

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ[®] № 8



НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ ИЗДАЕТСЯ С 1955 г. WWW.RIFSM.RU WWW.JOURNAL-CM.RU АВГУСТ 2022 г. (805)

45 лет Норский керамический завод



<https://www.norsk-yar.ru/>



ПРЕГРАДИМ ДОРОГУ ОГНЮ!

Конструктивная огнезащита КНАУФ



РЕКЛАМА

Более 25 лет на рынке России компания КНАУФ успешно развивает и реализует свои компетенции в строительной отрасли, в том числе и в области огнезащиты.

Листовые материалы КНАУФ помогают максимально сохранить функциональное назначение и несущую способность конструкций зданий и сооружений и увеличивают время от начала пожара до достижения критического состояния конструкций и их обрушения.

Материалы КНАУФ с классом пожарной опасности КМ0, такие как негорючая плита КНАУФ-Файерборд и КНАУФ-суперлист негорючий (ГВЛВ НГ), созданы специально для решения наиболее сложных задач по огнезащите.

Огнезащитные конструкции и системы КНАУФ

- облицовка стальных конструкций (до 240 мин.)
- противопожарные стены и перегородки (до 240 мин.)
- внутренние несущие стены и перекрытия (до 90 мин.)
- перекрытия и покрытия мансардных этажей (до 60 мин.)
- облицовка стен и шахт инженерных коммуникаций (до 120 мин.)
- огнестойкие кабельные короба (до 180 мин.)
- облицовка стальных воздуховодов (до 90 мин.)
- подвесные и самонесущие потолки (до 150 мин.)

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.

(805) Август 2022 г.

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

Керамические строительные материалы

А.Ю. СТОЛБОВУШКИН, Е.В. ИСТЕРИН, О.А. ФОМИНА

Необходимость повышения эффективности керамических материалов с матричной структурой для наружных стен зданий 4

Главному форуму российских керамиков 20 лет! (Информация) 12

Г.В. БОЛДЫРЕВ, Г.И. СТОРОЖЕНКО, М.А. ЧЕРНЕЙКИН

Особенности сырьевой базы Кузбасса для производства керамического кирпича 18

Гипсовые строительные материалы

С.В. ШАТАЛОВА, Н.В. ЧЕРНЫШЕВА, М.Ю. ЕЛИСТРАТКИН, М.Ю. ДРЕБЕЗГОВА, С.В. МАСАЛИТИНА

Реологические свойства гипсоцементных вяжущих и формовочных смесей на их основе для 3D-аддитивных технологий строительства 23

Ю.Б. СОБОЛЬ, А.М. АБРАМОВ, Э.В. ПОЛУМИЕВ

Новые технологические подходы в производстве искусственного гипсового камня из фосфогипса 31

А.Ф. БУРЬЯНОВ, Х.-Б. ФИШЕР, В.Ф. КОРОВЯКОВ, Н.А. ГАЛЬЦЕВА, Е.Н. БУЛДЫЖОВА

Ангидритовое вяжущее, модифицированное комплексной добавкой, для сухих строительных смесей 36

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

Механокомпозиты на основе ангидрита: свойства и применение 41

И.В. БЕССОНОВ, А.Д. ЖУКОВ, Э.А. ГОРБУНОВА, И.С. ГОВРЯКОВ

Текстильно-армированный модифицированный гипсобетон 46

А.Ф. ГОРДИНА, И.С. ПОЛЯНСКИХ, Н.С. ЖУКОВА, Г.И. ЯКОВЛЕВ

Исследование влияния пуццоланового компонента на структуру и состав модифицированных сульфатных матриц 51

Результаты научных исследований

Н.В. БАЙКИНА, А.М. АЙЗЕНШТАДТ

Переработка бетона: сотрудничество в сфере экологически эффективных технологий 59

Керамзит – многофункциональный материал для современного строительства (Информация) 63

О.Б. РУДАКОВ, А.М. ХОРОХОРДИН, Я.О. РУДАКОВ, Е.А. ХОРОХОРДИНА

Применение пиролитической хромато-масс-спектрометрии в контроле качества строительных полимеров и композитов 65

Т.А. МУХАМЕДИЕВ, С.А. ЗЕНИН

О расчете прочности наклонных сечений железобетонных элементов с различной формой поперечного сечения 70

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 (805) August 2022

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

Керамические строительные материалы

A. Yu. STOLBOUSHKIN, E.V. ISTERIN, O.A. FOMINA

**The Necessity to Increase the Efficiency of Ceramic Materials with a Matrix Structure
for External walls of Buildings** 4

The Main Forum of Russian Ceramists: 20 Years Old! (Information) 12

G.V. BOLDYREV, G.I. STOROZHENKO, M.A. CHERNEYKIN

Features of the Raw Material Base of Kuzbass for the Production of Ceramic Bricks 18

Гипсовые строительные материалы

S.V. SHATALOVA, N.V. CHERNYSHEVA, M.Yu. ELISTRATKIN, M.Yu. DREBEZGOVA, S.V. MASALITINA

**Rheological Properties of Gypsum Cement Binders and Molding Mixtures Based
on Them for 3D Additive Construction Technologies** 23

Yu. V. SOBOL, A.M. ABRAMOV, E.V. POLUMIEV

New Technological Approaches in the Production of Artificial Gypsum Stone from Phosphogypsum 31

A.F. BURYANOV, H.-B. FISHER, V.F. KOROVIAKOV, N.A. GALTSEVA, E.N. BULDIZHOVA

Anhydrite Binder Modified with a Complex Additive for Dry Building Mixtures 36

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

Mechanocomposites Based on Anhydrite: Properties and Applications 41

I.V. BESSONOV, A.D. ZHUKOV, E.A. GORBUNOVA, I.S. GOVRYAKOV

Textile-Reinforced Modified Gypsum Concrete 46

A.F. GORDINA, I.S. POLYANSKIKH, N.S. ZHUKOVA, G.I. YAKOVLEV

Pozzolanitic Constituent Impact on Structure and Properties of Modified Sulfate-Based Composites 51

Результаты научных исследований

N.V. BAYKINA, A.M. AYZENSHTADT

Concrete Recycling: Cooperation in the Field of Environmentally Efficient Technologies 59

Expanded Clay is a Multifunctional Material for Modern Construction (Information) 63

O.B. RUDAKOV, A.M. KHOROKHORDIN, Ya.O. RUDAKOV, E.A. KHOROKHORDINA

**Application of Pyrolytic Chromatography-Mass Spectrometry in Quality Control
of Building Polymers and Composites** 65

T.A. MUKHAMEDIEV, S.A. ZENIN

**On the Calculation of the Strength of Inclined Sections of Reinforced Concrete Elements
with Different Cross-Section Shapes** 70

Главный редактор:

ЮМАШЕВА Е.И.,

инженер-химик-технолог, почетный строитель России

Председатель редакционного совета:

РЕСИН В.И.,

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

АЙЗЕНШТАДТ А.М.,

д-р хим. наук, профессор (Архангельск)

АСКАДСКИЙ А.А.,

д-р хим. наук, профессор (Москва)

БУРЬЯНОВ А.Ф.,

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

ВЕРЕЩАГИН В.И.,

д-р техн. наук, профессор (Томск)

ГОРИН В.М.,

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

ЕРОФЕЕВ В.Т.,

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

КОРОЛЕВ Е.В.,

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

КОТЛЯР В.Д.,

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

КРИВЕНКО П.В.,

д-р техн. наук, профессор (Украина)

ЛЕОНОВИЧ С.Н.,

д-р техн. наук, профессор (Беларусь)

ЛЕСОВИК В.С.,

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

МУРТАЗАЕВ С.-А.Ю.,

д-р техн. наук, профессор (Грозный)

НЕДОСЕКО И.В.,

д-р техн. наук (Уфа)

ПИЧУГИН А.П.,

д-р техн. наук, профессор (Новосибирск)

ПУХАРЕНКО Ю.В.,

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

РУДАКОВ О.Б.,

д-р хим. наук, профессор (Воронеж)

ТРАВУШ В.И.,

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

ФЕДОСОВ С.В.,

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

СТРОКОВА В.В.,

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

ФИШЕР Х.-Б.,

доктор-инженер (Германия)

ХОЗИН В.Г.,

д-р техн. наук, профессор (Казань)

ШЕБЛ С.М.,

д-р наук, профессор (Египет)

ШЛЕГЕЛЬ И.Ф.,

канд. техн. наук (Омск)

ШТАКЕЛЬБЕРГ Д.И.,

д-р техн. наук, профессор (Израиль)

ЯКОВЛЕВ Г.И.,

д-р техн. наук, профессор (Ижевск)

Ю ЖЯНГМЯО,

д-р философии (Китай, Гуанчжоу)

Editor-in-chief

YUMASHEVA E.,

engineer-chemist-technologist, Honorary Builder of Russia

Chairman of Editorial Board

RESIN V.,

Doctor of Science (Economy), Professor (Moscow)

AYZENSHTADT A.,

Doctor of Sciences (Chemistry), Professor (Arkhangelsk)

ASKADSKIY A.,

Doctor of Science (Chemistry), Professor (Moscow)

BURYANOV A.,

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

VERESHCHAGIN V.,

Doctor of Science (Engineering), Professor (Tomsk)

GORIN V.,

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

EROFEEV V.,

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

KOROLEV E.,

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

KOTLYAR V.,

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

KRIVENKO P.,

Doctor of Science (Engineering), Professor (Ukraine)

LEONOVICH S.,

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

LESOVIK V.,

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

MURTAZAEV S.-A.,

Doctor of Science (Engineering), Professor (Grozniy)

NEDOSEKO I.,

Doctor of Science (Engineering) (Ufa, Bashkortostan)

PICHUGIN A.,

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

PUKHARENKO Yu.,

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

RUDAKOV O.B.,

Doctor of Sciences (Chemistry), professor (Voronezh)

STROKOVA V.

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

TRAVUSH V.,

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

FEDOSOV S.,

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

FISHER H.-B.,

Doctor-Engineer (Germany, Weimar)

KHOZIN V.,

Doctor of Science (Engineering), Professor (Kazan)

SHEBL S.M.,

Doctor of Science, Professor (Egypt)

SHLEGEL I.,

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

SHTACKELBERG D.,

Doctor of Science (Engineering), Professor (Israel)

YAKOVLEV G.,

Doctor of Science (Engineering), Professor (Izhevsk)

YU JIANGMIAO,

PhD / Associate Professor (China, Guangzhou)

А.Ю. СТОЛБОВУШКИН¹, д-р техн. наук (stanyr@list.ru),
Е.В. ИСТЕРИН¹, инженер (Eisterin@gmail.com);
О.А. ФОМИНА², канд. техн. наук (soa2@mail.ru)

¹ Сибирский государственный индустриальный университет (654007, Кемеровская обл. – Кузбасс, г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

² Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук (101990, Москва, Малый Харитоньевский пер., 4)

Необходимость повышения эффективности керамических материалов с матричной структурой для наружных стен зданий

Представлены результаты исследования по возможному устройству наружных стен однослойной конструкции из эффективного керамического материала с матричной структурой. Приведены химический и гранулометрический составы сырьевых материалов. Рассмотрены состав двухкомпонентной шихты и техника приготовления эффективных образцов с матричной структурой разработанным способом. Расчетным способом оценена возможность устройства условно однослойных наружных стен (без учета защитного слоя из клинкера толщиной 120 мм, термическим сопротивлением которого можно пренебречь) для отапливаемых гражданских зданий. Приведены результаты расчета требуемого термического сопротивления наружного стенового ограждения и минимальной толщины слоя эффективного керамического материала с матричной структурой на примере Сибирского региона России. В результате анализа территория Сибири условно разделена на четыре климатические зоны с требуемыми физико-механическими характеристиками для ячеистого керамического материала. Экспериментальными исследованиями установлено, что образцы ячеистой керамики с матричной структурой имеют среднюю плотность 950–1000 кг/м³ и по теплотехническим характеристикам относятся к группе керамических материалов повышенной эффективности. Требуемое термическое сопротивление ограждающей конструкции из разработанных керамических материалов при возведении однослойных наружных стен толщиной 640–770 мм обеспечивается только на территории юга Сибири.

Ключевые слова: эффективный керамический материал, гранулированное пеностекло, ячеистая керамика с матричной структурой, однослойные наружные стены.

Для цитирования: Столбовушкин А.Ю., Истерин Е.В., Фомина О.А. Необходимость повышения эффективности керамических материалов с матричной структурой для наружных стен зданий // *Строительные материалы*. 2022. № 8. С. 4–11.

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-805-8-4-11>

A. Yu. STOLBOUSHKIN¹, Doctor of Sciences (Engineering) (stanyr@list.ru), E.V. ISTERIN¹, Engineer (Eisterin@gmail.com);

O.A. FOMINA², Candidate of Sciences (Engineering) (soa2@mail.ru)

¹ Siberian State Industrial University (42, Kirova Street, Novokuznetsk, 654007, Russian Federation)

² Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences (4, Maly Kharitonievsky side Street, Moscow, 101990, Russian Federation)

The Necessity to Increase the Efficiency of Ceramic Materials with a Matrix Structure for External walls of Buildings

It has been presented the results of a study on the possible arrangement of external walls of a single-layer structure from an effective ceramic material with a matrix structure. The chemical and granulometric compositions of raw materials are given. The composition of a two-component charge and the technique for preparing effective samples with a matrix structure by the developed method are considered. By the calculation method it was estimated the possibility of constructing conditionally single-layer external walls (without taking into account the protective layer of 120 mm thick clinker, the thermal resistance of which can be neglected) for heated civil buildings. The results of the calculation of the required thermal resistance of the outer wall enclosure and the minimum thickness of the layer of effective ceramic material with a matrix structure are given on the example of the Siberian region of Russia. As a result of the analysis, the territory of Siberia is conditionally divided into 4 climatic zones with the required physical and mechanical characteristics for a cellular ceramic material. Experimental studies have established that samples of cellular ceramics with a matrix structure have an average density of 950–1000 kg/m³ and, according to their thermal characteristics, belong to the group of ceramic materials of increased efficiency. The required thermal resistance of the enclosing structure from the developed ceramic materials during the construction of single-layer external walls with a thickness of 640–770 mm is provided only in the south of Siberia.

Keywords: effective ceramic material, granulated foam glass, cellular ceramics with a matrix structure, single-layer external walls.

For citation: Stolboushkin A.Yu., Isterin E.V., Fomina O.A. The need to improve the efficiency of ceramic materials with a matrix structure for the exterior walls of buildings. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2022. No. 8, pp. 4–11. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-805-8-4-11>

Керамические материалы и изделия имеют большую популярность в современном строительстве. Долговечность, экологичность, огнестойкость, разнообразие свойств и типов изделий позволяют использовать керамические материалы в различных областях строительства: для возведения стен, облицовки наружных и внутренних помещений, тепло-

изоляции и др. Сохранение тепла внутри жилища волновало человечество во все времена, особенно в климатических районах с продолжительной, холодной зимой. Такая природа характерна для большей части территории современной России. На количество теплопотерь в первую очередь влияют теплофизические показатели наружного ограждения

строительных объектов. И если оптимизация формы зданий с точки зрения сокращения площади ограждающей поверхности прежде всего задача архитекторов, то за увеличение общего термического сопротивления стены отвечают строители-материаловеды.

В XXI в. в связи с ужесточением нормативных требований к тепловой защите зданий большинство стеновых материалов оказались непригодными при строительстве традиционных однослойных наружных стен классической толщиной 350–770 мм [1, 2]. В результате для большей части территории России необходимая расчетная толщина однослойных наружных стен из легкого бетона, силикатных или керамических материалов должна составлять не менее 1–1,5 м, что с точки зрения здравого смысла совершенно неприемлемо как по материальным затратам, так и по трудоемкости возведения стен. Поэтому к середине 20-х гг. строительная индустрия вынуждена выходить из сложившейся ситуации в основном за счет возведения многослойных ограждающих конструкций с использованием эффективного утепляющего слоя. Однако практика эксплуатации таких стен показала, что разработанные конструктивные решения имеют ряд проблем, связанных прежде всего с разными показателями термического коэффициента линейного расширения материалов слоев. Существенное значение также имеют сложности организации совместной работы слоев из разных материалов, перенос плоскости точки росы внутрь стены и др. Указанные проблемы приводят к сокращению периода работоспособного состояния стеновых конструкций и в конечном итоге к снижению долговечности и надежности зданий в нормативные сроки эксплуатации [3–5].

Таким образом, поиск и разработка новых конструкционно-теплоизоляционных стеновых материалов, обеспечивающих требуемую теплозащиту зданий при устройстве однослойных стен, является одной из актуальных задач современного строительства.

К сожалению, сегодня при большом разнообразии теплоэффективных строительных материалов массовое производство эффективного и условно-эффективного керамического кирпича со средней плотностью менее 1000–1200 кг/м³ практически отсутствует. Фактически эту область в линейке керамической продукции занимают так называемые теплые блоки крупного формата. Как правило, такие изделия имеют щелевые пустоты, заполненные в заводских условиях эффективным утеплителем с волокнистой или ячеистой структурой [6–8]. По теплотехническим характеристикам керамические блоки имеют высокие показатели (приведенный коэффициент теплопроводности порядка 0,18–0,24 Вт/(м·°C)) и могут использоваться при устройстве однослойных наружных стен в большей части территории России.

В последние годы ведутся активные разработки технологии ячеистых керамических материалов [9–12], однако широкого практического применения они

пока не получили. Одним из основных недостатков указанных керамических материалов является высокое водопоглощение и, как следствие, их низкая морозостойкость, что приводит к преждевременному разрушению наружных стен, особенно при эксплуатации в условиях резко континентального климата, и ограничивает их применение без организации специальных защитных мероприятий [13].

По мнению авторов, решением обозначенной проблемы керамических материалов с ячеистой структурой может стать организация матрицы, обеспечивающей при обжиге формирование тонкой водонепроницаемой оболочки на внутренней поверхности поровых ячеек, препятствующей проникновению влаги в поровое пространство.

Предварительные эксперименты по получению керамики с использованием гранулированного пено-стекла показали снижение водопоглощения у обожженных образцов до 8–9% по сравнению с обычной ячеистой керамикой, имеющей водопоглощение 15–17% [14]. Описание полученных результатов, внешний вид образцов, их макро- и микроструктура приведены в работе [9].

Цель настоящего исследования заключалась в оценке эффективности ячеистых керамических материалов с матричной структурой для возможного применения в наружных стенах зданий однослойной конструкции.

