. В исследованных пигментах количество частиц в диапазоне, наиболее эффективном с позиции светорассеивающей способности, приблизительно равно 14% (табл. 7, столбец 4). Большая часть частиц крупнее оптимального размера, на что указывает значение медианы (табл. 7, столбец 8). А вот вероятнейший размер частиц у пигмента TiOx 230 как раз соответствует области оптимального размера частиц: значение моды для него составляет 0,241 мкм (табл. 7, столбец 9), у пигмента TiPure 706 он ниже оптимальных значений. Таким образом, средний размер частиц пигментов (табл. 7, столбец 7), представляющий собой математическое ожидание (часто именно этот показатель указывается производителями пигментов), хотя и удобен для понимания, но не всегда корректно отражает оптимальность размера частиц. По мнению авторов, информативнее именно количество частиц с размерами в оптимальном диапазоне и вероятнейший размер частиц, и по этому критерию отечественный пигмент достаточно эффективен.

Таблица 8
Table 8

Разработанная рецептура фасадной ВД краски
The developed formulation of the exterior water-dispersion paint

Компоненты	Содержание, мас. %
Дисперсия Акрилан 101	14
Вода	29,2
Консервант	0,4
Пигмент TiOx 230	5
Каолин	8
Микрокальцит М-5	16,8
Микрокальцит М-2	22,7
Диспергатор	0,5
Пенегаситель ВУК 037	0,45
Загуститель	0,15
Растворитель	2,8
Итого:	100%
Свойства композиции и покрытия	
Цвет	Молочный
Укрывистость	93 г/м ²
Усл. вязкость	63 с
Время высыхания	2 ч
Смываемость	Менее 1 г/м ²
Адгезия к штукатурке	Не менее 0,7 МПа
Паропроницаемость	1–3 мг/(см ² ·сут)
Прочность пленки при растяжении	5,5–6,3 МПа

Закключение

В результате проведенных исследований разработана эффективная рецептура ЛКМ для фасадных покрытий (табл. 8), включающая связующее, пигмент и наполнители отечественного производства, а также необходимый и достаточный комплекс модифицирующих добавок.

Технологический процесс целесообразно организовать по «дежной» технологии. В апреле 2021 г. выпущена опытная партия разработанной фасадной краски в объеме 2 т и произведены отделочные работы фасада жилого дома в Ленинском районе г. Саратова.

Список литературы

1. Стратегия развития химического и нефтехимического комплекса на период до 2030 г. Утверждена приказом Минпромторга России и Минэнерго России от 8 апреля 2014 года № 651/172. URL: <https://docs.cntd.ru/document/420245722>
2. Аверьянов Г.В. Намерено ли государство развивать национальную лакокрасочную отрасль? // *Вестник химической промышленности*. 2019. № 4 (109). С. 8–11.
3. Аверьянов Г.В. Почему важна национальная глобализация российской лакокрасочной отрасли? // *Вестник химической промышленности*. 2019. № 6 (111). С. 8–10.
4. Ламбурн Р. Лакокрасочные материалы и покрытия: теория и практика. СПб.: Химия, 1991. 481 с.
5. Мюллер Б., Пот У. Лакокрасочные материалы и покрытия. Принципы составления рецептур. М.: Пэйнт-Медиа, 2007. 237 с.
6. Фрейтаг В., Стойе Д. Краски, покрытия и растворители: состав, производство, свойства и анализ. СПб.: Профессия, 2007. 526 с.
7. Яковлев А.Д. Химия и технология лакокрасочных покрытий. СПб.: Химиздат, 2008. 448 с.
8. Polymer Dispersions and Their Industrial Applications. Edited by Dieter Urban and Koichi Takamura. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH, 2002. 417 p.
9. Казакова Е.Е., Скороходова О.Н. Водно-дисперсионные акриловые лакокрасочные материалы строительного назначения. М.: Пэйнт-Медиа, 2003. 136 с.
10. Строганов В.Ф., Амелченко М.О. Влияние наполнителей силикатной природы на свойства стирол-акриловых покрытий // *Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета*. 2018. № 3 (45). С. 196–202.
11. Ивашенко Ю.Г., Фомина Н.Н., Исмагилов А.Р. Анализ стирол-акриловых дисперсий как связующих для красок строительного назначения // *Вестник БГТУ имени В.Г. Шухова*. 2018. № 1. С. 6–11. DOI: https://doi.org/10.12737/article_5a5dbd2d492241.03354026.
12. Хайлен В. Добавки для водорастворимых лакокрасочных материалов / Пер. с англ. А.А. Корда. М.: Пэйнт-Медиа, 2011. 176 с.
13. Исмагилов А.Р., Фомина Н.Н. Исследование эффективности пеногасителей в водно-дисперсионных красках // *Техническое регулирование в транспортном строительстве*. 2016. № 1 (15). URL: trts.esrae.ru/28-143
14. Diebold M.P. A Monte carlo determination of the effectiveness of nanoparticles as spacers for optimizing TiO₂ opacity. *Journal of Coatings Technology and Research*. 2011. Vol. 8 (5), pp. 541–552. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11998-011-9342-1>.

References

1. Strategy for the development of the chemical and petrochemical complex for the period up to 2030. Approved by order of the Ministry of Industry and Trade of Russia and the Ministry of Energy of Russia dated April 8, 2014 No. 651/172. URL: <https://docs.cntd.ru/document/420245722>
2. Averyanov G.V. Does the state intend to develop the national paint and varnish industry? *Vestnik khimicheskoy promyshlennosti*. 2019. No. 4 (109), pp. 8–11. (In Russian).
3. Averyanov G.V. Why is the national globalization of the Russian paint and varnish industry important? *Vestnik khimicheskoy promyshlennosti*. 2019. No. 6 (111), pp. 8–10. (In Russian).
4. Lambourne R. Lakokrasochnyye materialy i pokrytiya: teoriya i praktika [Paints and varnishes and coatings: theory and practice]. Saint Petersburg: Khimiya. 1991. 481 p.
5. Muller B., Pot U. Lakokrasochnyye materialy i pokrytiya. Printsipy sostavljeniya retseptur [Paints and varnishes and coatings. Formulation principles]. Moscow: Paint-Media. 2007. 237 p.
6. Freytag V., Stoye D. Kraski, pokrytiya i rastvoriteli: sostav, proizvodstvo, svoystva i analiz [Paints, coatings and solvents: composition, production, properties and analysis]. Saint Petersburg: Professiya. 2007. 526 p.
7. Yakovlev A.D. Khimiya i tekhnologiya lakokrasochnykh pokrytiy [Chemistry and technology of paint and varnish coatings]. Saint Petersburg: Khimizdat. 2008. 448 p.
8. Polymer Dispersions and Their Industrial Applications. Edited by Dieter Urban and Koichi Takamura. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH, 2002. 417 p.
9. Kazakova E.E., Skorokhodova O.N. Vodno-dispersionnyye akrilovyye lakokrasochnyye materialy stroitel'nogo naznacheniya [Water-dispersive acrylic paints and varnishes for construction purposes]. Moscow: Paint-Media, 2003. 136 p.
10. Stroganov V.F., Amelchenko M.O. Influence of fillers of silicate nature on the properties of styrene-acrylic coatings. *Izvestiya Kazanskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta*. 2018. No. 3 (45), pp. 196–202. (In Russian).
11. Ivaschenko Yu.G., Fomina N.N., Ismagilov A.R. Analysis of styrene-acrylic dispersions as binders for building paints *Vestnik BGTU imeni V.G. Shukhova*. 2018. No. 1, pp. 6–11. (In Russian). DOI: https://doi.org/10.12737/article_5a5dbd2d492241.03354026.
12. Haylen V. Dobavki dlya vodorastvorimyykh lakokrasochnykh materialov [Additives for water-soluble paints and varnishes. Trans. from English A.A. Korda]. Moscow: Paint-Media. 2011. 176 p.
13. Ismagilov A.R., Fomina N.N. Investigation of the effectiveness of antifoam agents in water-dispersion paints *Tekhnicheskoye regulirovaniye v transportnom stroitel'stve*. 2016. No. 1 (15). (In Russian). URL: trts.esrae.ru/28-143

15. Diebold M.P. Optimizing the benefits of TiO₂ in paints // *Journal of Coatings Technology and Research*. 2020. Vol. 17, pp. 1–17. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11998-019-00295-2>.
16. Diebold M.P., Kwoka R.A., Mehr S.R., Vargas R.W. Rapid assessment of TiO₂ pigment durability via the acid solubility test // *Journal of Coatings Technology and Research*. 2004. Vol. 3. No. 1, pp. 239–241. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11998-004-0018-y>.
17. Исмагилов А.Р., Фомина Н.Н. Параметры дисперсности минеральных компонентов лакокрасочных материалов. *Долговечность, прочность и механика разрушения строительных материалов и конструкций: Материалы XI Академических чтений РААСН. Международная научно-техническая конференция*. Саранск, 2020. С. 337–342.
18. Ермилов П.И., Индейкин Е.А., Толмачев И.А. Пигменты и пигментированные лакокрасочные материалы. Л.: Химия, 1987. 200 с.
19. Фомина Н.Н., Исмагилов А.Р., Фомин В.Г. Дисперсность пигментного диоксида титана // *Строительство и реконструкция*. 2020. № 2. С. 136–142.
14. Diebold M.P. A Monte Carlo determination of the effectiveness of nanoparticles as spacers for optimizing TiO₂ opacity. *Journal of Coatings Technology and Research*. 2011. Vol. 8 (5), pp. 541–552. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11998-011-9342-1>
15. Diebold M.P. Optimizing the benefits of TiO₂ in paints. *Journal of Coatings Technology and Research*. 2020. Vol. 17, pp. 1–17. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11998-019-00295-2>
16. Diebold M.P., Kwoka R.A., Mehr S.R., Vargas R.W. Rapid assessment of TiO₂ pigment durability via the acid solubility test. *Journal of Coatings Technology and Research*. 2004. Vol. 3. No. 1, pp. 239–241. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11998-004-0018-y>
17. Ismagilov A.R., Fomina N.N. Dispersion parameters of mineral components of paints and varnishes. *Durability, strength and fracture mechanics of building materials and structures: Materials of the XI Academic Readings of the RAASN. International Scientific and Technical Conference*. Saransk. 2020, pp. 337–342. (In Russian).
18. Ermilov P.I., Indeikin E.A., Tolmachev I.A. Pigmenty i pigmentirovannyye lakokrasochnyye materialy [Pigments and pigmented paints and varnishes]. Leningrad: Khimiya. 1987. 200 p.
19. Fomina N.N., Ismagilov A.R., Fomin V.G. Dispersion of pigment titanium dioxide. *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya*. 2020. No. 2, pp. 136–142. (In Russian).

СПЕЦИАЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

«Проектирование оснований, фундаментов и подземных сооружений»

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



Авторы: д-р техн. наук Р.А. Мангушев, канд. техн. наук А.И. Осокин, канд. техн. наук В.В. Конюшков, канд. техн. наук И.П. Дьяконов, канд. техн. наук С.В. Ланько.

Пособие выпущено под грифом рекомендации Российской академии архитектуры и строительных наук (РААСН).

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

Разработанное пособие является не только учебным изданием, но и практическим руководством для инженеров-строителей, так как охватывает вопросы проектирования основных типов оснований, фундаментов и подземных частей гражданских зданий и сооружений. Особое внимание уделено расчетам различного типа фундаментов, изготовленным по современным отечественным и зарубежным технологиям, а также конструктивным и технологическим методам устройства котлованов. Учтены особенности устройства фундаментов высотных зданий, влияния технологических осадков, рассмотрены численные методы, используемые при геотехнических расчетах. Особенностью книги является наличие большого количества расчетных примеров по различным типам оснований и фундаментов.