Методы и объекты исследования

В результате ранее проведенных исследований авторами разработана методика изготовления эффективных и условноэффективных (по требованиям ГОСТ 530–2012 «Кирпич и камень керамические. Общие технические условия») стеновых керамических изделий из глинистого сырья и гранулированного пеностеклокристаллического материала:

– на первом этапе стеклогранулы увлажняются и активно перемешиваются с сухим тонкодисперсным глинистым сырьем в турболопастном смесителе-грануляторе;

– на втором этапе из опудренных стеклогранул методом полусухого прессования формируются сырцовые изделия;

– на третьем этапе в результате сушки и обжига формируется ячеистая керамика с матричной структурой, имеющая среднюю плотность 900–1200 кг/м³.

В качестве керамического сырья для приготовления шихты использовались бердская глина (Бердское месторождение, Новосибирская обл.) и гранулированный пеностеклокристаллический материал из кремнеземистых пород опытного производства (г. Челябинск) [15].

Глинистая компонента шихты для изготовления эффективных керамических материалов относится к умереннопластичному полиминеральному сырью с высоким содержанием красящих оксидов (Fe₂O₃+TiO₂ более 9%). По количеству глинозема глина принадлежит к группе полуокислого сырья

Таблица 1
Table 1

Гранулометрический состав сырьевых материалов
Granulometric composition of raw materials

Вид сырья	Содержание фракций в %, размер частиц в мм					Классификация по ГОСТ 9169–75
	>0,06	0,06–0,01	0,01–0,005	0,005–0,001	<0,001	
Глинистое сырье	2,73	37,53	22,23	33,38	4,13	Низкодисперсное
ГПС	Частные остатки в %, на ситах размером отверстий, мм					
	2,5	1,25	0,63	0,315	0,14	Дно
	0	5,3	84,5	8,6	1,6	0

Таблица 2
Table 2

Химический состав сырьевых материалов
Chemical composition of raw materials

Вид сырья	Массовая доля компонентов, %										
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	MnO	ППП	Примеси
Глинистое сырье	56,11	14,09	8,23	7,72	3,28	0,47	2,96	0,81	0,18	0	6,14
ГПС	78,43	7,81	4,45	0,22	–	7,89	0,45	–	–	–	

(Al₂O₃ около 14%), по минеральному составу примесей содержит включения кварца, железистых минералов, обломки горных пород и карбонатные конкреции.

Порообразующая компонента шихты представляет собой гранулированное пеностекло (ГПС) с фракционным составом -2,5+0,14 мм. По фазовому составу ГПС содержит рентгеноаморфную фазу, кварц и полевые шпаты, преимущественно анортитовой природы. Гранулометрический и химический составы сырьевых материалов представлены в табл. 1, 2.

Результаты комплексного исследования сырьевых материалов, включая оценку их технологических характеристик, показали, что они могут служить потенциальным алюмосиликатным сырьем для производства стеновой керамики [14].

При изготовлении керамических образцов с матричной структурой использовалась двухкомпонентная шихта следующего состава:

- гранулированное пеностекло – 75%;
- глинистое сырье – 25%.

Технологические параметры изготовления керамических образцов по описанной методике:

- формовочная влажность опудренных гранул – 10–11%;
- давление прессования – 5 МПа;
- температура обжига – 900°C.

Состав шихты и технологические параметры изготовления ячеистых керамических образцов с матричной структурой были выбраны по результатам экспериментальных исследований, приведенных в работе [16].

Обсуждение результатов

В соответствии с целью и задачами исследований в настоящей работе были проведены расчеты толщи-

ны и оценка теплозащитных характеристик кирпичной наружной стены из разработанных эффективных и условноэффективных керамических материалов с матричной структурой.

Как правило, уменьшение средней плотности строительных изделий приводит к снижению их прочностных параметров, а высокое водопоглощение, часто связанное с открытой пористостью ячеистого материала, приводит к снижению его морозостойкости, несмотря на наличие резервных пор или ячеек. Использование качественного пустотелого (со щелевыми пустотами) керамического кирпича в качестве наружного лицевого слоя при кладке стены часто приводит к его разрушению. При этом происходит отшелкивание внешнего слоя кирпича толщиной 4–6 мм, в результате чего уже через несколько лет эксплуатации зданий происходит разрушение лицевой кладки [17].

По мнению авторов, указанная проблема может быть решена за счет устройства лицевого слоя кладки из строительного клинкерного кирпича (ГОСТ 530–2012), о чем свидетельствует сложившаяся строительная практика последних лет. Особенно актуально использовать данный прием в условиях резко континентального климата с холодной и продолжительной зимой. Такие природные условия характерны для обширной территории Сибири и Дальнего Востока России. С учетом приведенных доводов в настоящей работе была предложена стеновая конструкция наружной стены, показанная на рис. 1. Внутренний слой состоит из ячеистого керамического кирпича с матричной структурой и имеет толщину, обеспечивающую требуемое термическое сопротивление наружного ограждения в зависимости от района строительства. Наружный слой состоит из стенового клинке-

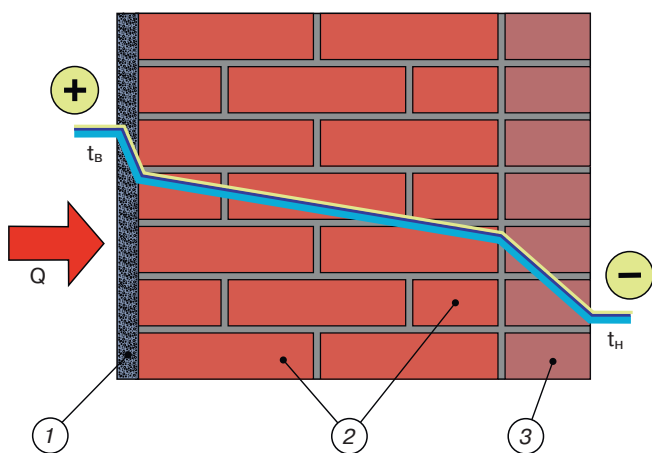


Рис. 1. Конструктивное решение стенового ограждения: 1 – цементно-песчаный раствор; 2 – ячеистая керамика с матричной структурой; 3 – клинкер
Fig. 1. Constructive solution of the wall fencing: 1 – cement-sand mortar; 2 – cellular ceramics with a matrix structure; 3 – clinker

ра и имеет толщину половины стандартного кирпича, равную 120 мм.

По нормативным данным (СП 50.13330.2012 «Тепловая защита зданий»), требуемое термическое сопротивление стены из эффективных керамических материалов $R_{\text{нec.сл}}^{\text{TP}}$ определяется по формуле:

$$R_{\text{нec.сл}}^{\text{TP}} = R_{\text{red}} - (R_{\text{int}} + R_1 + R_2 + R_3 + R_{\text{ext}}),$$

где R_{int} – сопротивление теплообмену на внутренней поверхности стены; R_{ext} – сопротивление теплообмену на наружной поверхности стены; R_{red} – нормативное сопротивление теплопередаче стены; R_1, R_2, R_3 – термическое сопротивление конструктивных слоев (рис. 1).

Для оценки эффективного слоя (рис. 1, поз. 2) в лабораторных условиях разработанным способом были получены ячеистые керамические материалы с матричной структурой и проведены исследования их физико-механических свойств. Усредненные эксплуатационные характеристики материалов конструктивных слоев по результатам собственных исследований и справочно-нормативным данным представлены в табл. 3.

С учетом полученных значений теплопроводности ячеистой керамики с матричной структурой (коэффициент теплопроводности 0,21–0,23 Вт/(м·°C))

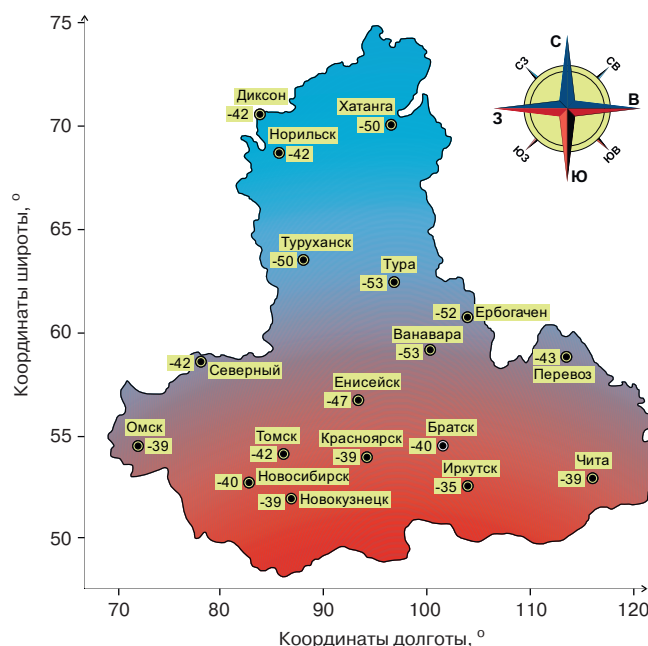


Рис. 2. Карта Сибирского региона России с указанием расчетных зимних температур для расчета толщины условно однослойных наружных стен из эффективных керамических материалов с матричной структурой
Fig. 2. Map of the Siberian region of Russia indicating the calculated winter temperatures for calculating the thickness of conventionally single-layer external walls made of efficient ceramic materials with a matrix structure

расчетным способом была оценена возможность устройства условно однослойных наружных стен (без учета защитного слоя из клинкера, термическим сопротивлением которого можно пренебречь) для отапливаемых гражданских зданий. Оценка проводилась на примере Сибирского региона России (рис. 2), характеризующегося преимущественно резко континентальным климатом и, как уже отмечалось в начале статьи, длительной и холодной зимой.

Согласно нормативным значениям (СП 131.13330.2020 «Строительная климатология») для наиболее значимых населенных пунктов региона были определены климатические параметры расчета толщины наружных стен из эффективных керамических материалов с матричной структурой, представленные в табл. 4.

Для расчета были приняты нормативные расчетные температуры наиболее холодных пяти суток обеспеченностью 0,98. Анализ климатической картины

Таблица 3
Table 3

Физико-механические свойства материалов конструктивных слоев наружного стенового ограждения по рис. 1
Physical and mechanical properties of the materials of the structural layers of the outer wall fencing according to Fig. 1

№ конструктивного слоя	Материал	Прочность при сжатии, МПа	Средняя плотность, кг/м ³	Водопоглощение, %	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°C)
1	Цементно-песчаный раствор	10–15	1600–1800	12–14	0,5–0,6
2	Ячеистая керамика с матричной структурой	12,3–15	900–1100	9–11	0,21–0,23
3	Стеновой клинкер	30–80	1900–2100	6–8	0,9–1,2

**Таблица 4
Table 4**

Климатические параметры по Сибирскому региону для расчета толщины условно однослойных наружных стен из эффективных керамических материалов с матричной структурой
Climatic parameters for the Siberian region for calculating the thickness of conditionally single-layer external walls made of effective ceramic materials with a matrix structure

Населенный пункт	Температура воздуха наиболее холодной пятидневки, °С, обеспеченностью 0,98	Температура отопляемого периода, °С	Продолжительность отопляемого периода, сут
Омск	-39	-8,1	216
Новокузнецк	-39	-6,6	223
Красноярск	-39	-6,6	234
Новосибирск	-40	-7,9	222
Томск	-42	-7,8	233
Иркутск	-35	-7,6	249
Братск	-40	-8,4	248
Енисейск	-47	-9,1	246
Северный	-42	-7,8	233
Чита	-39	-11,2	238
Ванавара	-53	-13,8	261
Ербогачен	-52	-15	262
Туруханск	-50	-13	274
Тура	-53	-17	270
Хатанга	-50	-17,7	303
Диксон	-42	-11,2	366
Норильск	-42	-11,2	366

**Таблица 5
Table 5**

Результаты расчета требуемой толщины слоя из ячеистой керамики с матричной структурой для наружного стенового ограждения по рис. 1
Calculation results of the required thickness of a layer of cellular ceramics with a matrix structure for an external wall fence according to Fig. 1

Населенный пункт	Требуемое термическое сопротивление $R_{тр}$, м ² ·°С/Вт	Минимальная толщина слоя эффективного керамического материала с матричной структурой $\lambda=0,23$ Вт/(м·°С), мм
Омск	3,44	0,71
Новокузнецк	3,56	0,737
Красноярск	3,6	0,747
Новосибирск	3,7	0,77
Томск	3,75	0,781
Иркутск	3,79	0,79
Братск	3,89	0,813
Енисейск	3,93	0,822
Северный	4,01	0,841
Чита	4,06	0,852
Ванавара	4,49	0,951
Ербогачен	4,61	0,979
Туруханск	4,61	0,979
Тура	4,9	1,046
Хатанга	5,4	1,161
Диксон	5,41	1,163
Норильск	5,41	1,163

Таблица 6

Table 6

Требуемые характеристики стенового ограждения из ячеистой керамики с матричной структурой для условно выделенных климатических зон Сибирского федерального округа по рис. 3
Required characteristics of a wall enclosure made of cellular ceramics with a matrix structure for conventionally identified climatic zones of the Siberian Federal District according to Fig. 3

№ климатической зоны	Средняя плотность, кг/м ³	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°С)
I	950–1000	0,22–0,23
II	800–950	0,21–0,22
III	650–800	0,2–0,21
IV	650	0,19–0,2

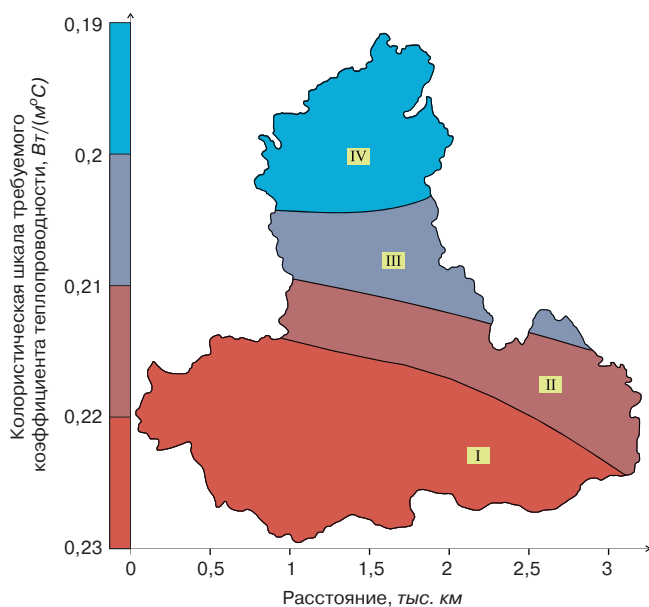


Рис. 3. Схема зонирования территории Сибирского региона по требуемым теплотехническим характеристикам ячеистой керамического материала с матричной структурой для устройства однослойных наружных стен толщиной 640–770 мм

Fig. 3. Zoning scheme of the territory of the Siberian region according to the required thermal characteristics of a cellular ceramic material with a matrix structure for the installation of single-layer external walls with a thickness of 640–770 mm

региона показал, что в зависимости от широты расчетная температура для различных городов Сибири изменяется в широком диапазоне (от -55 до -37°C). При этом продолжительность отопляемого периода по городам меняется незначительно (табл. 4) и в общем для региона составляет почти две трети года (в среднем 236 сут).

В качестве расчетных характеристик для эффективного слоя из ячеистой керамики с матричной структурой были выбраны усредненные теплофизические параметры керамического материала: средняя плотность – 1100 кг/м^3 ; коэффициент теплопроводности – $0,23 \text{ Вт/(м}\cdot^{\circ}\text{C)}$. При расчетах общего термического сопротивления конструкции наружной стены (рис. 1) для всех населенных пунктов Сибирского региона (рис. 2) толщина наружного защитного слоя из клинкерной керамики и внутреннего штукатурного слоя из цементно-песчаного раствора была принята постоянной и составила соответственно 120 и 30 мм. Результаты расчета требуемого термического сопротивления наружного стенового ограждения и минимальной толщины слоя эффективного керамического материала с матричной структурой приведены в табл. 5.

В результате анализа полученных расчетных данных установлено, что для обеспечения требуемого режима энергосбережения в отопляемых зданиях толщина слоя эффективной керамики должна быть в пределах 0,7–1,2 м в зависимости от населенного пункта Сибирского региона. И это без учета толщины защитных слоев, суммарная толщина которых составляет 0,15 м, что дополнительно увеличивает общую толщину стенового ограждения практически до одно-

го метра и более. Таким образом, для строительства зданий в Сибири с кирпичными стенами общепринятой толщины 640–770 мм (2,5–3 кирпича стандартного формата 1 НФ) необходимо уменьшать значение коэффициента теплопроводности ячеистой керамики с матричной структурой ниже $0,23 \text{ Вт/(м}\cdot^{\circ}\text{C)}$.

Принимая во внимание вышеизложенное и проводя теплотехнические расчеты с заданной толщиной наружной стены 640 и 770 мм, можно условно выделить в Сибирском федеральном округе четыре климатические зоны (рис. 3) с требуемыми физико-механическими характеристиками ячеистой керамического материала (табл. 6).

Заключение

В результате оценки эффективности ячеистых керамических материалов с матричной структурой, проведенной с целью возможного их использования в зданиях с наружными стенами однослойной конструкции, установлено следующее:

- полученные образцы ячеистой керамики с матричной структурой имеют среднюю плотность $950\text{--}1000 \text{ кг/м}^3$, теплопроводность для кладок с минимально достаточным количеством кладочного раствора $0,22\text{--}0,23 \text{ Вт/(м}\cdot^{\circ}\text{C)}$ и по теплотехническим характеристикам изделий относятся (табл. 1, ГОСТ 530–2012) к группе повышенной эффективности. Требуемое термическое сопротивление ограждающей конструкции из этих материалов при возведении однослойных наружных стен толщиной 640–770 мм обеспечивается только на территории юга Сибири (рис. 3, поз. I);

- для центральной области и северного района Сибири необходимо повышение эффективности керамических материалов с матричной структурой до значений $700\text{--}800 \text{ кг/м}^3$ (группа изделий высокой эффективности), при этом сохранение их прочностных характеристик (минимальная прочность при сжатии 10 МПа) становится весьма проблематичным. В северном районе (рис. 3, поз. IV) необходимо

использовать многослойную конструкцию стены с эффективным утеплителем и применять для ее устройства общепринятые теплоизоляционные материалы со средней плотностью 450–500 кг/м³ и менее.