Издание рекомендовано для использования при подготовке бакалавров и специалистов.

В.П. ВЫЛЕГЖАНИН¹, канд. техн. наук, директор (info@stroyalata.ru),

В.А. ПИНСКЕР¹, канд. техн. наук, научный руководитель

Т.М. ПЕТРОВА², д-р техн. наук, зав. кафедрой строительных материалов и технологий

¹ Центр ячеистых бетонов (191023, Санкт-Петербург, ул. Зодчего Росси, 1/3)

² Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I (190031, Санкт-Петербург, Московский пр-т, 9)

Микропористость ячеистого бетона и ее влияние на теплопроводность

Предложена модель пористой структуры ячеистого бетона, позволяющая представить его в виде макропор, окруженных микропористым цементным камнем (ЦМК), состоящим из микропор и цементно-силикатного камня (ЦСК). Такая модель позволила установить в ячеистом бетоне зависимость между коэффициентами плотности, пористости, диаметрами макро- и микропор и расстояния между ними, а также определить зависимость коэффициента теплопроводности ячеистого бетона от коэффициентов его плотности, пористости цементно-силикатного камня. Показано, что при неизменяемой плотности газобетона его расчетный коэффициент теплопроводности снижается с уменьшением плотности МКЦ, за счет образования в нем микропор. Приведены формулы, из которых следует, что расстояние между порами находится в прямо пропорциональной зависимости от размеров диаметров макропор и чем меньше их диаметр, тем меньше расстояние между порами и тем меньше коэффициент теплопроводности ячеистого бетона.

Ключевые слова: ячеистый бетон, газобетон, макропоры, микропоры, цементный камень, додекаэдр, коэффициент пористости, коэффициент плотности, коэффициент теплопроводности.

Для цитирования: Вылегжанин В.П., Пинскер В.А. Микропористость ячеистого бетона и ее влияние на теплопроводность // *Строительные материалы*. 2021. № 8. С. 67–71. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-794-8-67-71>

V.P. VYLEGZHANIN¹, Candidate of Sciences (Engineering), Director (info@stroyalata.ru),

V.A. PINSKER¹, Candidate of Sciences (Engineering)

T.M. PETROVA², Doctor of Sciences (Engineering), Head of the Chair of Building Materials and Technologies

¹ Aerated Concrete Center (1/3, Zodchego Rossi Street, Saint-Petersburg, 191023, Russian Federation)

² Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University (9, Moskovsky Prospect, Saint Petersburg, 190031, Russian Federation)

Microporosity of Cellular Concrete and its Effect on Thermal Conductivity

A model of the porous structure of cellular concrete, which makes it possible to represent it in the form of macropores surrounded by a microporous cement stone (MCS) consisting of micropores and cement-silicate stone (CSS), is proposed. This model made it possible to establish in cellular concrete the dependence between the density coefficients, porosity, diameters of macro – and micropores and the distance between them, as well as to determine the dependence of the thermal conductivity coefficient of cellular concrete on the coefficients of its density, porosity of cement-silicate stone. It is shown that with a constant density of aerated concrete, its calculated coefficient of thermal conductivity decreases with a decrease in the density of MCS, due to the formation of micropores in it. Formulas are given, from which it follows that the distance between the pores is in direct proportional dependence on the size of the diameters of the macropores and the smaller their diameter, the smaller the distance between the pores and the lower the coefficient of thermal conductivity of cellular concrete.

Keywords: cellular concrete, aerated concrete, macropores, micropores, cement stone, dodecahedron, porosity coefficient, density coefficient, thermal conductivity coefficient.

For citation: Vylegzhaniin V.P., Pinsker V.A., Petrova T.M. Microporosity of cellular concrete and its effect on thermal conductivity. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2021. No. 8, pp. 67–71. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-794-8-67-71>

Важной задачей строительного материаловедения в области автоклавного ячеистого бетона является повышение теплотехнических характеристик материала. Попытки повысить теплозащитные свойства за счет снижения плотности приводят к снижению прочностных характеристик, что выводит ячеистый бетон из категории конструкционно-теплоизоляционного материала в категорию изоляционного. Это снижает эффективность его применения, так как требует усложнения конструкций, что влечет повышение трудоемкости и стоимости. Поэтому повышение теплоизолирующих свойств ячеистого бетона за счет оптимизации пористости и управления формированием структуры пористого

цементного камня без снижения прочности является актуальной научной задачей.

Ранее нами [1] были предложены формулы для вычисления коэффициента теплопроводности ячеистого бетона (далее – газобетона), полученные на основании математической модели, представляющей газобетон, внутреннее пространство которого разделено на одинаковые плотноупакованные ячейки. Каждая ячейка имеет форму ромбического додекаэдра с одной сферической порой, расположенной в центре, диаметром $d_{\text{п}}$, окруженной оболочкой из цементно-силикатного камня, заполняющей межпоровое пространство. Предложенные формулы не учитывали зависимость коэффициента теплопрово-

дности газобетона от размера пор, что подтверждалось экспериментальными данными.

Для совершенствования предложенных формул при прежнем подходе разделения пространства газобетона на ячейки, имеющие форму ромбических додекаэдров, в дополнение к прежним допущениям рассматривается, что межпоровое пространство заполнено микропористым цементным камнем (далее – МКЦ), который состоит из микропор, окруженных цементно-силикатным камнем (далее – ЦСК). Эти микропоры состоят из гелевых и капиллярных пор. Гелевые поры возникают на месте воды, израсходованной на гидратацию силикатов, а капиллярные поры образуются в результате испарения избыточной воды затворения [2, 3]. Показатели, характеризующие пористую структуру газобетона, такие как плотность, пористость, размеры пор, их количество, расстояние между порами, связаны между собой определенными зависимостями. Перечисленные показатели влияют на физико-технические (теплопроводность, паропроницаемость и др.) и физико-механические (прочность при сжатии, растяжении, модуль упругости и др.) свойства газобетона [4].

При определении показателей пористой структуры газобетона условно принимаются следующие допущения:

- 1) макро- и микропоры имеют форму сфер диаметром d_{Π} и $d_{\Pi\text{М}}$ соответственно;
- 2) диаметры макро- и микропор относительно друг друга одинаковые;
- 3) внутреннее пространство ячеистого бетона (газобетона) разделено на одинаковые плотноупакованные макро- и микроячейки;
- 4) каждая макро- и микроячейка газобетона состоит из одной поры, расположенной в ее центре, окруженной оболочкой, заполняющей межпоровое пространство газобетона, состоящее из МКЦ вокруг макроячеек и из ЦСК вокруг микроячеек.

Равномерное заполнение пространства макро- и микроячейками с абсолютно плотной упаковкой можно получить, если ячейки имеют форму ромбических додекаэдров [5]. Ромбический додекаэдр – это двенадцатигранник, все грани которого попарно параллельны и имеют вид одинаковых ромбов. Объем ромбического додекаэдра $V_{\text{д}}$ равен:

$$V_{\text{д}} = 0,707d_{\text{д}}^3, \quad (1)$$

где $d_{\text{д}}$ – поперечный размер додекаэдра, равный расстоянию между его попарно параллельными гранями (размер ячейки) [6, 7].

Плотность газобетона $P_{\text{Г}}$, кг/м³, определяет количество ЦСК без микропор в единице объема газобетона. Плотность ЦСК в газобетоне $P_{\text{Ц}}$, кг/м³. Плотность МКЦ в газобетоне $P_{\text{К}}$ состоит из ЦСК и микропор $P_{\text{К}} < P_{\text{Ц}}$, кг/м³.

Коэффициент плотности газобетона $K_{\text{Ц}} = P_{\text{Г}}/P_{\text{Ц}}$ определяет долю объема ЦСК в единице объема газобетона. Коэффициент плотности МКЦ $K_{\text{С}} = P_{\text{К}}/P_{\text{Ц}}$

определяет долю объема МКЦ в единице объема газобетона.

В единице объема газобетона коэффициенты пористости определяют: $\Pi_{\text{Г}} = (1 - K_{\text{Ц}})$ – его общую пористость, состоящую из макропор и микропор; $\Pi_{\text{МК}} = (K_{\text{С}} - K_{\text{Ц}})$ – долю макропор; $\Pi_{\text{МП}} = (1 - K_{\text{С}})$ – долю микропор.

Объемы макропоры $V_{\text{П}}$ и микропоры $V_{\text{ПМ}}$ с диаметрами $d_{\text{П}}$ и $d_{\text{ПМ}}$, имеющие шарообразную форму, составляют: $V_{\text{П}} = 0,523 \cdot d_{\text{П}}^3$ и $V_{\text{ПМ}} = 0,523 \cdot d_{\text{ПМ}}^3$.

Макропоры в газобетоне окружены оболочками из МКЦ. Их количество в единице объема газобетона вычисляется по формуле: $n_{\text{МК}} = (K_{\text{С}} - K_{\text{Ц}})/0,523 \cdot d_{\text{П}}^3$.

Микропоры окружены оболочками из ЦСК. Их количество в единице объема газобетона: $n_{\text{МП}} = (1 - K_{\text{С}})/0,523 \cdot d_{\text{ПМ}}^3$.

Объем газобетона в этой единице объема, приходящийся на одну макропору, который включает кроме макропоры окружающую ее оболочку из МКЦ, равен $V_{\text{П}} = 0,523 \cdot d_{\text{П}}^3 / (K_{\text{С}} - K_{\text{Ц}})$.

Объем газобетона, приходящийся на одну микропору, окруженную оболочкой из ЦСК, $V_{\text{ПМ}} = 0,523 \cdot d_{\text{ПМ}}^3 / (1 - K_{\text{С}})$.

Приравняв полученные объемы додекаэдров $V_{\text{д}}$ и $V_{\text{ДМ}}$ к объемам $V_{\text{П}}$ и $V_{\text{ПМ}}$ в формуле (1), получим:

$$\begin{aligned} 0,707 \cdot d_{\text{д}}^3 &= 0,523 \cdot d_{\text{П}}^3 / (K_{\text{С}} - K_{\text{Ц}}); \\ 0,707 \cdot d_{\text{ДМ}}^3 &= 0,523 \cdot d_{\text{ПМ}}^3 / (1 - K_{\text{С}}). \end{aligned} \quad (2)$$

Из формул (2) следует:

$$(K_{\text{С}} - K_{\text{Ц}}) = 0,74 \cdot (d_{\text{П}}^3 / d_{\text{д}}^3); \quad (3)$$

$$(1 - K_{\text{С}}) = 0,74 \cdot (d_{\text{ПМ}}^3 / d_{\text{ДМ}}^3). \quad (4)$$

Додекаэдр в газобетоне представляет собой пороячейку с поперечным размером $d_{\text{д}}$ и $d_{\text{ДМ}}$, состоящую из поры диаметрами $d_{\text{П}}$ или $d_{\text{ПМ}}$ и слоя МКЦ или ЦСК, ее окружающего, толщиной $\Delta d_{\text{П}}/2$ и $\Delta d_{\text{ПМ}}/2$, удвоенная величина которых есть расстояние между порами. В результате поперечные размеры пороячеек $d_{\text{д}} = d_{\text{П}} + \Delta d_{\text{П}}$ и $d_{\text{ДМ}} = d_{\text{ПМ}} + \Delta d_{\text{ПМ}}$, а формулы (3), (4) принимают вид:

$$(K_{\text{С}} - K_{\text{Ц}}) = 0,883(d_{\text{П}}^3 / (d_{\text{П}} + \Delta d_{\text{П}})^3); \quad (5)$$

$$(1 - K_{\text{С}}) = 0,883(d_{\text{ПМ}}^3 / (d_{\text{ПМ}} + \Delta d_{\text{ПМ}})^3). \quad (6)$$

Из формул (5) и (6) следует, что коэффициенты плотности газобетона $K_{\text{Ц}}$ и МКЦ $K_{\text{С}}$ определяют величины соотношений между объемами макро-, микропор и макро-, микропороячеек и величины произведения этих соотношений независимы от размера диаметра этих пор. С изменением толщины оболочек пороячеек диаметры пор пропорционально меняются.