Список литературы

1. О некоторых мерах по повышению энергетической и экологической эффективности российской экономики: Указ Президента РФ от 4 июня 2008 года № 889. Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. Режим доступа: <http://docs.cntd.ru> (дата обращения 13.05.2019).
2. Гагарин В.Г., Козлов В.В. Требования к теплозащите и энергетической эффективности в проекте актуализированного СНиП «Тепловая защита зданий» // *Жилищное строительство*. 2011. № 8. С. 2–6.
3. Ярмаковский В.Н., Костин А.Н., Фотин О.В., Кондюрин А.Е. Теплоэффективные наружные стены зданий, возводимые с использованием монолитного полистиролбетона с высокопоризованной и пластифицированной матрицей // *Жилищное строительство*. 2014. № 6. С. 18–24.
4. Блажко В.П. Наружные многослойные стены с облицовкой из кирпича в монолитных зданиях // *Жилищное строительство*. 2009. № 8. С. 6–8.
5. Давидюк А.Н., Несветаев Г.В. Эффективные материалы и конструкции для решения проблемы энергосбережения зданий // *Жилищное строительство*. 2010. № 3. С. 16–21.
6. Keller: сайт производителя ячеистых строительных материалов: сайт. Германия, 2021. URL: <https://www.keller.de/ru/ics/oborudovanye-dlja-zapolneniya-keramyczeskoho-kyrpycza/№8> (дата обращения: 21.01.2021).
7. Проскуровскис А., Назинян Л.Г., Тарасова А.А., Беляева С.В. Энергоэффективный стеновой керамзитобетонный блок // *Строительство уникальных зданий и сооружений*. 2019. № 3. С. 23–33.
8. Роговой М.И. Технология искусственных пористых заполнителей и керамики. М.: Стройиздат, 1974. 315 с.
9. Столбоушкин А.Ю., Фомина О.А. Влияние температуры обжига на формирование структуры ячеистой керамики со стеклокристаллическим каркасом // *Строительные материалы*. 2019. № 4. С. 20–26. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-769-4-20-26>
10. Патент РФ 2593832. Способ изготовления стеновых керамических изделий / Иванов А.И., Столбоушкин А.Ю., Стороженко Г.И. 2016. Бюл. № 22. С. 9.
11. Семёнов А.А. Российский рынок керамического кирпича. Тенденции и перспективы развития // *Строительные материалы*. 2020. № 12. С. 4–5. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-787-12-4-5>

Снижение средней плотности ячеистой керамики с матричной структурой до значений 900 кг/м³ и менее при сохранении требуемых прочностных показателей керамических изделий делает перспективным продолжение научных исследований.

References

1. On some measures to improve the energy and environmental efficiency of the Russian economy: Decree of the President of the Russian Federation of June 4, 2008 No. 889. Electronic Fund of Legal and Regulatory Technical Documents. Access mode: <http://docs.cntd.ru>, free (date of circulation 13.05.2019). (In Russian).
2. Gagarin V.G., Kozlov V.V. Requirements for heat protection and energy efficiency in the project of the updated SNiP “Thermal protection of buildings. *Zhilishchnoe Stroitel'stvo* [Housing Construction]. 2011. No. 8, pp. 2–6. (In Russian).
3. Yarmakovskiy V.N., Kostin A.N., Fotin O.V., Kondyurin A.Ye. Heat-efficient external walls of buildings erected using monolithic polystyrene concrete with highly porous and plasticized matrix. *Zhilishchnoe Stroitel'stvo* [Housing Construction]. 2014. No. 6, pp. 18–24. (In Russian).
4. Blazhko V.P. External multilayer walls with brick lining in monolithic buildings *Zhilishchnoe Stroitel'stvo* [Housing Construction]. 2009. No. 8, pp. 6–8. (In Russian).
5. Davidyuk A.N. Efficient materials and structures to solve the problem of energy saving of buildings *Zhilishchnoe Stroitel'stvo* [Housing Construction]. 2010. No. 3, pp. 16–21. (In Russian).
6. Keller: site of the manufacturer of cellular building materials: site. Germany. 2021. URL: <https://www.keller.de/ru/ics/oborudovanye-dlja-zapolneniya-keramyczeskoho-kyrpycza/№8> (date of circulation 21.01.2021).
7. Proskurovskis A. Energy efficient wall expanded clay concrete block. *Stroitel'stvo unikal'nykh zdaniy i sooruzheniy*. 2019. No. 3, pp. 23–33. (In Russian).
8. Rogovoy M.I. *Tekhnologiya iskusstvennykh poristykh zapolniteley i keramiki* [Technology of artificial porous aggregates and ceramics]. Moscow: Stroyizdat. 1974. 315 p.
9. Stolboushkin A.Yu., Fomina O.A. Influence of burning temperature on the formation of the cellular structure ceramics with glass-ceramic frame. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2019. No. 4, pp. 20–26. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-769-4-20-26> (In Russian).
10. Patent RF 2593832. Sposob izgotovleniya stenovykh keramicheskikh izdeliy. Ivanov A.I., Stolboushkin A.Yu., Storozhenko G.I. 2016. Bulletin No. 22, p. 9. (In Russian).
11. Semenov A.A. Russian market of ceramic bricks. Development trends and prospects. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2020. No. 12, pp. 4–5. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-787-12-4-5>

12. Семёнов А.А. Некоторые тенденции в развитии рынка керамических стеновых материалов в России // *Строительные материалы*. 2022. № 4. С. 4–5. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-801-4-4-5>
13. Лаповская С.Д., Сиротин О.В., Гринфельд Г.И. Экспериментальное определение скорости выхода начальной влаги из кладки из автоклавного газобетона в климатических условиях г. Киева // *Строительные материалы*. 2015. № 8. С. 18–21.
14. Котляр В.Д., Козлов А.В., Котляр А.В. Высокоэффективная стеновая керамика на основе пористо-пустотелого силикатного заполнителя // *Научное обозрение*. 2014. № 10. С. 392–395.
15. Столбоушкин А.Ю., Иванов А.И., Шевченко В.В. и др. Исследование структуры и свойств ячеистых керамических материалов с каркасом из дисперсных кремнеземсодержащих пород // *Строительные материалы*. 2017. № 12. С. 7–13.
16. Котляр В.Д., Небежко Н.И., Терёхина Ю.В., Котляр А.В. К вопросу о химической коррозии и долговечности кирпичной кладки // *Строительные материалы*. 2019. № 10. С. 78–84. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-775-10-78-84>
17. Котляр В.Д., Терёхина Ю.В., Котляр А.В. Особенности свойств, применение и требования к клинкерному кирпичу // *Строительные материалы*. 2015. № 4. С. 72–74.
12. Semenov A.A. Some trends in the development of the ceramic wall materials market in Russia. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2022. No. 4, pp. 4–5. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-801-4-4-5>
13. Lapovskaya S.D. Experimental determination of initial moisture release rate from autoclave aerated concrete masonry in climatic conditions in Kyiv. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2015. No. 8, pp. 18–21. (In Russian).
14. Kotlyar V.D. Highly efficient wall ceramics based on porous-hollow silicate aggregate. *Nauchnoye obozreniye*. 2014. No. 10, pp. 392–395. (In Russian).
15. Stolboushkin A.Yu., Ivanov A.I., Shevchenko V.V. i dr. Study of the structure and properties of cellular ceramic materials with a framework of dispersed silica-containing rocks. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2017. No. 12, pp. 7–13. (In Russian).
16. Kotlyar V.D., Nebezsko N.I., Terexhina Yu.V., Kotlyar A.V. On the issue of chemical corrosion and durability of brick masonry. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2019. No. 10, pp. 78–84. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-775-10-78-84>.
17. Kotlyar V.D., Teryokhina Yu.V., Kotlyar A.V. Features of properties, application and requirements for clinker brick. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2015. No. 4, pp. 72–74. (In Russian).

НОВОСТИ

Форум ICID: заявить о проблемах, найти заказчиков в промышленном строительстве и проектировании

22 сентября 2022 года в Екатеринбурге Форум состоится международный форум по развитию промышленного строительства и проектирования Industrial construction/Industrial design (ICID forum – 2022) (онлайн – по всему миру). На сайте www.стройпромка.рф открыта регистрация.

Организаторами форума выступают СПО «Уральское объединение строителей», СПО «Лига проектных организаций», соорганизатор – федеральная электронная торговая площадка «ТЭК-Торг». Форум состоится при поддержке Ассоциаций «Национальное объединение строителей», «Национальное объединение изыскателей и проектировщиков», Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации, Министерства промышленности и торговли Российской Федерации; информационной поддержке специализированных СМИ.

Участниками форума должны стать проектировщики и строители (заказчики и подрядчики), которые работают в промышленном строительстве, проектировании.

Президент России поручил Правительству провести комплексную ревизию регулирования в промышленном строительстве. В Правительстве РФ заявили: к 2030 г. сроки строительства промышленных объектов должны сократиться на 40%, затраты на строительство – на 20%.

Каждый участник форума может заявить о том, какие проблемы препятствуют задачам, поставленным Президентом России и Правительством РФ, какие трудности мешают успешному развитию промышленного строительства и проектирования, в том числе в части взаимодействия заказчиков и подрядчиков? Какие меры, в частности, и на законодательном уровне, необходимо предпринять для решения системных проблем в строительстве и проектировании промышленных объектов? Все инициативы участников форума будут отражены в итоговой резолюции и оценены представителями исполнительных органов власти.

Спикеры форума расскажут о будущих объектах, видах работ, которые готовы передать для подряда, о требованиях к подрядчикам, работе тендерной системы. Среди спикеров – представители Минстроя и Минпромторга, компаний «Мечел», «НЛМК», «Уралэлектромедь», «Транснефть», «Иркутская нефтяная компания», «Камаз», «Алмаз Антей», «Пермские моторы», Ростелеком, «Талицкое молоко». Для обмена опытом с зарубежными заказчиками на форуме выступят представители Китая и «МТЗ-ХОЛДИНГ» (Беларусь).

Представитель Министерства промышленности и торговли Российской Федерации расскажет на форуме об итогах и планах по импортозамещению материалов и оборудования для строительства.



МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
«РАЗВИТИЕ КЕРАМИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ РОССИИ»

КЕРАМТЭКС

Главному форуму российских керамиков

20 лет!

The Main Forum of Russian Ceramists 20 Years Old!

15–16 июня 2022 г. в Ярославле успешно прошла XX Международная научно-практическая конференция «Развитие керамической промышленности России: КЕРАМТЭКС-2022». Несмотря на очень сложные внешнеполитические условия и непростую экономическую ситуацию на конференцию приехали более 170 руководителей и ведущих специалистов кирпичных заводов, представителей машиностроительных и инженеринговых компаний, ученых отраслевых исследовательских и учебных институтов из 31 региона России, Беларуси, Казахстана и Италии. Двадцать лет – немалый срок как в жизни человека, так и в жизни организации или средства массовой информации. Жизнь меняется, выполняются одни поставленные задачи, ставятся новые. Поэтому не так много «долгоиграющих» проектов, особенно в сфере профессиональных коммуникаций. КЕРАМТЭКС является именно таким проектом-долгожителем, за двадцать лет не только не утратившим значения для подотрасли строительной керамики и интереса специалистов, но развивающимся в соответствующих с меняющимися внешними условиями. Его инициатором и бессменным организатором является научно-технический и производственный журнал «Строительные материалы»®.

Журнал «Строительные материалы»® – организатор КЕРАМТЭКС

Журнал «Строительные материалы» был создан в 1955 г. как информационный орган Министерства промышленности строительных материалов СССР. С первых лет существования он стал проводником технической политики в отрасли, отражая новое в науке и технике, рассказывая о людях, работающих в промышленности и строительной науке.

В 1992 г. в связи с реформированием структуры государственной исполнительной власти и ликвидацией отраслевых министерств учредителем журнала стала рекламно-издательская фирма «Стройматериалы». С этого времени начался новый этап развития журнала в новых экономических условиях. В 2002 г. Федеральный институт промышленной собственности присвоил товарный знак журналу «Строительные материалы»®, что является признанием журнала как советского бренда, высокой ценности научной, технической и экономической информации, сконцентрированной на его страницах.

Керамические стеновые материалы во все времена были основными материалами для возведения стен, производство кирпича – одной из главных тем журнала.

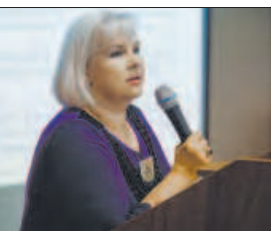
В течение десятилетий по-разному складывалась судьба кирпичной промышленности. В 1970–1980-е гг. в стране строились крупные заводы на базе отечественных разработок и приобретаемые по импорту в Болгарии, Италии, Франции, Германии. В области керамических материалов работали научно-исследовательские и проектные институты России, Белоруссии, республик Прибалтики, на Украине.

С распадом СССР, прекращением существования отраслевых министерств, разрушением вертикали административно-хозяйственного управления во всех сферах материального производства, в сложившихся за многие годы подотраслях промышленности начались процессы децентрализации, которые привели в том числе к разобщению специалистов, утрате привычных путей обмена информацией. В этих условиях отраслевой научно-технический и производственный журнал остался одним из немногих связующих звеньев между производителями оборудования и материалов, проектировщиками и строителями в условиях новых экономических реалий.

В 2003 г. по инициативе редакции журнала «Строительные материалы»® при поддержке Госстроя РФ была проведена первая научно-практическая конференция «Перспективы развития керамической промышленности России».



В.С. Неженец, заместитель председателя Правительства Ярославской области



Доклад главного редактора журнала «Строительные материалы»® Е.И. Юмашевой – об истории КЕРАМТЭКС и его значении для профессионального сообщества российских керамиков





Борис Васильевич Талпа, канд. геол.-мин. наук, заведующий лабораторией «Технологической минералогии и новых видов минерального сырья» ЮФУ, постоянный автор журнала «Строительные материалы»® и участник КЕРАМТЭКС, отмечает 70-летие.

Всю жизнь Борис Васильевич неумоимо совмещает преподавательскую и научную работу с полевыми экспедициями. Им была разработана новая методика прогнозирования неметаллических полезных ископаемых, которая принята для выполнения на всей территории РСФСР. В результате работ по этой методике на Юге России были разведаны месторождения мраморизованных известняков для облицовки зданий и сооружений, цементного сырья; Азербайджанское, Гойтхское, Пшадское, Николаевское и другие месторождения глинистого сырья. Эти месторождения являются минерально-сырьевой базой крупнейших цементных, кирпичных, керамзитовых и других заводов.

По технологии гиперпрессования, разработанной Борисом Васильевичем, с использованием оборудования испанской фирмы Hiperpress в России построено 19 кирпичных заводов в Норильске, Новосибирске, Кургане, Челябинске, Липецке, Сочи, Анапе и др.). Все разработки защищены патентами и авторскими свидетельствами.

Использование кремнистых пород для производства эффективного светлोजгущегося кирпича является разработкой Б.В. Талпа совместно с его учеником, д-ром техн. наук В.Д. Котляром. На ее основе в 2012 г. построен кирпичный завод в г. Новочеркасске, который успешно работает в настоящее время.

Коллекции песков со всего мира (более 300 образцов) и старинных кирпичей, собранные Борисом Васильевичем, активно используются при проведении учебных занятий и в научной работе студентов и аспирантов. Он автор уникальной кирпичной энциклопедии.



Поздравляем, дорогой Борис Васильевич! Многих Вам лет, бесчисленных путешествий и пополнения своих коллекций!

Эволюция КЕРАМТЭКС:

от конференции к международно-информационно-аналитическому проекту

Залог успешного длительного существования любого мероприятия в его постоянной тонкой настройке в соответствии с запросами целевой аудитории.

КЕРАМТЭКС начинался в традиционном формате конференции. Однако уже первая конференция выявила главную на то время проблему: за годы начала реформирования российской экономики практически перестало существовать отечественное машиностроение для кирпичной промышленности. Возможности оборудования, выпускаемого предприятиями Беларуси и Украины, существенно отставали от стремительно меняющихся потребностей рынка строительных материалов.

Поэтому уже в **2004 г.** журнал «Строительные материалы»® и КЕРАМТЭКС стали налаживать связи с зарубежными специализированными выставками оборудования и технологий для керамической промышленности, а также с зарубежными машиностроительными компаниями. Первыми такими партнерами стали выставка Tescargilla (Италия) и компания CERIC (Франция). Затем команда КЕРАМТЭКС стала постоянным участником выставок CERAMITEC (Германия), Ceratic China (Китай). А партнерами поездок на зарубежные заводы стали компании из Австрии, Германии, Греции, Испании, Италии, Китая, Португалии, Франции, Чехии.

В **2005 г.** было положено начало проведению выездных сессий конференции на отечественные кирпичные заводы. Участники конференции посетили ОАО «Стройполимеркерамика» в п. Воротынский Калужской обл. Специалисты познакомились с неоднократно реконструированной кирпичной линией фирмы «Униморандо», старой линией отечественного производства, а также с выпуском санитарно-технических изделий. С тех пор выездная сессия – неотъемлемая часть конференции КЕРАМТЭКС.

Пять лет конференция проводилась в Москве. Однако со временем столица стала тесновата для кирпичников, и в **2008 г.** началось путешествие КЕРАМТЭКС по стране. Первым городом, принявшим КЕРАМТЭКС, стал Санкт-Петербург, где коллеги познакомились с производством трех кирпичных заводов компании «ЛСР».

За 15 лет конференция состоялась в 14 городах России: Москве, Санкт-Петербурге, Казани, Краснодаре, Новосибирске, Омске, Ростове-на-Дону, Твери, Томске, Туле, Чебоксарах, Челябинске, Уфе, Ярославле. В общей сложности мы посетили почти 30 кирпичных заводов и два карьера (в Ростовской и Челябинской обл.).

В **2010 г.** развитием формата КЕРАМТЭКС стало проведение научно-технических семинаров, посвященных научным работам в области керамики и узким вопросам технологии. Первый семинар был проведен на базе Губского кирпичного завода (Краснодарский край).

В настоящее время научно-технический семинар развился в полноценный научный симпозиум «Наука – керамическому производству». В его работе принимают участие ведущие вузы и научные организации, работающие в области строительной керамики, а также технические специалисты кирпичных заводов.

Отдельно отметим *информационно-издательскую деятельность* в рамках КЕРАМТЭКС. В настоящее время без преувеличения можно сказать, что проект является главным катализатором и аккумулятором научно-технической информации. Ежегодно выходят тематические номера и тематические подборки статей в журнале «Строительные материалы»®, выпущено несколько дайджестов, включивших статьи по керамике ретроспективно за период с 1990 г., вышло два издания учебника «Химическая технология керамики» и практикум по технологии керамики. Ряд известных специалистов-керамиков доверили нашему издательству выпуск своих монографий.