После преобразования (5) и (6) получают формулы для вычисления диаметра макро- и микропор:

$$d_{\text{П}} = \Delta d_{\text{П}} / C_{\text{П}}; \quad (7)$$

$$d_{\text{ПМ}} = \Delta d_{\text{ПМ}} / C_{\text{ПМ}}, \quad (8)$$

Таблица 1
Table 1

P_K	K_C	K_M	$\lambda_{Г, ВТ/(М\cdot^{\circ}С)}$	$d_{П, ММ}$	$d_{ПМ, ММ}$	$\Delta d_{П}$
2200	1	1	0,133	1	0	0,048
2100	0,954	0,956	0,128	0,99	0,028	0,076
2000	0,91	0,917	0,124	0,89	0,042	0,09
1900	0,864	0,88	0,12	0,79	0,055	0,103
1800	0,818	0,846	0,116	0,75	0,072	0,12
1700	0,773	0,815	0,112	0,67	0,083	0,13
1600	0,727	0,785	0,109	0,63	0,1	0,148
1500	0,68	0,757	0,106	0,59	0,117	0,165

Таблица 2
Table 2

$P_{Г}$	P_K	K_M	$K_{Ц}$	$\lambda_{Г}$	$d_{П}$	$d_{ПМ}$
370	2200	0,545	0,168	0,105	1,17	0
366	2100	0,548	0,168	0,101	0,95	0,015
368	1900	0,553	0,166	0,095	0,67	0,03

где $C_{П}=(1/(1,106\cdot(K_C-K_{Ц})^{1/3})-1)$; $K_{Ц}=P_{Г}/P_{Ц}$, $P_K < P_{Ц}$; $C_{ПМ}=(1/(1,106\cdot(1-K_C)^{1/3})-1)$; $K_C=P_K/P_{Ц}$.

Коэффициенты $C_{П}$ и $C_{ПМ}$ определяют влияние плотности газобетона, ЦСК и МКЦ на пористость и прочность газобетона. Расстояние между макропорами $\Delta d_{П}=\Delta d_{ПМ}+d_{ПМ}$, где величина $\Delta d_{ПМ}$ зависит от размеров зерен исходных компонентов, применяемых при изготовлении газобетона. В среднем размер зерен можно принять равным 0,02 мм.

Из формул (7), (8) следует, что с увеличением объема МКЦ его плотность (коэффициент K_C) уменьшается и, как следствие, коэффициент $C_{П}$ увеличивается, а $C_{ПМ}$ уменьшается. В результате диаметр макропор ($d_{П}$) уменьшается, а диаметр микропор ($d_{ПМ}$) увеличивается. Из чего следует, что диаметр макропор уменьшается за счет увеличения диаметра микропор и также меняется толщина слоя МКЦ, так как общие плотность и пористость газобетона при этом не меняются.

На изменения плотности МКЦ P_K влияет количество и размер микропор, образование которых зависит от количества свободной воды при затворении газобетонной смеси. Чем больше воды в смеси, тем больше образуется в МКЦ микропор [2], заполненных свободной водой, которая впоследствии испаряется, что и приводит к образованию микропор. В результате объем МКЦ увеличивается, а плотность его снижается. Следует отметить, что плотность МКЦ P_K может быть равной $P_{Ц}$ только теоретически, в действительности P_K всегда будет меньше $P_{Ц}$, так как в газобетонной смеси всегда есть свободная вода, следовательно, всегда будут микропоры и в результате всегда будет $P_K < P_{Ц}$.

Коэффициент теплопроводности газобетона зависит от теплопроводности МКЦ и от теплопроводности воздуха, находящегося в порах.

В газобетоне плотностью $P_{Г}$ доля объема ЦСК увеличивается за счет образования в нем микропор до объема МКЦ плотностью P_K . Так как при этом количество ЦСК в газобетоне не меняется, его плотность с увеличением объема уменьшается, и это уменьшение плотности учитывается коэффициентом $K_M=1/(2-P_K/P_{Ц})$.

С уменьшением плотности ЦСК его коэффициент теплопроводности λ_K уменьшается пропорционально K_M . В результате теплопроводность ЦСК с микропорами (МКЦ) $\lambda_{Ц} = K_M \cdot \lambda_K$. В газобетоне с уменьшением плотности ЦСК его количество, определяемое коэффициентом $K_{Ц} = P_{Г}/P_{Ц}$, не меняется. Следовательно, коэффициент теплопроводности ЦСК с микропорами в газобетоне $\lambda_{КЦ} = K_{Ц} \cdot K_M \cdot \lambda_K$, ВТ/(М \cdot° С).

Коэффициент пористости газобетона $(1-P_{Г}/P_{Ц})$ учитывает долю макро- и микропор в единице объема. Коэффициент теплопроводности всех пор вычисляется по формуле:

$$\lambda_{ВГ} = (1 - P_{Г}/P_{Ц})\lambda_{В}, \text{ ВТ/(М}\cdot^{\circ}\text{С)},$$

где $\lambda_{В}=0,0259$ ВТ/(М \cdot° С) – коэффициент теплопроводности воздуха при $t=20^{\circ}\text{С}$.

Коэффициент теплопроводности газобетона $\lambda_{Г}$ есть сумма коэффициентов теплопроводности слоя МКЦ и слоя воздуха. В результате формула для вычисления теплопроводности газобетона принимает вид:

$$\lambda_{Г} = \lambda_{КЦ} + \lambda_{ВГ} = K_{Ц}K_M\lambda_{К} + (1-K_{Ц})\lambda_{В}, \text{ ВТ/(М}\cdot^{\circ}\text{С)}, (9)$$

где $K_M=1/(2-K_C)=1/(2-P_K/P_{Ц})$; $K_{Ц}=P_{Г}/P_{Ц}$.

Для более точного экспериментального определения и расчета коэффициента теплопроводности газобетона по ГОСТ 7076–99 необходимо предварительно определить количество макропор, микро-

пор, плотность и теплопроводность ЦСК по ГОСТ 12730.4–78, а также плотность газобетона по ГОСТ 12730–78. Плотность и теплопроводность ЦСК необходимо знать, так как его теплопроводность зависит от количества применяемых при изготовлении газобетона исходных компонентов и их минералогического состава.

На приведенном примере расчета показано изменение коэффициента теплопроводности газобетона в зависимости от вышеперечисленных показателей. Расчет выполнялся с использованием формул (7)–(9). Результаты расчета приведены в табл. 1.

Исходные данные.

Плотность ЦСК $P_{Ц}=2200$ кг/м³ и его коэффициент теплопроводности $\lambda_{Ц}=0,5$ Вт/(м·°С). Принимается по [8] с учетом плотности и коэффициентов теплопроводности цементно-известково-гипсово-песчаных растворов и гидратированной воды в силикатах.

Плотность газобетона $P_{Г}=500$ кг/м³.

Плотность МКЦ $P_{К}<P_{Ц}$ кг/м³.

Коэффициент теплопроводности воздуха $\lambda_{В}=0,0259$ Вт/(м·°С).

Результаты расчета: $K_{Ц}=P_{Г}/P_{Ц}=500/2200=0,227$.

Из приведенного примера следует, что коэффициент теплопроводности газобетона уменьшается с уменьшением плотности МКЦ. При $P_{К}=1900$ кг/м³ его величина $\lambda_{Г}=0,12$ Вт/(м·°С) соответствует приведенному в ГОСТ 31359–2007. При этом диаметр макропор уменьшается, а диаметр микропор увеличивается, в результате расстояние между ними уменьшается, и это приводит к снижению плотности МКЦ, а следовательно, и к снижению его теплопроводности.

Из формул (8), (9) также следует, что при уменьшении плотности МКЦ $P_{К}$ и неизменяемой величине коэффициента плотности газобетона $P_{Г}/P_{Ц}$ величина коэффициента $K_{М}$, а следовательно, расчетный коэффициент теплопроводности газобетона $\lambda_{Г}$ уменьшаются.

При экспериментальном определении коэффициента теплопроводности ячеистого бетона подтверждается зависимость между размером макропор и его коэффициентом теплопроводности. Например, в приведенных в Интернет данных [9]:

$$P_{Г} = 370 \text{ кг/м}^3, \text{ средний } d_{П} = 1,17 \text{ мм}, \\ \lambda_{Г} = 0,102 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°С)};$$

$$P_{Г} = 366 \text{ кг/м}^3, d_{П} = 0,97 \text{ мм}, \lambda_{Г} = 0,098 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°С)};$$

$$P_{Г} = 368 \text{ кг/м}^3, d_{П} = 0,64 \text{ мм}, \lambda_{Г} = 0,088 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°С)}.$$

Для сопоставления с этими экспериментальными данными был выполнен расчет по формулам (7)–(9) коэффициентов теплопроводности и определены соответствующие им диаметры пор. За начальную величину расчета принимались следующие исходные данные: $P_{Ц}=2200$ кг/м³; $P_{Г}=370$ кг/м³; $d_{П}=1,17$ мм; $\lambda_{Г}=0,102$ Вт/(м·°С); $\lambda_{К}=0,5$ Вт/(м·°С). Полученные результаты расчета приведены в табл. 2.

Из приведенных в табл. 2 результатов расчета следует, что с уменьшением плотности МКЦ $P_{К}$ ко-

эффициент теплопроводности и диаметры макропор ($d_{П}$) ячеистого бетона уменьшаются, а диаметры микропор $d_{ПМ}$ увеличиваются. Полученные результаты расчета хорошо коррелируются с экспериментальными данными: отклонение по диаметрам пор составляет 7,8%, по коэффициентам теплопроводности – 2,2%.

Выводы

1. Предложена модель пористой структуры ячеистого бетона (газобетона), позволяющая учитывать его характерные показатели (коэффициенты плотности, пористости, диаметр пор, расстояния между ними), а также зависимость этих показателей от коэффициента плотности газобетона [10].

2. Обоснована зависимость и приведена упрощенная формула для вычисления коэффициента теплопроводности газобетона в зависимости от плотности МКЦ, а также от теплопроводности цементно-силикатного камня (ЦСК) и воздуха.

3. Показано, что при неизменяемой плотности газобетона его расчетный коэффициент теплопроводности снижается с уменьшением плотности МКЦ за счет образования в нем микропор.

4. Предложено при экспериментальном определении коэффициента теплопроводности газобетона для более точного получения результата предварительно определять по ГОСТ 12730.1–78 объем крупных пор, полный объем пор, плотность и коэффициент теплопроводности ЦСК.

5. Показано, что на минимальное расстояние между порами влияет размер зерен, полученных в результате помола исходных компонентов ячеистого бетона.

6. Приведены формулы, из которых следует, что расстояние между порами прямо пропорционально диаметру макропор, и чем он меньше, тем меньше расстояние между порами и тем меньше коэффициент теплопроводности ячеистого бетона.

7. Установлено, что коэффициент теплопроводности ячеистого бетона и размеры его макропор зависят от плотности МКЦ, например со снижением его плотности размер макропор тоже уменьшается.