Владимир Дмитриевич Котляр, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Строительные материалы» ДГТУ, член редакционного совета журнала «Строительные материалы»[®], постоянный участник конференции КЕРАМТЭК и симпозиума «Наука – керамическому производству», 14 июля 2022 г. отметил 60-летие со дня рождения.

Вся его профессиональная жизнь посвящена научной и преподавательской деятельности.

Под руководством В.Д. Котляра развивается одно из важных научных направлений – изучение и вовлечение в производство строительных материалов на территории России и стран СНГ камневидных пород – опок, аргиллитов, трепелов, диатомитов, материалов переработки терриконов.

Обладатель почетного звания «Лучший изобретатель Дона», Владимир Дмитриевич умеет заинтересовать студентов научной деятельностью, показать, что при должной настойчивости научные разработки востребованы отраслью. Под руководством В.Д. Котляра защищено пять кандидатских диссертаций. Сотрудники кафедры «Строительные материалы» под руководством В.Д. Котляра активно участвуют в хозяйственных работах с предприятиями России по вопросам оценки качества строительных материалов, изделий и конструкций, оценки полезных ископаемых при проведении геологоразведочных работ, строительно-технической экспертизы, экологической экспертизы, строительства и проектирования новых предприятий стройиндустрии.

В.Д. Котляр – автор 345 научных публикаций, многие из которых – в журнале «Строительные материалы»[®], в том числе пяти монографий, 34 патентов на изобретения и полезные модели, семи учебных пособий и более тридцати методических указаний.

Редакция и редакционный совет, коллеги – участники конференции КЕРАМТЭК, ученики поздравляют Владимира Дмитриевича с 60-летием и желают здоровья, благополучия и новых научных достижений, успешно внедренных в практику.



Много лет КЕРАМТЭК вручает коллегам памятные знаки «Признание профессионального сообщества». В 2022 г. такой памятный знак в категории «Технолог года» получил главный технолог Кирпичного завода «Ликолор» Д.А. Щетинин. Завод «Ликолор» коллеги посетили в рамках симпозиума «Наука – керамическому производству», состоявшегося в Новосибирске в феврале 2022 г.



КЕРАМТЭК и время перемен

XX конференция КЕРАМТЭК состоялась в жестких условиях нестабильности и неопределенности внешнеполитических и экономических условий. Казалось бы, с честью преодолен кризис, вызванный мировой пандемией, но беспрецедентное санкционное давление западных стран ставит перед промышленностью строительных материалов новые задачи.

Об этом говорил в приветствии участникам **В.С. Неженец**, заместитель председателя Правительства Ярославской обл., курирующий вопросы строительства, развития ЖКК, энергосбережения, тарифного регулирования и дорожного хозяйства.

Традиционно ожидаемая статистика от нашего постоянного партнера и неизменного докладчика, генерального директора «ГС-Эксперт» **А.А. Семёнова**.

Итоги 2021 г. На фоне восстановления объема работ во ввиду деятельности «Строительство» (+6% к 2020 г.) и ввода жилья (в 2021 г. введено 92,6 млн м², +12,7% к 2020 г., в том числе ИЖС – 49,1 млн м², что составляет 53%) снижается выпуск керамического кирпича (2021 г. – 5,16 млрд шт. усл. кирпича, -36% с 2014 г.), сокращается количество действующих кирпичных заводов, к 2021 г. их осталось всего 283.

Это обусловливается снижением доли кирпича в структуре материалов стен. Если в 2014 г. она составляла 35,4%, то в 2021 г. – 24,3%.

Начало 2022 г. было весьма оптимистичным, однако, несмотря на рост выпуска керамического кирпича в абсолютном выражении, доля его в структуре стеновых материалов продолжает неуклонно уменьшаться.

Растущий строительный рынок привел в 2021 г. к увеличению производства стеновых материалов, прежде всего АГБ, а также к существенному росту цен на стеновые материалы. Так, АГБ подорожал в среднем на 25%, керамический кирпич – на 22%, силикатный кирпич – на 13%.

Негативные тенденции отмечаются также в структуре потребления керамического кирпича по федеральным округам. Сибирский ФО до 2018 г. был лидером применения керамического кирпича. Его доля в структуре штучных стеновых материалов составляла 57%. В 2021 г. она снизилась до 35%. Аналогичная тенденция наблюдается во всех федеральных округах, кроме Поволжского, где доля керамического кирпича сохраняется на уровне 43%.

Конечно, участники конференции очень ждали прогнозные оценки развития отрасли на кратко- и среднесрочную перспективу. Алексей Анатольевич отметил, что *главная проблема и угроза в текущем моменте – высокая степень неопределенности*. Конечно, Минстрой разработал проект Стратегии развития строительной отрасли и ЖКХ, однако жизнь совершенно точно ее скорректирует.

Высока вероятность существенного снижения объемов строительства в ближайшие три года и не достижения плановых показателей по вводу жилья.

Санкционное давление, безусловно, окажет негативное влияние на технологическую устойчивость отрасли. Снизится доступность импортных запасных частей, технологического оборудования, сырьевых компонентов. С российского рынка полностью или частично уйдет ряд зарубежных производителей оборудования. Поиск альтернативных поставщиков или создание новых логистических схем займут время и неизбежно приведут к росту стоимости оборудования.

Тенденции в среднесрочной перспективе

- Сохранение высокого потребительского спроса в 2022 г. в связи с необходимостью завершения строительства существующих объектов.
- Снижение объемов строительства и спроса на керамический кирпич в 2023–2024 гг.
- Вероятное дальнейшее снижение доли применения КК в основном за счет АГБ
- Рост присутствия на российском рынке белорусских производителей
- Дальнейшее сокращение числа заводов-производителей керамического кирпича
- «Вымывание» среднего ценового сегмента из ассортиментных линеек предприятий.

Выездная сессия КЕРАМТЭК-2022 включала два кирпичных завода



Норский кирпичный завод (Ярославль) в 2022 г. отмечает 45-летие! Изначально он был задуман не просто как мощное автоматизированное предприятие, работающее на иностранном оборудовании. Это был своеобразный технологический полигон отрасли. Достаточно сказать, что в процессе создания завода в середине 1970-х гг. участвовало порядка 40 фирм из 11 стран. И многие из них стали на долгие годы надежными партнерами керамической промышленности России, а затем и постоянными участниками МИАП КЕРАМТЭК.

«Не стоять на месте и постоянно развиваться» – таков был главный принцип предприятия. Актуален он и сейчас, когда А.В. Сапегин сменил на посту генерального директора Ю.И. Марченко.

Участники конференции смогли оценить технические новшества, внедренные на предприятии за десять лет с момента нашего прошлого посещения завода.



Кирпичный завод «Клим Клинкер» (г. Нерехта Костромской обл.) – относительно молодое предприятие, хотя и создано на базе действующего с 2002 г. завода. Для возможности маневра при дальнейшей реконструкции завода по производству керамического кирпича было приобретено соседнее металлообрабатывающее предприятие с производственным корпусом и промышленными площадками.

В 2013 г. был проведен анализ и оценка представленных к продаже полностью укомплектованных линий по производству керамического кирпича на территории Германии. Выбор сделан в пользу производственной линии завода, принадлежавшего компании Wienerberger в городе Woldegk.

Важным аспектом при выборе стало наличие камерной сушилки, так как сырьевая база предприятия – местные высокочувствительные к сушке суглинки. Печь компании Keller длиной 150 м и относительно низкой высотой обжигового канала (высота пакета 1 м) позволяла обеспечить равномерность температуры по сечению печи и длине печи.

При реинсталляции технологической линии добавили два смесителя и дополнительные вальцы тонкого помола, при этом увеличили скорость работы отдельных единиц оборудования. Количество сушильных камер увеличили с 7 до 10 (расчетное время сушки местных суглинков не менее 52 ч). Также удлиннили печь. Теперь зона печи вмещает 32 вагонетки и 4 вагонетки в зоне подогрева. Система автоматизации реализована на базе продукции компании Omron.

К 2020 г. завод был готов к сдаче в эксплуатацию. Это оказалось сложное для отрасли и страны в целом время, но ни кризисы, ни пандемия не помешали осуществлению задуманного.

Завод Wienerberger (Woldegk) производил 20 млн шт. усл. кирпича, проектная мощность завода «Клим Клинкер» 38–39 млн шт. усл. кирпича, в настоящее время эта производительность практически достигнута.



Коллеги всегда с большим интересом посещают заводы.

Это расширяет профессиональный кругозор, дает пищу для размышлений и креатива на своих предприятиях.



В сложившихся условиях как никогда важен профессионализм и желание развивать производство, чутко реагировать на запросы рынка, совершенствовать маркетинг и логистику. Бесценен опыт передовых предприятий, который постоянно обсуждается на конференциях КЕРАМТЭКС.

А.О. Портнов, генеральный директор ООО «Кирпичный завод «Ликолор» (Новосибирск), поделился с коллегами своим видением состояния и перспектив отрасли. Он показал, что в кирпичной промышленности сформировался пул лидеров, составляющих примерно 10% всех работающих заводов, которые производят более половины всего выпускаемого кирпича. Отметим, что представители всех заводов-лидеров участвуют в конференциях КЕРАМТЭКС.

Кроме современного производственного оборудования важнейшее значение, по мнению Александра Олеговича, имеет научная организация производства и сбыта. Маркетинг должен диктовать производству ассортимент продукции. Технологи и ИТР должны оптимизировать производственную себестоимость. Все вместе составляет систему менеджмента качества, обеспечивающую максимальную рентабельность при минимальных затратах. Только так можно успешно конкурировать с менее энергозатратными продуктами на строительном рынке.

Введение санкций со стороны западных стран остро поставило перед отраслью вопрос не только приобретения нового технологического оборудования, но и обеспечения запасными частями, так как в последние десятилетия предприятия практически полностью перешли на импортное оборудование. Однако запрет поставлять оборудование российским предприятиям негативно отразился и на деятельности зарубежных компаний. Многие из них ищут законные способы остаться на российском рынке.

Представитель испанской компании TALLERES FELIPE VERDES S.A. **И.А. Катинас**, также постоянный участник КЕРАМТЭКС, представил новые разработки компании и особое внимание уделил возможности продолжения сотрудничества с российской промышленностью в условиях санкций.

Об импортозамещении и отечественном инжиниринге в ситуации санкционного давления говорил директор ООО «Хендле Урал» (Челябинск) **В.Ю. Кузьмин**.

Компания «ИНТА-Строй» (Омск) давно сотрудничает с керамической промышленностью. На конференции специалисты компании представили заводчанам лопастной экструдер, который может стать альтернативой шнековым прессам.

Ремонтно-механический завод «НИХАРД-СЕРВИС» (г. Златоуст Челябинской обл.) изготавливает запасные части из износостойких легированных сталей, высоколегированных чугунов и износостойких сталей собственной разработки. Менеджер компании **Ю.С. Буянова** представила, в частности, новую разработку – лопатки смесителей с высокоизносостойким покрытием, ресурс которых на 300–700% выше, чем у обычных лопаток. Кроме того, за счет оптимального профиля лопатки снижается нагрузка на привод (редуктор).

Проектирование и расчет тепловых агрегатов для кирпичных заводов предлагает ООО «КОМАС» (Москва).

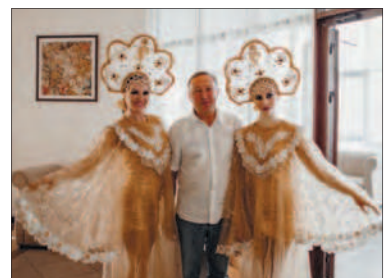
Производятся в России и огнеупоры для обжиговых печей (доклады **В.И. Кузина**, генерального директора ЗАО «ПКФ «НК», г. Старый Оскол Белгородской обл.; **С.Ю. Лебедева**, директора по развитию АО «Сухоложский огнеупорный завод», г. Сухой Лог Свердловской обл.).

Компания «АБУКО-сервис» (Уфа) готова предложить российским кирпичникам роботизированные комплексы на базе отечественных роботов. Робототехнические комплексы универсальны: наклеивают этикетки на поддоны с готовой продукцией, укладывают кирпичи с вагонеток на конвейер, компонуют в пакеты и укладывают продукцию на паллеты. Вложения в робототехнику окупаются за 2–3 года. Конечно, наши ученые подготовили к конференции новые работы.

Подводя итоги XX Международной научно-практической конференции «Развитие керамической промышленности России: КЕРАМТЭКС-2022» можно констатировать, что предстоящие трудности отрасль преодолеет. Как всегда. И КЕРАМТЭКС, как всегда, будет объединять профессионалов, что, как известно, гарантирует успех.



Росарио Полумбо, представитель итальянской компании BONGIOANNI MACCINE S.p.A., (слева) был единственным участником из европейских стран. Справа – Тамара Русских, региональный представитель компании



ОСТАВАЙТЕСЬ ВМЕСТЕ! ОСТАВАЙТЕСЬ С НАМИ!





НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ КЕРАМИКИ

Представляем современную лабораторию исследования глинистого сырья, способную решать самые сложные технологические вопросы в производстве стеновой и кровельной керамики. Лаборатория оснащена современным оборудованием, многочисленными стандартными и вновь разработанными методиками проведения испытаний.

Институт выполняет работы:

- ◆ Испытание глин, разработка составов шихты и основных технологических параметров производства керамического лицевого кирпича, крупноформатных изделий, плитки «под кирпич» и черепицы, стенового и дорожного клинкера методами пластического и жесткого формования.
- ◆ Анализ технологии керамических изделий с использованием современных приборов и методов контроля технологических процессов и разработка решений по повышению качества выпускаемой продукции и методов интенсификации работы предприятий.
- ◆ Разработка системы контроля технологического процесса, входного контроля сырья, системы контроля качества готовой продукции и др.
- ◆ Разработка производственной НТД (технологические регламенты, производственно-технические инструкции и др.), рекомендаций по организации лаборатории предприятия.
- ◆ Решение различных технологических задач:
 - составление рекомендаций по разработке карьера на основании анализа данных геологоразведки и результатов исследования глинистого сырья;
 - исследование глин и технологического оборудования с целью устранения дефектов массоподготовки, формовки, сушки и обжига;
 - испытание глин для получения лицевого кирпича различных цветовых тонов;
 - исследование карбонатсодержащих глин с целью устранения отколов на кирпиче;
 - исследование техногенных отходов и природных добавок, разработка составов шихты с их использованием;
 - исследование образования высолов на поверхности кирпича и разработка предложений по их устранению;
 - множество других технологических задач.

Для строительства новых заводов выполняем сопровождение проектов, включающее:

- ◆ Оказание помощи в выборе месторождения глинистого сырья, анализ данных геологоразведки месторождения, отбор представительных технологических проб и др.
- ◆ Испытание глины на пригодность для изготовления кирпича, поризованных изделий, плитки «под кирпич» и черепицы, стенового и дорожного клинкера, разработка составов шихты и основных технологических параметров, прогнозирование основных физико-технических свойств изделий.
- ◆ Оказание помощи в разработке ассортимента выпускаемой продукции, составлении бизнес-плана, предпроектных предложений.
- ◆ Подготовка технического задания поставщику оборудования, подготовка и проведение тендера по выбору поставщика, техническая экспертиза коммерческих предложений по поставке оборудования (состав, назначение, технические характеристики и т. д.), рекомендации по комплектации оборудованием.
- ◆ Согласование и участие в проектировании технологической части проекта.
- ◆ Участие в пусконаладочных работах.
- ◆ Технологическое сопровождение предприятий после пуска.

В настоящее время нами реализуются проекты:

- ◆ Разработка технологии сухой подготовки глин, содержащих крупные высокоактивные карбонатные включения с целью полного устранения отколов на кирпиче, разработка оборудования и его поставка, проектирование технологической линии, технологическое сопровождение;
- ◆ Разработка технологии подготовки опилок, проектирование, подбор оборудования, технологическое сопровождение;
- ◆ Разработка технологии подготовки отходов целлюлозно-бумажной промышленности (скопа), подбор оборудования, проектирование технологическое сопровождение.

Сотрудничество с заводами по долгосрочным договорам, включающее:

- ◆ Консультации по технологии производства керамического кирпича, сырьевым материалам, ассортименту продукции, анализу причин недостаточного качества готовой продукции и др. для технолога предприятия в том числе оперативно (по телефону, электронной почте).
- ◆ Разработку рекомендаций и методов улучшения качества продукции, а также снижения затрат на производство продукции в части рационального использования свойств глинистого сырья и возможностей оборудования.
- ◆ Дополнительные исследования глинистого сырья и добавок, подтверждение свойств сырья новых участков добычи, разработку новых видов продукции (цвет, фактура, пористость) и др.
- ◆ По другим вопросам технологии производства по согласованию между Заказчиком и Исполнителем.

За дополнительной информацией о содержании работ, сроках и стоимости их выполнения обращайтесь по электронной почте или по телефонам.

140165, РФ, Московская область, Раменский район, п. Гжель, адм. здание ОАО ГКЗ

тел. +7(496) 465-88-13, моб. 8-916-561-00-10

http: niikeram.ru, e-mail: niikeram@mail.ru

Генеральный директор Езерский Владимир Александрович

Г.В. БОЛДЫРЕВ¹, канд. техн. наук; Г.И. СТОРОЖЕНКО^{2,3}, д-р техн. наук;
М.А. ЧЕРНЕЙКИН³, инженер (аспирант)

¹ ООО «ГЕО-С» (г. Новокузнецк)

² Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (630008, г. Новосибирск, ул. Ленинградская, 113)

³ Сибирский государственный индустриальный университет (654007, Кемеровская обл., Кузбасс, г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

Особенности сырьевой базы Кузбасса для производства керамического кирпича

В Кемеровской области, кирпичные заводы которой не являются лидерами отрасли грубой керамики, в качестве сырьевой базы можно рассматривать как природные месторождения, так и техногенные отходы, которые не улучшают экологическую ситуацию в регионе. Несмотря на имеющиеся значительные запасы природного глинистого сырья, в большинстве своем удовлетворительного качества, в Кузбассе в хвостохранилищах обогатительных фабрик накоплены огромные запасы диспергированного алюмосиликатного сырья, пригодного для производства керамических изделий. Это создает перспективы для развития керамической отрасли региона.

Ключевые слова: глинистое сырье, месторождения, технологические и керамические свойства, угольные разрезы, техногенные отходы обогащения углей.

Для цитирования: Болдырев Г.В., Стороженко Г.И., Чернейкин М.А. Особенности сырьевой базы Кузбасса для производства керамического кирпича // *Строительные материалы*. 2022. № 8. С. 18–22. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-805-8-18-22>

G.V. BOLDYREV¹, Candidate of Sciences (Engineering); G.I. STOROZHENKO^{2,3}, Doctor of Sciences (Engineering);

M.A. CHERNEYKIN³, Engineer (postgraduate student)

¹ ООО GEO-S (Novokuznetsk, Russian Federation)

² Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (113, Leningradskaya Street, Novosibirsk, 630008, Russian Federation)

³ Siberian State Industrial University (42, Kirova Street, Novokuznetsk, 654007, Russian Federation)

Features of the Raw Material Base of Kuzbass for the Production of Ceramic Bricks

In the Kemerovo Region, whose brick factories are not leaders in the coarse ceramics industry, both natural deposits and man-made waste can be considered as a raw material base, which do not improve the ecological situation in the region. Despite having significant reserves of natural clay raw materials, mostly of satisfactory quality, huge reserves of dispersed aluminosilicate raw materials suitable for the production of ceramic products have been accumulated in the tailings of processing plants in Kuzbass. This creates prospects for the development of the ceramic industry in the region.

Keywords: clay raw materials, deposits, technological and ceramic properties, coal mines, technogenic (man-made) waste of coal enrichment.

For citation: Boldyrev G.V., Storozhenko G.I., Cherneykin M.A. Features of the raw material base of Kuzbass for the production of ceramic bricks. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2022. No. 8, pp. 18–22. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-805-8-18-22>

Глава Кемеровской области С.Е. Цивилев предложил создать в регионе два города-миллионника на базе Кемерово и Новокузнецка. С такой инициативой он выступил на встрече с Президентом Российской Федерации В.В. Путиным [1]. Для реализации этих планов, естественно, потребуется существенно увеличить объемы выпуска строительных материалов, в том числе и керамического кирпича.

На сегодняшний день в Кузбассе работают два кирпичных завода средней мощности: Ленинск-Кузнецкий завод строительных материалов (ЛКЗСМ) и ООО «Мазуровский кирпичный завод», этого явно недостаточно для реализации в регионе предложения губернатора.

Одной из причин слабости кирпичной отрасли Кузбасса является отсутствие полноценной информации, в частности для инвесторов, по поводу запасов глинистого сырья в регионе. Существует устойчивое мнение, которое было высказано представителям компании «Bedeschi» на их предложение построить кирпичный завод в Новокузнецке: запасов качественных глин в Кемеровской области нет, поэтому на про-

тяжении многих лет в самом крупном городе области не построено ни одного кирпичного производства взамен ранее существовавших четырех заводов [2, 3].

В настоящее время проводятся работы по поиску и исследованию кирпичных глин в Кемеровской области, которые показали, что ранее проведенные геологические изыскания дают основания полагать: в регионе имеются значительные запасы качественного, как природного, так и техногенного сырья для производства керамики [4, 5].

Итак, по отчетам геологических изысканий установлено, что палеозойские и мезозойские отложения Кузнецкого бассейна почти повсеместно покрыты чехлом рыхлых четвертичных образований песчано-глинистого состава, из которых аллювиально-делювиальные глины и суглинки в большинстве своем являются легкоплавкими и пригодными в качестве сырья для кирпично-черепичного производства [6].

Мощность суглинков и глин различна. Для элювиально-делювиальных она колеблется в пределах от 0,5 до 5 м на склонах и до 25–30 м на водоразделах. Вскрытая мощность аллювиально-глинистых отложе-

Таблица 1
Table 1Химический состав глинистого сырья Кузбасса
Chemical composition of clay raw materials of Kuzbass

Месторождение	Содержание оксидов, % на сухое вещество						
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	R ₂ O	ППП
Каменушенское	78,92	13,83	1,93	0,42	0,26	–	4,45
Кайлинское	64,75	21,16	1,40	1,2	0,56	–	10,73
Придорожное	60,1–76,3	12,7–24,7	2,6–5,4	0,9–4,5	0,4	0,2–3,4	7,3–10,8

Таблица 2
Table 2Содержание основных оксидов в глинистых породах разрезов
The content of basic oxides in clayey rocks of sections

Оксиды	Талдинский разрез	Ерунаковский разрез	Бачатский разрез
SiO ₂	61,43–71,17	60,71–68,81	46,49–63,3
Al ₂ O ₃	7,22–15,69	19,47–14,13	9,65–17,58
TiO ₂	0,32–0,78	0,99–0,85	0,58–0,97
Fe ₂ O ₃	1,6–5,98	7,76–2,19	7,06–3,49
CaO	0,17–2,4	2,63–1,86	6,79–0,59
MgO	0,54–8,8	2,02–0,68	2,28–0,58

ний от 1,5 до 14 м. Они приурочены в основном к террасовым отложениям рек Томь, Кия, Иня и их притоков.

В Кемеровской области наиболее пригодными (табл. 1) для производства керамического кирпича являются глины и суглинки Кайлинского, Каменушенского, Придорожного, Мусохрановского месторождений (пестроцветные глины) [7].

Гидрогеологические условия почти всех месторождений благоприятные: грунтовые воды или не встречены разведочными выработками, или лежат ниже горизонта подсчета запасов.

По старым геологическим отчетам, в Кузнецком бассейне числится 57 месторождений кирпичных глин с общими запасами 120,7 млн м³ по категориям А+В+С1 (в том числе 26 эксплуатируемых месторождений с запасами 63,1 млн м³) [6]. Исходя из общей цифры разведанных запасов, Кузбасс обеспечен кирпичными суглинками по уровню добычи 1963 г. почти на сто лет. Разведанные месторождения имеются вблизи каждого промышленного центра, но в связи с расширением в конце прошлого и в начале нынешнего века площадей городов и рабочих поселков периодически *появляется необходимость в разведке новых участков взамен застроенных.*

Таковыми участками, на которые необходимо обратить внимание при анализе сырьевой базы Кузбасса для производства стеновой и строительной керамики, являются техногенные глинистые отходы, образующиеся в процессе добычи и обогащения углей. В Кузнецком угольном бассейне продуктивные толщи повсеместно перекрыты чехлом неоген-четвертичных слабых глинистых отложений. Их мощность в пределах изучаемых районов изменяется от 1 до 80 м, а в некоторых случаях до 100 м.

Рельеф Кузнецкой котловины и напрямую связанная с ним мощность покровных отложений ус-

ловно разделяются на три зоны: северную, центральную и южную [8]. Первая зона характеризуется мощностью неоген-четвертичных отложений 10–40 м и углами наклона основания от 0 до 8°. Наибольшая мощность четвертичных отложений 30–80 м, а местами и до 100 м отмечается во второй зоне, где наклона основания практически не наблюдается (0–3°). На юге региона отвальные сооружения размещают преимущественно на склонах до 12°, при этом мощность покровных отложений составляет 5–20 м.

В литологическом отношении породы верхней части угольного разреза представлены в основном пылеватыми суглинками, иногда глинами и супесями. По генезису они в большей степени делювиально-пролювиальные и аллювиальные. Верхняя часть разреза сложена эоловыми лессовидными суглинками, а нижняя – элювием (кора выветривания).

Покровные отложения повсеместно перекрывают древние осадки углевмещающих толщ и являются отражением неотектонических движений. Они характеризуются развитием трех основных генетических разновидностей: эоловых, делювиально-пролювиальных и аллювиальных. Стратиграфия покровных отложений начинается в неогеновой системе и основана на принятом сегодня расчленении, составленном институтом ВСЕГЕИ в 2008 г. и отраженном в Государственных геологических картах РФ (N-45) [9].

Детальное изучение керамических свойств глинистого сырья выполнялось на Бачатском, Талдинском и Ерунаковском угольных разрезах. Отбор проб выполнялся в бортах существующих карьеров с привязкой к горизонтам.

Угольный разрез Бачатский по административному положению находится на территории Беловского и Гурьевского районов Кемеровской области. В геологическом плане поле разреза расположено в преде-

Таблица 3
Table 3

Дисперсный состав глинистых пород угольных разрезов
Dispersed composition of clay rocks of coal mines

Группы	Содержание частиц, %, менее		Талдинский разрез	Ерунаковский разрез	Бачатский разрез
	10 мкм	1 мкм			
Высокодисперсные	Свыше 85	Свыше 60	–	–	6
Среднедисперсные	Свыше 60 до 85	Свыше 40 до 60	13	12	30
Низкодисперсные	Свыше 30 до 60	Свыше 15 до 40	87	87	64
Грубодисперсные	30 и менее	15 и менее	–	–	–

Таблица 4
Table 4

Пластичность глинистых пород угольных разрезов
Plasticity of clay rocks of coal mines

Группы	Число пластичности	Талдинский разрез	Ерунаковский разрез	Бачатский разрез
Высокопластичные	Более 25	–	2	6
Среднепластичные	15–25	29	39	18
Умереннопластичные	7–15	68	59	76
Малопластичные	Менее 7	3	–	–
Непластичные		–	–	–

лах Бачатского геолого-экономического района на северо-западной окраине Кузнецкого угольного бассейна в рамках одноименного месторождения, которое полностью обособлено от основной площади бассейна.

Четвертичные отложения представлены только в юго-западной части. Их мощность изменяется от 7 до 25–30 м. В литологическом отношении четвертичные отложения представлены лессовидными суглинками, глинами бурыми и пестроцветными. Макроскопически лессовидные суглинки содержат до 35% обломочного материала, представленного кварцем, полевыми шпатами, слюдами и другими минеральными смесями. Глины по физико-механическим свойствам близки к суглинкам.

По результатам испытаний по ГОСТ 3169–72 со-рока проб, отобранных с отметок 215–260 м, глини-стое сырье гидрослюдистое, с низким содержанием оксида алюминия (от 13,7 до 17,58%) и преобладани-ем оксида калия над натрием, с потерями при прока-ливании от 4,26 до 8,29% (табл. 2). Глины полукислые с высоким содержанием красящих оксидов. Сырье относится по количеству крупных включений в ос-новном к группе с низким и реже средним их содер-жанием; по содержанию частиц менее 0,001 мм (от 33 до 59%) это низко- и среднедисперсное (табл. 3); по числу пластичности (от 8 до 25 при средних 12,88) это в основном умереннопластичные глины с единичны-ми значениями средне- и высокопластичных.

Глинистое сырье имеет значительные колебания числа пластичности – от 6 до 26 (табл. 4). Основная масса суглинков Талдинского, Ерунаковского и Бачатского разрезов представлена полукислыми раз-ностями с высоким содержанием красящих оксидов, имеющих в среднем число пластичности 7–15.

По чувствительности к сушке это в основном вы-сокочувствительное к сушке глинистое легкоплав-кое, неспекающееся сырье. Обжиг образцов выпол-нялся при 950 и 1050°C. После обжига образцы име-ли красный и темно-красный цвет соответственно, трещины не наблюдались. Огневая усадка колеблет-ся от нулевой до 0,2. Водопоглощение обожженных изделий изменяется от 15,6 до 17,91%. Результаты испытаний на прочность и морозостойкость соответ-ствовали в основном марке кирпича М100, по моро-зостойкости F35 и достигали значений М150–200, F35–50 в зависимости от цвета глинистого сырья. Наилучшие значения соответствовали серым и крас-ноцветным по цвету разностям, наименьшие – жел-то-серым разновидностям.

Большая мощность неоген-четвертичных пород предопределила необходимость использования средств гидромеханизации на начальных этапах освоения угольных месторождений. Первый опыт применения гидромеханизации был получен на раз-резе Бачатский в 1951 г. с первоначальным годовым объемом гидровскрыши 31 тыс. м³. Шихтозапасник Сагарлыкский (рис. 1) более 30 лет не заполняется, часть его засыпается обломочным материалом вскрыши. Действующий шихтозапасник Бековский (рис. 2) находится в северо-восточной части карьера. Самым высоким гидроотвалом в Кузбассе и вторым по высоте в России является гидроотвал Бековский, намытый до высоты 76 м.

Привлекательность запасов глинистого матери-ала в отвалах для их использования в производстве керамических изделий заключается в том, что мате-риал усреднен и диспергирован. Последнее обстоя-тельство позволяет рассчитывать на высокое каче-ство конечной продукции из этого сырья.



Рис. 1. Сагарлыкский гидроотвал Бачатского разреза
Fig. 1. Sagarlyk hydraulic dump of the Bachatsky section



Рис. 2. Бековский гидроотвал Бачатского разреза
Fig. 2. Bekovsky hydraulic dump of the Bachatsky section



Рис. 3. Гидроотвал Талдинского карьера
Fig. 3. Hydraulic dump of the Taldinsky quarry

Угольные разрезы Талдинский и Ерунаковский в административном отношении входят в состав Прокопьевского и Новокузнецкого районов Кемеровской области. Отрицательные формы рельефа чередуясь с водоразделами, придают поверхности месторождения резко выраженный холмистый характер. Абсолютные отметки поверхности месторож-

дения колеблются от 230 до 240 м в долинах водотоков и от 300 до 310 м — на водоразделах. Относительные превышения в пределах месторождения достигают 120–130 м.

Осадки грамотеинской и тайлуганской продуктивных свит перекрываются рыхлыми неоген-четвертичными отложениями, которые относятся к еловской, бачатской и кедровской свитам. В составе четвертичных отложений содержание суглинков в среднем составляет 80%, мощность достигает 19,4 м.

Оценка керамических свойств рыхлых отложений велась в районе пластов 73,87–88, на участке гидросмыва (в борту) и на площади гидроотвала. Всего было отобрано 80 проб с оценкой основных показателей глинистого сырья по ГОСТ 3169–72, из них 25 проб исследовались с полной оценкой керамических свойств.

Глинистое сырье в естественном состоянии, отобранное с бортов, гидрослюдистое (в качестве примеси присутствует монтмориллонит), с низким содержанием оксида алюминия (от 14,27 до 15,95%) и преобладанием оксида калия над натрием, с потерями при прокаливании от 5,45 до 7,05%. Глины полукислые с высоким содержанием (от 5,9 до 6,24%) красящих оксидов. Сырье относится: по содержанию крупных включений в основном к группе с низким их содержанием; по содержанию частиц менее 0,001 мм (от 19,44 до 38,21%) — к низкодисперсному; по числу пластичности (от 10 до 20 при средних 12,88) — к умереннопластичному. Это в основном умереннопластичные глины с единичными значениями среднепластичных, высокочувствительные к сушке, легкоплавкие, неспекающиеся. Обжиг образцов выполнялся при 950 и 1050°C. После обжига образцы имели красный и темно-красный цвет соответственно, трещины не наблюдались. Огневая усадка колеблется от нулевой до 2,1. Водопоглощение обожженных изделий менялось от 13,7 до 17,6% (в зависимости от температуры обжига). Испытания на прочность и морозостойкость показали соответствие в основном марке кирпича по прочности М100, по морозостойкости F35 и достигали значений М150–200, F35–50 в зависимости от цвета глинистого сырья. Наилучшие показатели имеют глины серого, серо-голубого цвета. Выполнялась оценка огнеупорности глинистого сырья. При температуре 1050–1200°C наблюдались признаки вспучивания, оплывания.

На Талдинском карьере производится складирование отвальных пород на глинистое сырье, намытое там (рис. 3). Отличительной особенностью намытых глин является повышенная запесоченность, но при этом при обжиге образцы показали возможность получения кирпича марок по прочности М125, по морозостойкости F35 и достигали значений М150, F50.

Таким образом, отличительной особенностью сырьевой базы Кузбасса для керамической отрасли является то, что наряду с месторождениями качественного глинистого сырья существует 60 намытых гидромеханизацией гидроотвалов различной площади и высоты, в которых глинистое сырье уже диспер-

гировано и усреднено. Гидроотвалы преимущественно овражного и балочного типа, реже с трехсторонним и четырехсторонним обвалованием, кроме того, семь сооружений размещены в старых горных выработках. В настоящее время в работе находятся один гидроотвал на реке Еловка Моховского поля и три

гидроотвала в выработках пластов Сартакинского поля. Остальные намывные объекты либо уже используются в качестве оснований сухих отвалов, либо планируются для этих целей. Последнее обстоятельство настоятельно требует обратить внимание на этот вид техногенного сырья.

Список литературы

1. Цивилев предложил Путину создать два города-миллионника в Кузбассе // *РБК*. 1 октября 2021. <https://www.rbc.ru/society/01/10/2021/6156fa129a794780192d221b>
2. Столбоушкин А.Ю., Иванов А.И., Акст Д.В., Фомина О.А., Мишин М.П., Сыромясов В.А. Неудачный опыт перепрофилирования уникального завода по производству кирпича из отходов углеобогащения и возможные пути его реконструкции // *Строительные материалы*. 2017. № 4. С. 20–24.
3. Rasskazov V.F., Ashmarin G.D., Livada A.N. Production of construction materials using technogenic wastes. *Glass and Ceramics*. 2009. Vol. 66. No. 1–2, pp. 3–4.
4. Котляр В.Д., Терехина Ю.В., Котляр А.В., Яценко Р.А., Дьяченко Н.Е. Глины Касьяминского проявления в Кемеровской области – перспективное сырье для производства клинкерного кирпича // *Строительные материалы*. 2021. № 12. С. 17–22. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-798-12-17-22>
5. Stolboushkin A.Yu., Akst D.V., Fomina O.A., Ivanov A.I., Syromyasov V.A. Analysis of waste coal from the enterprises of Kemerovo region as raw materials for production of ceramic materials. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. International Scientific and Research Conference on Knowledge-based Technologies in Development and Utilization of Mineral Resources (KTDMUR2017)*. 6–9 June 2017. Vol. 84. 012037. doi: 10.1088/1755-1315/84/1/012037
6. Комплексные месторождения в пределах Кузнецкого угольного бассейна // *Строительно-информационный портал*. 26.03.2020. <https://fccland.ru/geologiya-mestorozhdeniy/9044-kompleksnye-mestorozhdeniya-v-predelah-kuzneckogo-ugolnogo-basseyna-html>
7. Перфильев В.И., Феоктистов Б.П. Кайлинское месторождение тугоплавких глин в Анжеро-Судженском районе Кемеровской обл. Отчет о детальной разведке тугоплавких глин по работам 1951 г. Иркутск: Трест «Сибгеолнеруд», 1952. 203 с.
8. Жариков В.П., Ермошкин В.В., Клейменов Р.Г. Рациональное землепользование при формировании отвалов и гидроотвалов на разрезах Кузбасса // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2012. № 2. С. 28–32.
9. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1000000 (третье поколение). Серия Алтай-Саянская. Лист N-45 – Новокузнецк. Объяснительная записка. СПб.: картфабрика ВСЕГЕИ, 2007. 665 с. + 10 вкл. (МПР России, ФГУП «ВСЕГЕИ», ФГУП «Запсибгеолсъемка»).