8. Получено, что увеличение количества воды затворения (коэффициента В/Т) ячеистого бетона может способствовать увеличению пористости МКЦ и, как следствие, снижению его коэффициента теплопроводности.

9. Следует помнить, что в действительности макропоры и микропоры имеют различные формы по сравнению с принимаемыми в модели, но тенденция влияния пористости МКЦ на теплопроводность ячеистого бетона сохранится.

10. В продолжение настоящей работы, используя предложенную модель пористой структуры газобетона и полученные формулы, можно составить числовые зависимости оптимальных размеров пор и расстояния между ними с учетом крупности зерен помола сырьевых компонентов газобетона, оценить влияние плотности ЦСК на теплопроводность газо-

бетона в зависимости от его минералогического состава, а также определить влияние пористости на прочностные свойства газобетона.

Список литературы

1. Вылегжанин В.П., Пинскер В.А. Влияние пористости автоклавного газобетона на его теплопроводность и пути ее изменения за счет совершенствования подбора сырьевых материалов // *Строительные материалы*. 2019. № 8. С. 36–38.
2. Макридин Н.И., Максимова И.Н. Структура и механические свойства цементных дисперсных систем. Пенза: ПГАУС, 2013, 340 с.
3. Пинскер В.А., Вылегжанин В.П. Теория прочности и подбора состава газобетона. Сборник статей «Ячеистые бетоны в современном строительстве». 2-я Международная научно-практическая конференция. СПб., 2005.
4. СТО 501-52-01–2007. Проектирование и возведение ограждающих конструкций жилых и общественных зданий с применением ячеистых бетонов в Российской Федерации. М., 2008.
5. Федоров Е.С. Начало учения о фигурах. М.: Изд-во Академии наук СССР, 1953. 420 с.
6. Вылегжанин В.П., Романов В.П. Структура армирования фибробетона и ее влияние на предельные значения разрушающих нагрузок. ЛенЗНИИЭП. Сборник научных трудов «Расчет и проектирование пространственных конструкций гражданских зданий и сооружений». Л., 1975.
7. Пинскер В.А. Некоторые вопросы физики ячеистых бетонов. Сборник статей «Жилые дома из ячеистых бетонов». М.: Госстройиздат, 1963.
8. СТО 00044807-001–2006. Теплотехнические свойства ограждающих конструкций. М.: Стандартинформ, 2006.
9. Авдеев Е. От чего зависит коэффициент теплопроводности бетона: влияние плотности и заполнителей, классификация бетонов, строительство. <https://masterabetona.ru/svoystva/610-koefficient-teploprovodnosti-betona>. 2015.
10. Vylegzhanin V.P., Petrova T.M., Pinsker V.A. Peculiarities of the porous structure and their influence on thermal conductivity. *AAC Worldwide*. 2021. No. 3, pp. 30–36.

References

1. Vylegzhanin V.P., Pinsker V.A. Influence of porosity of autoclaved gas concrete on its thermal conductivity and ways of its change due to improvement in selection of raw components. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2019. No. 8, pp. 36–38. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-773-8-36-38>
2. Makridin N.I., Maksimova I.N. Struktura i mekhanicheskiye svoystva tsementnykh dispersnykh sistem. [Structure and mechanical properties of cement dispersed systems]. Penza: PGAUS. 2013. 340 p.
3. Pinsker V.A., Vylegzhanin V.P. The theory of strength and selection of the composition of aerated concrete. "Collection of articles Aerated concrete in modern construction". 2nd International Scientific and Practical Conference. St. Petersburg. 2005. (In Russian).
4. СТО 501-52-01–2007 Design and construction of enclosing structures for residential and public buildings using aerated concrete in the Russian Federation. Moscow. 2008. (In Russian).
5. Fedorov E.S. Nachalo ucheniya o figurakh [The beginning of the study of figures]. Moscow: Publishing house of the Academy of Sciences, USSR. 1953. 420 p.
6. Vylegzhanin V.P., Romanov V.P. The structure of fiber-reinforced concrete reinforcement and its influence on the ultimate values of breaking loads. *LenZNIIEP. Collection of scientific papers "Calculation and design of spatial structures of civil buildings and structures"*. Leningrad. 1975. (In Russian).
7. Pinsker V.A. Some questions of the physics of cellular concrete. *Collection of articles "Dwelling houses from aerated concrete"*. Moscow: Gosstroyizdat. 1963. (In Russian).
8. СТО 00044807-001–2006. Thermal properties of enclosing structures. М.: Стандартинформ, 2006. (In Russian).
9. Avdeev E. What determines the coefficient of thermal conductivity of concrete: influence of density and aggregates, classification of concretes, construction. <https://masterabetona.ru/svoystva/610-koefficient-teploprovodnosti-betona>. 2015. (In Russian).
10. Vylegzhanin V.P., Petrova T.M., Pinsker V.A. Peculiarities of the porous structure and their influence on thermal conductivity. *AAC Worldwide*. 2021. No. 3, pp. 30–36.

СПЕЦИАЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

Учебное пособие «Промышленное и гражданское строительство. Введение в профессию»

Авторы: Грызлов В.С., Ворожбянов В.Н., Гендлина Ю.Б., Залипаева О.А., Каптюшина А.Г., Медведева Н.В., Петровская А.А., Поварова О.А., Чорная Т.Н.

Научный редактор – д-р техн. наук, проф. В.С. Грызлов

Москва; Вологда: Инфра-Инженерия, 2021. 276 с.

Дана общая характеристика профессии строитель. Приведены сведения из истории развития строительной отрасли. Предложено краткое описание видов строительной продукции, особенностей проектирования строительных объектов, технологии и порядка организации возведения зданий и сооружений; раскрыты вопросы менеджмента в строительстве. Подчеркнута важность строительной науки и цифровизации строительной деятельности. Отдельная глава посвящена особенностям организации инженерно-строительного обучения. Для студентов бакалавриата, начавших обучение по направлению «Строительство». Может быть использовано для профориентационной работы с выпускниками школ.