References

1. Tsivilev invited Putin to create two million-plus cities in Kuzbass. *RBC*. October 01, 2021. <https://www.rbc.ru/society/01/10/2021/6156fa129a794780192d221b> (In Russian).
2. Stolboushkin A.Yu. Ivanov A.I., Akst D.V., Fomina O.A., Mishin M.P., Syromyasov V.A. Unsuccessful experience of re-profiling a unique plant for the production of bricks from coal waste and possible ways of its reconstruction. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2017. No. 4, pp. 20–24. (In Russian).
3. Rasskazov V.F., Ashmarin G.D., Livada A.N. Production of construction materials using technogenic wastes. *Glass and Ceramics*. 2009. Vol. 66. No. 1–2, pp. 3–4.
4. Kotlyar V.D., Terekhina Yu.V., Kotlyar A.V., Yashenko R.A., Dyachenko N.E. Clays of the Kasminsky manifestation in the Kemerovo region – promising raw materials for production clinker bricks. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2021. No. 12, pp. 17–22. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-798-12-17-22>
5. Stolboushkin A.Yu., Akst D.V., Fomina O.A., Ivanov A.I., Syromyasov V.A. Analysis of waste coal from the enterprises of Kemerovo region as raw materials for production of ceramic materials. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. International Scientific and Research Conference on Knowledge-based Technologies in Development and Utilization of Mineral Resources (KTDMUR2017)*. 6–9 June 2017. Vol. 84. 012037. doi: 10.1088/1755-1315/84/1/012037
6. Complex deposits within the Kuznetsk coal basin. *Construction and Information Portal*. 03/26/2020. <https://fccland.ru/geologiya-mestorozhdeniy/9044-kompleksnye-mestorozhdeniya-v-predelah-kuzneckogo-ugolnogo-basseyna-html> (In Russian).
7. Perfiliev V.I., Feoktistov B.P. Kailinskoye deposit of refractory clays in the Anzhero-Sudzhensky district of the Kemerovo region. Report on detailed exploration of refractory clays based on the work of 1951. Irkutsk: Trust “Sibgeolnerud”, 1952. 203 p. (In Russian).
8. Zharikov V.P., Ermoshkin V.V., Kleimenov R.G. Rational land use in the formation of dumps and hydraulic dumps in the cuts of Kuzbass. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten' (nauchno-tekhnikeskiy zhurnal)*. 2012. No. 2, pp. 28–32. (In Russian).
9. State geological map of the Russian Federation. Scale 1:1000000 (third generation). Altai-Sayan series. Sheet N-45 – Novokuznetsk. Explanatory note. St. Petersburg: VSEGEI map factory, 2007. 665 p. + 10 incl. (Ministry of Natural Resources of Russia, FSUE VSEGEI, FSUE Zapsibgeolsemka). (In Russian).

УДК 666.941.4

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-805-8-23-30>

С.В. ШАТАЛОВА, ассистент (shatalova.sv@yandex.ru),
 Н.В. ЧЕРНЫШЕВА, д-р техн. наук (chernysheva56@rambler.ru),
 М.Ю. ЕЛИСТРАТКИН, канд. техн. наук (mr.elistratkin@yandex.ru),
 М.Ю. ДРЕБЕЗГОВА, канд. техн. наук (mdrebezgova@mail.ru),
 С.В. МАСАЛИТИНА, магистрант (sveta.masalitina2017@gmail.com)

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

Реологические свойства гипсоцементных вяжущих и формовочных смесей на их основе для 3D-аддитивных технологий строительства

Масштабное внедрение 3D-технологий в широкую практику малоэтажного строительства зависит от их конкурентоспособности по сравнению с традиционными технологиями. Необходимы доступные материалы, позволяющие получать формовочные смеси для строительной печати, максимально отвечающие предъявляемым к ним требованиям. Эффективными для этих целей являются формовочные смеси на основе гипсоцементных вяжущих, обладающие значительным преимуществом в возможности регулирования сроков схватывания в широких пределах и скорости твердения по сравнению со смесями на основе портландцемента. Представлены результаты экспериментальных исследований реологических характеристик гипсоцементных вяжущих и формовочных смесей на их основе, полученных с помощью метода ротационной вискозиметрии. Изучение реологических особенностей позволило установить, что введение пластифицирующей и пенообразующей добавки устраняет основные реологические аномалии составов, унифицируя характер их течения. При введении мелкого заполнителя с частичной поризацией бетонной смеси сохраняется близкий к линейному характер реограммы. В то же время заполнитель существенно повышает предел текучести, необходимый для обеспечения формоустойчивости, что является важным требованием эффективности гипсоцементных формовочных смесей для аддитивного строительства.

Ключевые слова: реологические свойства, формовочные смеси, гипсоцементные вяжущие, строительная 3D-печать.

Исследования реологических свойств гипсоцементных вяжущих и формовочных смесей на их основе были проведены в рамках реализации программы «Приоритет 2030» на базе Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова.

Для цитирования: Шаталова С.В., Чернышева Н.В., Елистраткин М.Ю., Дребезгова М.Ю., Масалитина С.В. Реологические свойства гипсоцементных вяжущих и формовочных смесей на их основе для 3D-аддитивных технологий строительства // *Строительные материалы*. 2022. № 8. С. 23–30. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-805-8-23-30>

S.V. SHATALOVA, assistant (shatalova.sv@yandex.ru), N.V. CHERNYSHEVA, Doctor of Sciences (Engineering) (chernysheva56@rambler.ru), M.Yu. ELISTRATKIN, Candidate of Sciences (Engineering) (mr.elistratkin@yandex.ru), M.Yu. DREBEZGOVA, Candidate of Sciences (Engineering) (mdrebezgova@mail.ru), S.V. MASALITINA, undergraduate (sveta.masalitina2017@gmail.com) Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (46, Kostyukov Street, Belgorod, 308012, Russian Federation)

Rheological Properties of Gypsum Cement Binders and Molding Mixtures Based on Them for 3D Additive Construction Technologies

The large-scale introduction of 3D technologies into the widespread practice of low-rise construction depends on their competitiveness compared to traditional technologies. There is a need for affordable materials that make it possible to obtain molding mixes for construction printing that best meet the requirements for them. Molding mixtures based on gypsum cement binders are effective for these purposes, which have a significant advantage in the ability to regulate the setting time within a wide range and the hardening rate compared to mixtures based on Portland cement. The results of experimental studies of rheological characteristics of gypsum cement binders and molding mixtures based on them, obtained using the method of rotational viscometry, are presented. The study of rheological features made it possible to establish that the introduction of a plasticizing and foaming additive eliminates the main rheological anomalies of the compositions, unifying the nature of their flow. With the introduction of a fine aggregate with partial polarization of the concrete mixture, the rheogram character remains close to linear. At the same time, the filler significantly increases the yield strength required to ensure mold stability, which is an important requirement for the effectiveness of gypsum cement molding mixtures for additive construction.

Keywords: rheological properties, molding mixtures, gypsum cement binders, construction 3D printing.

Studies of rheological properties of gypsum cement binders and molding mixtures based on them were carried out as part of the implementation of the Priority 2030 Program at the Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov.

For citation: Shatalova S.V., Chernysheva N.V., Elistratkin M.Yu., Drebezgova M.Yu., Masalitina S.V. Rheological properties of gypsum cement binders and molding mixtures based on them for 3D additive construction technologies. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2022. No. 8, pp. 23–30. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-805-8-23-30>

Строительная 3D-печать является одной из революционных и инновационных строительных технологий, позволяющая повысить эффективность строительства и экономить все виды ресурсов. Основной

проблемой внедрения данных технологий в широкую практику строительства является отсутствие доступных материалов, позволяющих получать формовочные смеси для строительной печати, максимально

отвечающие предъявляемым к ним требованиям, а также учитывающие особенности формирующего устройства (3D-принтера). При этом конкурентоспособность данных технологий по сравнению с традиционными технологиями строительства обуславливается минимизацией первоначальных затрат, а также доступностью сырьевой базы. Это позволит освоить их предприятиям малой и средней мощности, которые сегодня являются основными провайдерами инноваций.

В настоящее время значительная доля исследований в области строительной печати направлена на изучение формовочных смесей на основе портландцементов. Известны работы, направленные на поиск путей повышения их эффективности за счет применения комплексов химических и минеральных добавок [1–7], модификации цементной вяжущей основы [8–10], использования особых технологических приемов их получения [11, 12]. При этом известно, что цементы отличаются высокой энергоемкостью получения, а бетоны на их основе зачастую имеют неоптимальные для строительной печати реотехнологические показатели и характеристику нарастания ранней прочности.

Альтернативой цементным вяжущим являются гипсовые композиции, возможность применения которых в строительстве малоэтажных зданий посредством строительной 3D-печати при соблюдении определенных условий рассмотрена в работах [13–15]. Однако данные технологические решения сопряжены с повышенным расходом вяжущего (ввиду невысокой марочной прочности) и не всегда достаточной водостойкостью гипса. Эти недостатки возможно компенсировать за счет использования композиционных гипсовых вяжущих (КГВ), включающих гипсовое вяжущее, портландцемент и активные минеральные добавки [16].

Перспективным является применение гипсоцементных вяжущих без дополнительного введения

активной минеральной добавки, путем смешения только двух товарных компонентов – гипсового вяжущего и портландцемента (ЦЕМ II и ЦЕМ III, имеющих в своем составе минеральные добавки), качество и свойства которых изначально гарантированы производителем. Возможность и эффективность применения данных вяжущих в строительной 3D-печати были рассмотрены ранее [17].

Особое значение при получении качественных формовочных смесей для строительной печати имеют их реологические параметры, формируемые в значительной степени клеем на основе вяжущего и воды (суспензия вяжущего). Спецификой процесса строительной печати является наличие в едином технологическом цикле этапов с принципиально разными требованиями к характеру течения смесей, от необходимости динамичного прокачивания через ограниченные сечения до быстрой фиксации приданной формы в противодействии гравитационным силам.

Несмотря на приоритетную роль вяжущей суспензии, практика показала, что формирование реологии смесей происходит совокупно под влиянием целого ряда факторов: вида вяжущей композиции, пластифицирующей добавки, пенообразующей (воздуховлекающей) добавки, мелкого заполнителя.

Для уточнения влияния каждого из перечисленных факторов в исследованиях применяли:

- гипсовое вяжущее α-модификации марки ГВС-16 (Г16) (ТУ 21-РСФСР-153-90), ЗАО «Самарский гипсовый комбинат»;
- портландцемент ЦЕМ I 42,5Н, ОАО «Новоросцемент» (ГОСТ 31108–2016);
- портландцемент ЦЕМ II/A-П 42,5СС, ОАО «Новоросцемент» (ГОСТ 22266–2013);
- шлакопортландцемент ЦЕМ III/A 32,5Б, ЗАО «Белгородский цемент» (ГОСТ 31108–2016);
- тонкомолотый бетонный лом (БЛ);
- кварцевый песок, ООО «Формматериалы», Воронежская обл., $M_{кр}=1,4$;

Таблица 1
Table 1

Состав и свойства гипсоцементных вяжущих
Composition and properties of gypsum cement binders

Состав, мас. ч.			В/В	Сроки схватывания, мин		$R_{сж}$, МПа, в сроки твердения		
Г16	ПЦ	БЛ		начало	конец	2 ч	14 сут	$\frac{28}{28^*}$
Гипсоцементное вяжущее на основе ЦЕМ III								
0,5	0,5	–	0,45	17	23	9	18	$\frac{26,2}{30,4}$
Гипсоцементное вяжущее на основе ЦЕМ II (СС)								
0,5	0,5	–	0,45	22	26	8,3	22,2	$\frac{26,4}{30,1}$
Гипсоцементное вяжущее на основе ЦЕМ I + БЛ								
0,6	0,2	0,2	0,45	18	21	9,3	10,4	$\frac{17,5}{23,5}$
<p>Примечание. *$R_{сж}$ высушенных образцов до постоянной массы в возрасте 28 сут. Во все составы вводили замедлитель схватывания PLAST RETARD PE – 0,05% от массы вяжущего.</p>								

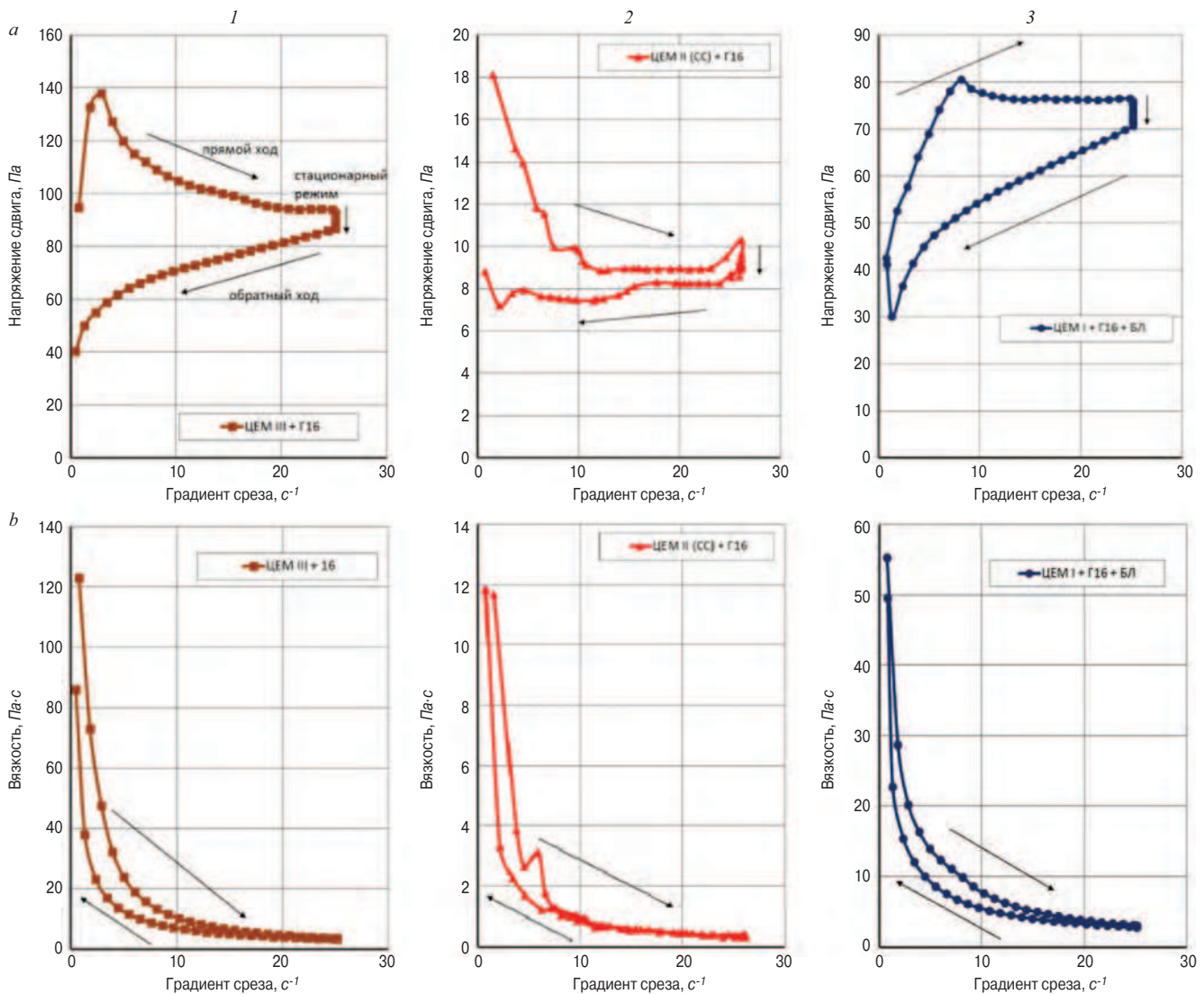


Рис. 1. Зависимость напряжения сдвига и вязкости суспензий вяжущих без химических модификаторов от скорости перемешивания: 1 – ЦЕМ III+Г16 без добавок; 2 – ЦЕМ II(СС)+Г16; 3 – ЦЕМ I+Г16+БЛ; а – зависимость эффективной вязкости от градиента скорости сдвига; б – зависимость напряжения сдвига от градиента скорости сдвига

Fig. 1. Dependence of shear stress and viscosity of suspensions of binders without chemical modifiers on the mixing rate: 1 – CEM III+G16 without additives; 2 – CEM II(SS)+G16; 3 – CEM I+G16+BL; а – the dependence of the effective viscosity on the gradient of the shear rate; б – the dependence of the shear stress on the gradient of the shear rate

– пенообразователь (ПО) «Пеностром» ООО «ЩИТ» г. Шебекино Белгородской обл., (ТУ 0250-001-22299560–97);

– замедлитель схватывания PLAST RETARD PE (Италия);

– суперпластификатор на базе поликарбоксилатов ПК тип R «Полипласт» (ТУ 20.59.59-109-58042865–2017) (Россия);

– вода (ГОСТ 23732–2011).

Реологические свойства (напряжение сдвига, вязкость, градиент сдвига) гипсоцементных вяжущих, включающих ЦЕМ III+Г16, ЦЕМ II (СС)+Г16, а также КГВ на основе ЦЕМ I с диспергированной до удельной поверхности $500 \text{ м}^2/\text{кг}$ минеральной добавкой из бетонного лома (БЛ) – ЦЕМ I+Г16+БЛ, были изучены с помощью ротационного вискозиметра RHEOTEST RN 4.1 при температуре окружающего воздуха 23°C . Водовязующее отношение (В/В) во всех случаях было принято постоянным – 0,45.

В табл. 1 представлены составы и показатели свойств, исследуемых гипсоцементных вяжущих.

Установлено, что вид используемого гипсоцементного вяжущего (рис. 1) оказывает большое влияние на характер течения смесей. Наибольшую степень начальной структурированности системы и более высокий уровень вязкости демонстрируют составы ЦЕМ III + Г16 и ЦЕМ I+Г16+БЛ. Для них характерно наличие ярко выраженного пика на прямой ветви реограммы, соответствующего пределу текучести (состав ЦЕМ III+Г16 $\approx 140 \text{ Па}$; ЦЕМ II (СС)+Г16 $\approx 80 \text{ Па}$). Однако для состава ЦЕМ III+Г16 активное разрушение начальной структуры начинается при градиенте скорости сдвига $3\text{--}4 \text{ с}^{-1}$, а для состава ЦЕМ II (СС)+Г16 при более высоком его значении $7\text{--}8 \text{ с}^{-1}$.

Обращает на себя внимание то, что напряжение сдвига состава ЦЕМ III+Г16 на прямой ветви реограммы при повышении скорости перемешивания до

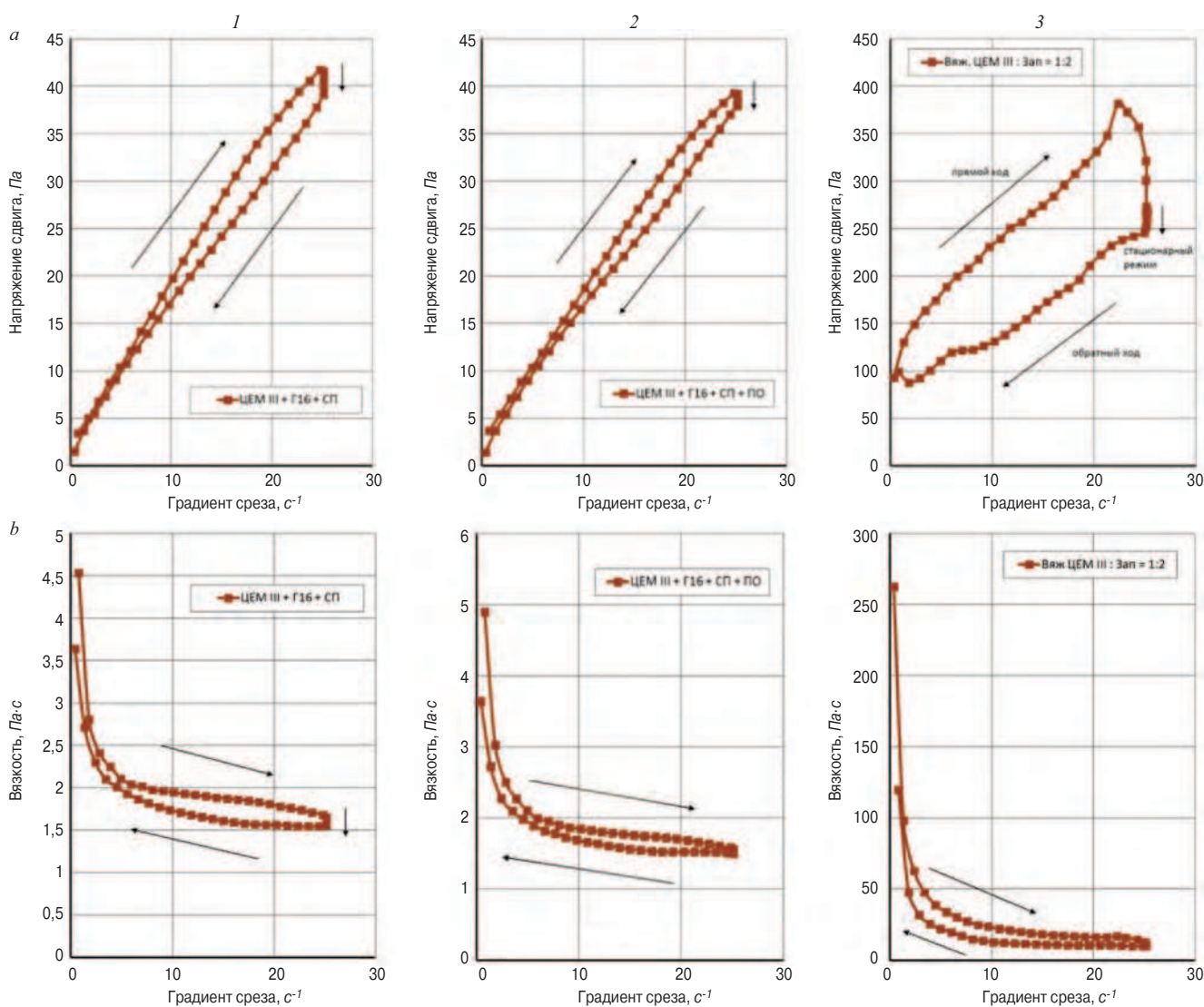


Рис. 2. Влияние пластифицирующей, пенообразующей добавок и мелкого заполнителя на реологические свойства смеси на основе вяжущего ЦЕМ III+Г16: 1 – ЦЕМ III+Г16+СП; 2 – ЦЕМ III+Г16+СП+ПО; 3 – ЦЕМ III+Г16; мелкий заполнитель = 1:2; а – зависимость эффективной вязкости от градиента скорости сдвига; б – зависимость напряжения сдвига от градиента скорости сдвига

Fig. 2. The effect of plasticizing, foaming additives and fine aggregates on the rheological properties of the mixture based on the binder CEM III + G16: 1 – CEM III+G16+SP; 2 – CEM III+G16+SP+PO; 3 – CEM III+G16; fine aggregate = 1:2; а – the dependence of the effective viscosity on the gradient of the shear rate; б – the dependence of the shear stress on the gradient of the shear rate

максимальной величины снижается практически в 1,5 раза по сравнению с 5–7% состава гипсоцементного вяжущего на основе ЦЕМ I+БЛ.

В то же время обратные ветви реограмм указанных составов крайне схожи (различия значений в районе 10%). Это свидетельствует о повышенной склонности состава ЦЕМ III+Г16 к структурированию (повышению формоустойчивости) и значительному проявлению тиксотропных свойств при механических воздействиях. Данный факт в ряде случаев может быть выгоден для регулирования процесса 3D-печати за счет вибрационных воздействий.

Состав ЦЕМ II (СС)+Г16 при принятом В/В отношении имеет существенно более низкий порог разрушения структуры (≈ 20 Па) без участка течения с неразрушенной структурой и соответствующего пика на реограмме.

Вязкость получаемого теста снижается до уровня менее 2 Па·с уже при скорости 5–7 с⁻¹ и в дальней-

шем существенно не изменяется. Общий уровень вязкости теста на основе вяжущего ЦЕМ II (СС)+Г16 в среднем в 10 и 5 раз ниже составов ЦЕМ III + Г16 и ЦЕМ I+Г16+БЛ соответственно.

С точки зрения практики такой характер реологии обеспечивает хорошую печатаемость (экструдированность), но не является благоприятным для получения смесей для строительной печати ввиду потенциально пониженной формоустойчивости, если она формируется в основном за счет вяжущего (составы с повышенным расходом цемента и высокой раздвижкой зерен заполнителя).

В то же время при формировании формоустойчивости за счет каркаса из заполнителя (составы с низким расходом вяжущего и низкой раздвижкой зерен) пониженная вязкость и структурируемость смесей ЦЕМ II (СС)+Г16 могут оказаться выгодными с точки зрения обеспечения всей требуемой совокупности свойств. Также следует учитывать, что пониженная

Таблица 2
Table 2

Состав и свойства мелкозернистых формовочных смесей на гипсоцементном вяжущем с модифицирующими добавками
Composition and properties of fine-grained molding mixtures on gypsum cement binder with modifying additives

Состав, мас. ч.			В/В	Добавки, % от массы вяжущего			ρ , кг/м ³	R ₁ , МПа	R ₇ , МПа	R ₂₈ , МПа
Г16	ЦЕМ II- (СС)	Песок		ПО, %	Замедлитель, %	СП, %				
0,5	0,5	4	0,4	0,3	0,05	0,6	1639	2,6	4,8	8,2
		4	0,38				1720	2,9	5,8	10,7
		4	0,35				1815	3,1	6,3	11,1
0,5	0,5	3	0,38				1980	3,2	8,6	14,6
		3	0,35				2010	3,8	8,8	15,3
		3	0,32				2017	4,0	9,4	14,8
0,5	0,5	2	0,38				2005	6,3	13,7	17,2
		2	0,35				2049	6,4	14,5	16,9
		2	0,33				2094	6,9	14,7	17,6

вязкость состава формирует потенциал для снижения В/В отношения и улучшения эксплуатационных показателей.

Поскольку в работе реализуется комплексный подход к обеспечению технологических свойств составов для строительной печати, было изучено влияние пластифицирующей и пенообразующей добавок, а также мелкого заполнителя на свойства формовочных смесей (табл. 2).

Введение пластифицирующей добавки поликарбонатного типа R «Полипласт» в принятой рабочей дозировке (0,6% в жидком виде с товарной концентрацией действующего вещества) резко меняет характер течения гипсоцементной смеси состава ЦЕМ III + Г16 (рис. 2, 1). Основные изменения заключаются: в снижении предела текучести до 2–4 Па при минимальных скоростях перемешивания; уменьшении вязкости до уровня состава ЦЕМ II (СС)+Г16 без введения добавок. Общая степень структурированности системы, оцениваемая по площади петли гистерезиса, достаточно низкая.

Введение пенообразователя «Пеностром» незначительно отражается на свойствах смеси, несколько снижая ее вязкость и расстояние между прямой и обратной ветвями реограммы (рис. 2, 2). Данный факт дополнительно подтверждает, что влияние воздухововлекающего компонента сфокусировано не на вяжущем, а на мелком заполнителе за счет:

- насыщения системы газообразной фазой в виде мелких пузырьков, выступающих в роли соизмеримых по размеру с заполнителем частиц с нулевым трением и демпферов деформаций;
- уменьшение структурирующего влияния капиллярных сил на границе контакта частиц заполнителя в многофазной системе (твердая жидкость и газ).

Введение двух долей мелкого заполнителя при прочих равных условиях не оказывает существенного влияния на форму ветвей реограмм, ощутимо меняя их численные значения (рис. 2, 3). Так, пре-

дел текучести гипсоцементной формовочной смеси, содержащей заполнитель, по сравнению с суспензией вяжущего ЦЕМ III + Г16 повышается более чем в 40 раз. При этом, так же как и у смеси без заполнителя, отсутствует участок течения с неразрушенной структурой, что позволяет с равным успехом экструдировать подобную смесь в широком диапазоне скоростей.

Обращает на себя внимание большое расстояние между прямой и обратной ветвями реограммы, а также большое снижение напряжения сдвига в стационарном режиме. Это свидетельствует о существенных изменениях состояния формовочной смеси в процессе быстрого перемешивания, вероятно, из-за дополнительной диспергации изначально вовлеченных пузырьков.

Напряжения сдвига в начале и конце цикла испытания практически идентичны, это свидетельствует о независимости потенциальной величины формоустойчивости смеси от комплекса механических воздействий в процессе прохождения через формующее устройство. Подобные формовочные смеси будут одинаково хорошо сохранять форму как до процесса печати, так и после.

Как показала практика, исследование составов с большим количеством мелкого заполнителя (четыре части), несмотря на практический интерес, с применением имеющегося оборудования оказалось невозможным. Вероятно, это связано с высокой степенью неоднородности массы относительно величины зазора между цилиндрами прибора, приводящей к получению хаотичных значений. В этой связи реограмма состава «вяжущее:песок – 1:4» не приводится.

При переходе на трехкомпонентное вяжущее с бетонным ломом в качестве минеральной добавки (состав ЦЕМ I+Г16+БЛ) (рис. 3) установлено, что эффект действия пластифицирующей добавки и пластифицирующий эффект от пенообразователя

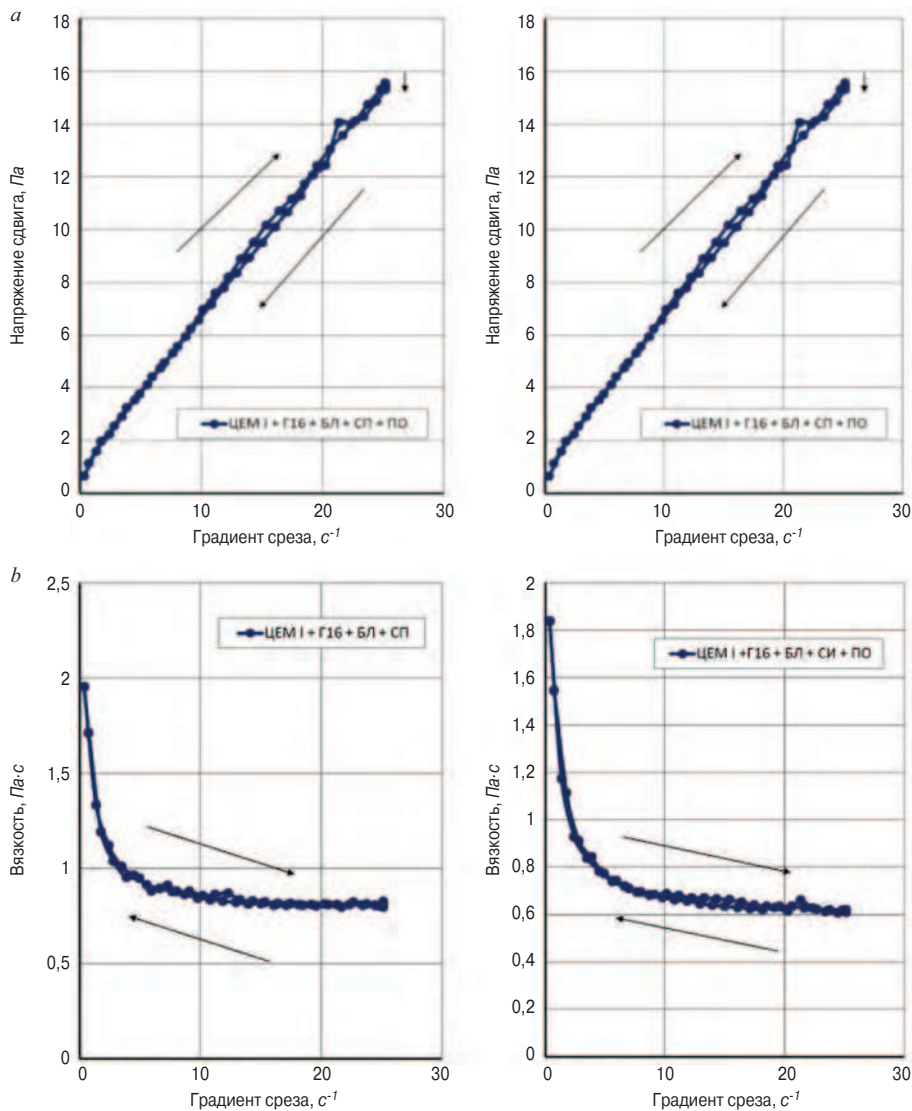


Рис. 3. Влияние пластифицирующей, пенообразующей добавок и мелкого заполнителя на реологию состава ЦЕМ I+Г16+БЛ: *a* – зависимость эффективной вязкости от градиента скорости сдвига; *b* – зависимость напряжения сдвига от градиента скорости сдвига
Fig. 3. Influence of plasticizing, foaming additives and fine aggregates on the rheology of the CEM I+G16+BL composition: *a* – the dependence of the effective viscosity on the gradient of the shear rate; *b* – the dependence of the shear stress on the gradient of the shear rate

усиливаются. На подобное явление указывали и другие исследователи в ряде работ [18–20]. Вероятно, это связано с наличием в указанной минеральной добавке большого количества положительно заряженных центров, привносимых продуктами гидратации клинкерной составляющей, повышающих адсорбцию ПАВ и усиливающих эффект их действия. В то же время повышенная адсорбция пенообразователя частицами твердой фазы может негативно сказаться как на процессе твердения, так и на воздухововлекающем эффекте. В свою очередь, это может стать причиной повышения плотности пенобетонных составов или нестабильной печатаемости плотных композитов для печати контуров конструкций.

Состав ЦЕМ II (СС)+Г16 на основе сульфатостойкого цемента по взаимодействию с принятыми в работе добавками занимает промежуточное

положение между составами ЦЕМ III+Г16 и ЦЕМ I+Г16+БЛ (рис. 4). Вероятно, определяющим фактором является количество и состав минеральной добавки. Шлак в составе ЦЕМ III и опока в составе ЦЕМ II (СС) ввиду преимущественно силикатного состава менее активно взаимодействуют с анионоактивным ПАВ.

В целом введение комплекса химических модификаторов в значительной степени нивелирует особенности реологического поведения «чистых» систем, сводя основные различия к величинам численных показателей в отдельных точках.

Выводы

Все рассмотренные в работе составы вяжущих композиций имеют достаточно сложные собственные реологические характеристики. В большинстве случаев они демонстрируют предпосылки к обеспечению хорошей формоустойчивости, однако наличие на реограммах участка течения с неразрушенной структурой и общая высокая склонность к структурированию (большая площадь петли гистерезиса) создает затруднения при получении смесей для строительной печати, отвечающих всему комплексу требований без применения химических модификаторов.

Введение пластифицирующей добавки устраняет основные реологические аномалии составов, унифицируя характер их течения. Основные отличия между составами при этом заключаются в численных показателях вязкости. Характер течения пластифицированных смесей является благоприятным с точки зрения экструдируемости (прохождения ограниченных сечений), однако имеет неудовлетворительные прогнозы по формоустойчивости (низкий предел текучести). Это подтверждает тезис о невозможности получения эффективных составов для строительной печати только за счет их пластификации.

Введение пенообразователя незначительно отражается на реологических характеристиках формовочных смесей, не меняя принципиально характера течения.

При введении мелкого заполнителя в формовочную смесь, с одной стороны, сохраняется близкая к

линейной зависимость напряжения сдвига от скорости перемешивания, характерная для пластифицированных суспензий вяжущих. Данный факт является важным для процесса строительной печати, поскольку в процессе прохождения через внутренние каналы формующего устройства скорость смеси может многократно, в том числе локально, меняться из-за непостоянства площади сечения.

Наличие реологических аномалий резкого повышения напряжения сдвига при снижении скорости течения приведет к образованию застоя смеси в расширениях сечения, колебаниям производительности экструдера и, как следствие, нарушению геометрии трека. Крайним случаем может стать полная блокировка экструдера, например при кратковременных перерывах в печати.

С другой стороны, введение заполнителя с одновременной поризацией массы существенно повышает предел текучести, необходимый для обеспечения формоустойчивости.

Положительным аспектом является то, что предел текучести смеси оказывается независимым от продолжительности механических воздействий на смесь (совпадение начала и конца полной реограммы). Это создает предпосылки к созданию формующих устройств с непрерывной циркуляцией формовочной смеси, что является залогом обеспечения высокой продолжительности непрерывной работы принтера без необходимости технологических перерывов для очистки внутренних сечений от схватившейся в «мертвых» зонах смеси.