По вопросам приобретения обращайтесь в издательство «Инфра-Инженерия»



Как подготовить к публикации научно-техническую статью



Журнальная научно-техническая статья – это сочинение небольшого размера (до пяти журнальных страниц), что само по себе определяет границы изложения темы статьи.

Необходимыми элементами научно-технической статьи являются:

- постановка проблемы в общем виде и ее связь с важными научными или практическими задачами;
- анализ последних достижений и публикаций, в которых начато решение данной проблемы и на которые опирается автор, выделение ранее не решенных частей общей проблемы, которым посвящена статья;
- формулирование целей статьи (постановка задачи);
- изложение основного материала исследования с полным обоснованием полученных результатов;
- выводы из данного исследования и перспективы дальнейшего поиска в избранном направлении.

Научные статьи рецензируются специалистами. Учитывая открытость журнала «Строительные материалы» для ученых и исследователей многих десятков научных учреждений и вузов России и СНГ, представители которых не все могут быть представлены в редакционном совете издания, желательно представлять одновременно со статьей отношение ученого совета организации, где проведена работа, к представляемому к публикации материалу в виде сопроводительного письма или рекомендации.

Библиографические списки цитируемой, использованной литературы должны подтверждать следование автора требованиям к содержанию научной статьи.

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 2–3 года в ведущих отраслевых научно-технических и научных изданиях, на которые опирается автор в построении аргументации или постановке задачи исследования.

2. Ссылаться на монографии, опубликованные за последние пять 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.

ВНИМАНИЕ! С 1 января 2020 г. изменены требования к оформлению статей. Обязательно ознакомьтесь с требованиями на сайте издательства в разделе «Авторам»!

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

- текст статьи должен быть набран в редакторе Microsoft Word и сохранен в формате *.doc или *.rtf и не должен содержать иллюстраций;
- графический материал (графики, схемы, чертежи, диаграммы, логотипы и т. п.) должен быть выполнен в графических редакторах: CorelDraw (не выше v.12), Adobe Illustrator (не выше v.CS6) и сохранен в форматах *.cdr, *.ai, *.eps соответственно. Сканирование графического материала и импорт его в перечисленные выше редакторы недопустимо;
- иллюстративный материал (фотографии, коллажи и т. п.) необходимо сохранять в формате *.tif, *.psd, *.jpg (качество «8 – максимальное») или *.eps с разрешением не менее 300 dpi, размером не менее 115 мм по ширине, цветовая модель CMYK или Grayscale.

Материал, передаваемый в редакцию в электронном виде, должен сопровождаться: рекомендательным письмом руководителя предприятия (института); лицензионным договором о передаче права на публикацию; **распечаткой, лично подписанной авторами**; рефератом объемом не менее 100 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. Иллюстративный материал должен быть передан в виде оригиналов фотографий, негативов или слайдов, распечатки файлов.

В 2006 г. в журнале «Строительные материалы»[®] был опубликован ряд статей «Начинающему автору», ознакомиться с которыми можно на сайте журнала www.rifsm.ru/files/avtoru.pdf

Подробнее можно ознакомиться с требованиями на сайте издательства
<http://rifsm.ru/page/7/>

или журнала <http://journal-cm.ru/index.php/ru/avtoram>



**8–9 сентября
2021 г.
г. Воронеж**

**Оргкомитет:
140050, Московская обл.
п. Красково
ул. К. Маркса, д. 117,
РГА
Телефон:
+7 8-916-501-36-56
E-mail: rga-service@mail.ru
www.rosgips.ru**

Российская гипсовая ассоциация
●
Московский государственный строительный университет
●
Научно-исследовательский институт строительной физики
●
Воронежский государственный технический университет

Десятая Международная конференция

«Повышение эффективности производства и применения гипсовых материалов и изделий»

Тематика конференции:

- технический прогресс в области гипсовых материалов и изделий (исследования, производство и применение)
- ангидритовые вяжущие
- гипсовые материалы в малоэтажном строительстве
- привлекательность и механизмы инноваций в гипсовой отрасли
- современное оборудование для производства гипсовых вяжущих, материалов и изделий на их основе
- лаборатории, менеджмент качества, экологический менеджмент и их роль в обеспечении качества и долговечности гипсовых материалов
- нормативно-техническая документация в соответствии с современными требованиями
- обучение и переподготовка специалистов в области производства и применения гипсовых материалов и изделий

Генеральный спонсор

KNAUF
Немецкий стандарт

ООО «НИИРП-ГИПС»

ПОЛИПЛАСТ
ИДЕЯ. КАЧЕСТВО. МАТЕРИЯ

ALPHA TRE

PARGET
МАКИНА

Официальные Спонсоры

GRENZEBACH

CLAUDIUS PETERS

ВСЕЛУГ

Спонсоры

Gypotech
Phosnix Technology Worldwide

Gyproc
SAINT-GOBAIN

ВОЛМА

**HAVER & BOESCHER
RUSSIA**

**СТРОИТЕЛЬНЫЕ
МАТЕРИАЛЫ**

**ДОМОСТРОИТЕЛЬНЫЙ
КОМБИНАТ**
Более 50 лет в строительстве

Организаторы

РОССИЙСКАЯ
ГИПСОВАЯ
АССОЦИАЦИЯ

100
1917-2017

НИИСФ

ВГТУ

Генеральный информационный спонсор: журнал

**СТРОИТЕЛЬНЫЕ
МАТЕРИАЛЫ®**

РЕШЕНИЕ
НА ПОВЕРХНОСТИ

ВОЛМА

VOLMA CEMENTPANEL

влагостойкая цементно-перлитовая плита
для возведения и облицовки стен
любой формы.

Материал ударопрочен, не горюч, устойчив
к влаге, грибку и значительным перепадам
температур.

VOLMA

CEMENTPANEL