Список литературы / References

1. Лесовик В.С., Елистраткин М.Ю., Глаголев Е.С., Шаталова С.В., Стариков М.С. Формирование свойств композиций для строительной печати // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2017. № 10. С. 6–14. https://doi.org/10.12737/article_59cd0c57ede8c1.83340178
1. Lesovik V.S., Elistratkin M.Yu., Glagolev E.S., Shatalova S.V., Starikov M.S. Formation of the prop-

- erties of compositions for construction printing. *Vestnik BSTU named after V.G. Shukhov*. 2017. No. 10, pp. 6–14. https://doi.org/10.12737/article_59cd0c57ede8c1.83340178 (In Russian).
2. Khoshnevis B., Dooil Hwang, Ke-Thia Yao, Zhenghao Yeh. Mega-scale fabrication by contour crafting. *International Journal of Industrial and Systems Engineering*. 2006. Vol. 1. No. 3, pp. 301–320. DOI:10.1504/IJISE.2006.009791
3. Zhang J., Khoshnevis B. Optimal machine operation planning for construction by Contour Crafting. *Automation in Construction*. 2013. No. 29, pp. 50–67. DOI:10.1016/J.AUTCON.2012.08.006
4. 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 and structures*. 2012. Vol. 45. No. 8, pp. 1221–1232. DOI: 10.1617/s11527-012-9828-z

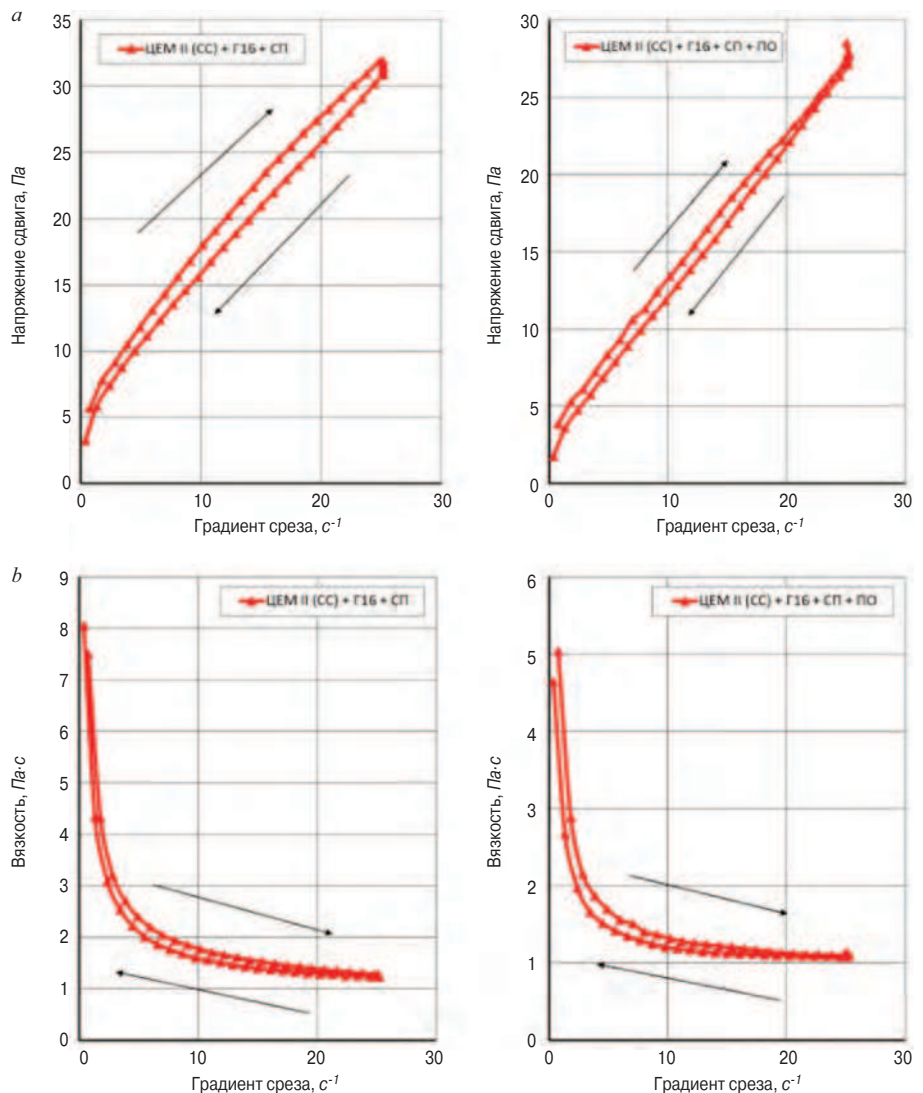


Рис. 4. Влияние пластифицирующей, пенообразующей добавок и мелкого заполнителя на реологию состава ЦЕМ II (CC)+Г16: *a* – зависимость эффективной вязкости от градиента скорости среза; *b* – зависимость напряжения сдвига от градиента скорости среза

Fig. 4. The effect of plasticizing, foaming additives and fine filler aggregates on the rheology of the CEM II (CC)+G16 composition: *a* – the dependence of the effective viscosity on the gradient of the shear rate; *b* – the dependence of the shear stress on the gradient of the shear rate

5. Zeina Malaeb, Hussein A. Hachem, Tourbah A., Maalouf T., Nader El Zarwi, Hamzeh F. 3D Concrete printing: machine and mix design. *International Journal of Civil Engineering and Technology*. 2015. Vol. 6 (6), pp. 14–22. Project: 3D Concrete Printing
6. Khalil N. Aouad G., Rémond S. Use of calcium sulfoaluminate cements for setting control of 3D-printing mortars. *Construction and Building Materials*. 2017. Vol. 157, pp. 382–391. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.09.109
7. Lin J.C., Wu X., Yang W. Application of P.O and R-SAC mortar for 3D printing in construction. *Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2017. Vol. 292, pp. 79–83. DOI:10.1088/1757-899X/292/1/012070
8. Slavcheva G., Britvina E., Shvedova M. Heat release during 3d-printable materials setting and hardening. *Materials Science Forum*. 2021. Vol. 1043 MSF, pp. 37–42. DOI:10.4028/www.scientific.net/MSF.1043.37
9. Marchon D., Kawashima S., Bessaies-Bey H., Mantellato S.Ng. Hydration and rheology control of concrete for digital fabrication: potential admixtures and cement chemistry. *Cement and Concrete Research*. 112. 2018, pp. 96–110. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.05.014>
10. Thrane L.N., Pade C., Nielsen C.V. Determination of rheology of self-consolidating concrete using the 4C-rheometer and how to make use of the results. *Journal of ASTM International*. 2009. Vol. 7 (1), pp. 1–10. DOI: 10.1520/JAI102003
11. Reiter L., Wangler T., Roussel N., Flatt R.J. The role of early age structural build-up in digital fabrication with concrete. *Cement and Concrete Research*. 2018. Vol. 112, pp. 86–95. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.05.011>
12. Keita E. Bessaies-Bey H., Zuo W., Belin P., Roussel N. Weak bond strength between successive layers in extrusion-based additive manufacturing: measurement and physical origin. *Cement and Concrete Research*. 2019. Vol. 123. 105787. DOI: 10.1016/j.cemconres.2019.105787
13. Liu K., Wu Y. F., Jiang X. L. Shear strength of concrete filled glass fiber reinforced gypsum walls. *Materials and Structures*. 2008. Vol. 41. No. 4, pp. 649–662. DOI: 10.1617/s11527-007-9271-8
14. Удодов С.А., Белов Ф.А., Золотухина А.Е. Уточнение состава сухой строительной смеси для 3D-печати методом математического моделирования. *В сборнике трудов конференции «European scientific conference»*. Пенза. 2017. 30 июля. С. 132–138.
14. Udodov S.A., Belov F.A., Zolotukhina A.E. Refinement of the composition of dry mortar for 3D printing by mathematical modeling. *In the collection of proceedings of the conference «European scientific conference»*. Penza. July 30, 2017, pp. 132–138. (In Russian).
15. Рязанов А.Н., Шигапов Р.И., Синицин 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: 10.31659/0585-430X-2021-794-8-39-44
15. Ryazanov A.N., Shigapov R.I., Sinitsin D.A., Kinzyabulatova D.F., Nedoseko 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>
16. 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: 10.31659/0585-430X-2021-794-8-45-52
16. 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>
17. Чернышева Н.В., Шаталова С.В. Компонирование особенностей композиционных вяжущих для пористых композитов в технологиях строительства. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Buildintechbit. Innovations and technologies in construction*. 2020. 012007. DOI: 10.1088/1757-899X/945/1/012007
17. Chernysheva N.V., Shatalova S.V. Compounding features of composite gypsum binders for porous composites in construction printing technologies. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Buildintechbit. Innovations and technologies in construction*. 2020. 012007. DOI: 10.1088/1757-899X/945/1/012007
18. Ребиндер П.А. Поверхностные явления в дисперсных системах. Т. 2. Физико-химическая механика. М.: Наука, 1979. 381 с.
18. Rebinder P.A. Poverkhnostnyye yavleniya v dispersnykh sistemakh. T. 2. Fiziko-khimicheskaya mekhanika [Surface phenomena in dispersed systems. T. 2. Physical and chemical mechanics]. Moscow: Nauka. 1979. 381 p.
19. Иващенко Ю.Г., Тимохин Д.К., Страхов А.В. Модифицирующее действие органических добавок на цементные композиционные материалы // *Вестник СГТУ*. 2012. № 4 (68). С. 202–206.
19. Ivashchenko Yu.G., Timokhin D.K., Strakhov A.V. Modifying effect of organic additives on cement composite materials. *Vestnik SGTU*. 2012. No. 4 (68), pp. 202–206. (In Russian).
20. Эльян Исса Жамал Исса. Стеновые гипсосодержащие материалы на природном и техногенном сырье Ближнего Востока: Дис. ... канд. техн. наук. Белгород, 2014. 147 с.
20. Elyan Issa Jamal Issa. Wall gypsum-containing materials based on natural and technogenic raw materials from the Middle East. Dis. ... Candidate of Sciences (Engineering). Belgorod. 2014. 147 p. (In Russian).

УДК 691.311

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-805-8-31-35>

Ю.Б. СОБОЛЬ, канд. техн. наук, учредитель, А.М. АБРАМОВ, учредитель,
Э.В. ПОЛУМИЕВ, руководитель проекта (guru-ad@mail.ru)

ООО «Скайград Инновации» (141090, г. Королев, мкр. Юбилейный, ул. Пионерская, 1/4)

Новые технологические подходы в производстве искусственного гипсового камня из фосфогипса*

Разработана эффективная технология производства искусственного гипсового камня из фосфогипса. Реализован комплексный подход в решении вопроса переработки многотоннажного отхода промышленности, включая извлечение из него редкоземельных элементов. Исследованы возможности замены природного гипсового камня как регулятора схватывания в производстве цемента. Установлено, что искусственный гипсовый камень из фосфогипса может полностью заменить природный материал. В ходе проделанной работы установлено, что дозировка регулятора схватывания может быть значительно уменьшена. Промышленные испытания показали технологические преимущества полученного гипсового камня в части транспортирования, подачи и дозирования.

Ключевые слова: фосфогипс, гранулирование, цемент, искусственный гипсовый камень, экология, утилизация отходов.

* Специалисты ГК «Скайград» удостоены премии Губернатора Московской области в сферах науки, технологий, техники и инноваций за коммерциализацию научных и (или) научно-технических результатов в 2022 г. <https://mii.mosreg.ru/dokumenty/innovacii/premiya-gubernatora-moskovskoi-oblasti-v-sferakh-nauki-tehnologii-tehniki-i-innovacii-za-kommercializaciyu-nauchnykh-i-ili-nauchno-tehnicheskikh-rezultatov/02-08-2022-16-50-15-rasporyazhenie-gubernatora-moskovskoy-oblasti-ot>

Редакция журнала «Строительные материалы»® поздравляет коллег с этим успехом и желает процветания и реализации в промышленности всех научных достижений.

Для цитирования: Соболев Ю.Б., Абрамов А.М., Полумиев Э.В. Новые технологические подходы в производстве искусственного гипсового камня из фосфогипса // *Строительные материалы*. 2022. № 8. С. 31–35. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-805-8-31-35>

Yu. V. SOBOL, Candidate of Sciences (Enginereeng), Founder, A.M. ABRAMOV, Founder, E.V. POLUMIEV, Project Manager (guru-ad@mail.ru)
SKYGRAD INNOVATIONS LLC, (1/4, Pionerskaya Street, Yubileyny Microdistrict, Korolev, 141090, Moscow Oblast, Russian Federation)

New Technological Approaches in the Production of Artificial Gypsum Stone from Phosphogypsum*

An effective technology for the production of artificial gypsum stone from phosphogypsum has been developed. An integrated approach has been implemented in solving the issue of processing large-tonnage industrial waste, including the extraction of rare-earth elements from it. The possibilities of replacing natural gypsum stone as a setting regulator in the production of cement have been studied. It has been established that artificial gypsum stone from phosphogypsum can completely replace natural material. In the course of the work done, it was found that the dosage of the setting regulator can be significantly reduced. Industrial tests have shown the technological advantages of the gypsum stone obtained in terms of transportation, feeding and dosing.

Keywords: phosphogypsum, granulation, cement, artificial gypsum stone, ecology, waste disposal.

* The specialists of Skygrad Group of companies were awarded the Prize of the Governor of the Moscow Oblast in the fields of science, technology, engineering and innovation for the commercialization of scientific and (or) scientific and technical results in 2022. <https://mii.mosreg.ru/dokumenty/innovacii/premiya-gubernatora-moskovskoi-oblasti-v-sferakh-nauki-tehnologii-tehniki-i-innovacii-za-kommercializaciyu-nauchnykh-i-ili-nauchno-tehnicheskikh-rezultatov/02-08-2022-16-50-15-rasporyazhenie-gubernatora-moskovskoy-oblasti-ot>

The editorial board of the “Construction Materials” journal congratulates colleagues on this achievement and wishes prosperity and implementation of all scientific achievements in the industry.

For citation: Sobol Yu.B., Abramov A.M., Polumiev E.V. New technological approaches in the production of artificial gypsum stone from phosphogypsum. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2022. No. 8, pp. 31–35. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-805-8-31-35>

В настоящее время во всем мире концентрированные простые и сложные удобрения, содержащие P_2O_5 в водно-растворимой форме, производятся и будут производиться в основном на базе экстракционной фосфорной кислоты, получаемой сернокислым разложением фосфатного сырья. Образующийся при этом сульфат кальция в зависимости от температуры процесса и концентрации P_2O_5 в жидкой фазе кристаллизуется в виде дигидрата, полугидрата или ангидрита. В промышленности России используются только дигидратные и полудигидратные способы, за рубежом — также и дигидратно-полудигидратные, и полудигидратно-дигидратные способы. Получаемые в качестве побочного продукта дигидрат или полудигид-

рат сульфата кальция в связи с содержанием в них примесей P_2O_5 (неразложенного фосфата, недомытой фосфорной кислоты, сокристаллизационного P_2O_5) называют соответственно фосфогипс (ФГ) и фосфополугидрат. Но при рассмотрении проблемы транспортирования, хранения и использования оба продукта обычно называют фосфогипсом.

Фосфогипс является многотоннажным и весьма обременительным отходом производства. На отдельных предприятиях количество получаемого фосфогипса достигло огромных величин, а в целом по стране на сегодня в отвалах скопилось сотни миллионов тонн.

Вопросы использования фосфогипса становятся более актуальными по многим причинам:

– транспортирование фосфогипса в отвалы и его хранение в них связаны с большими капитальными вложениями и эксплуатационными затратами;

– для создания отвалов фосфогипса приходится отчуждать большие площади, иногда даже обрабатываемых земель;

– хранение фосфогипса в отвалах, даже при нейтрализации растворимых примесей и правильной эксплуатации отвала, наносит вред окружающей среде.

Негативное влияние отвалов фосфогипса на окружающую среду проявляется в загрязнении атмосферного воздуха, подземных и поверхностных вод, почвенно-растительного покрова вредными веществами. Поэтому решение вопросов, связанных с использованием фосфогипса, является весьма актуальным. Одно из перспективных направлений – использование фосфогипса в качестве сырья взамен природного для производства цемента и гипсовых вяжущих.

В работе использовали фосфогипс Воскресенского завода минеральных удобрений. Фосфогипс – полидисперсный материал серо-белого цвета, представленный агрегатами частиц, комками с межагрегатными пустотами. Удельная поверхность фосфогипса, определенная методом воздухопроницаемости на приборе ПСХ, составляет 3800 см²/г. Плотность фосфогипса, определенная после его предварительного измельчения и просеивания через сито с размером отверстий 0,063 мм пикнометрическим способом, составляет 2,2–2,4 г/см³. Насыпная плотность фосфогипса является величиной переменной и зависит от влажности, фракционного состава и степени его уплотнения. Угол естественного откоса фосфогипса в

покое при влажности $W=40-44\%$ составляет 50–55° соответственно, что свидетельствует об относительно низкой подвижности его частиц. Фосфогипс обладает большими силами сцепления частиц, это приводит к образованию комьев и статических сводов над выходным отверстием бункеров и затрудняет его истечение. Наличие сил сцепления между частицами является причиной зависания фосфогипса на наклонных и даже вертикальных стенках бункеров: влажные частицы прилипают к шероховатым стенкам, на них наслаиваются новые порции материала, которые уплотняются под давлением движущегося слоя.

Постепенно толщина адгезионного слоя увеличивается до тех пор, пока не образуется статический свод над отверстием бункера. В условиях длительного хранения фосфогипса в неподвижном слое он слеживается. Это создает большие трудности при отгрузке отвального фосфогипса и его дозировании.

Фосфогипс проявляет тиксотропные свойства, т. е. способен разжижаться при механических воздействиях (вибрация, встряхивание, перемешивание). Факт разжижения фосфогипса подтвержден в условиях его транспортирования ленточными транспортерами, автомашинами, по железной дороге. Он относится к очень влагоемким материалам: полная влагоемкость фосфогипса составляет примерно 66% (все поры заняты водой). Влажный фосфогипс проявляет большую коррозионную активность.

Плотность фосфогипса при его хранении и транспортировании изменяется в широких пределах. Так, если насыпная плотность фосфогипса в свободно насыпанном слое в зависимости от его влажности из-

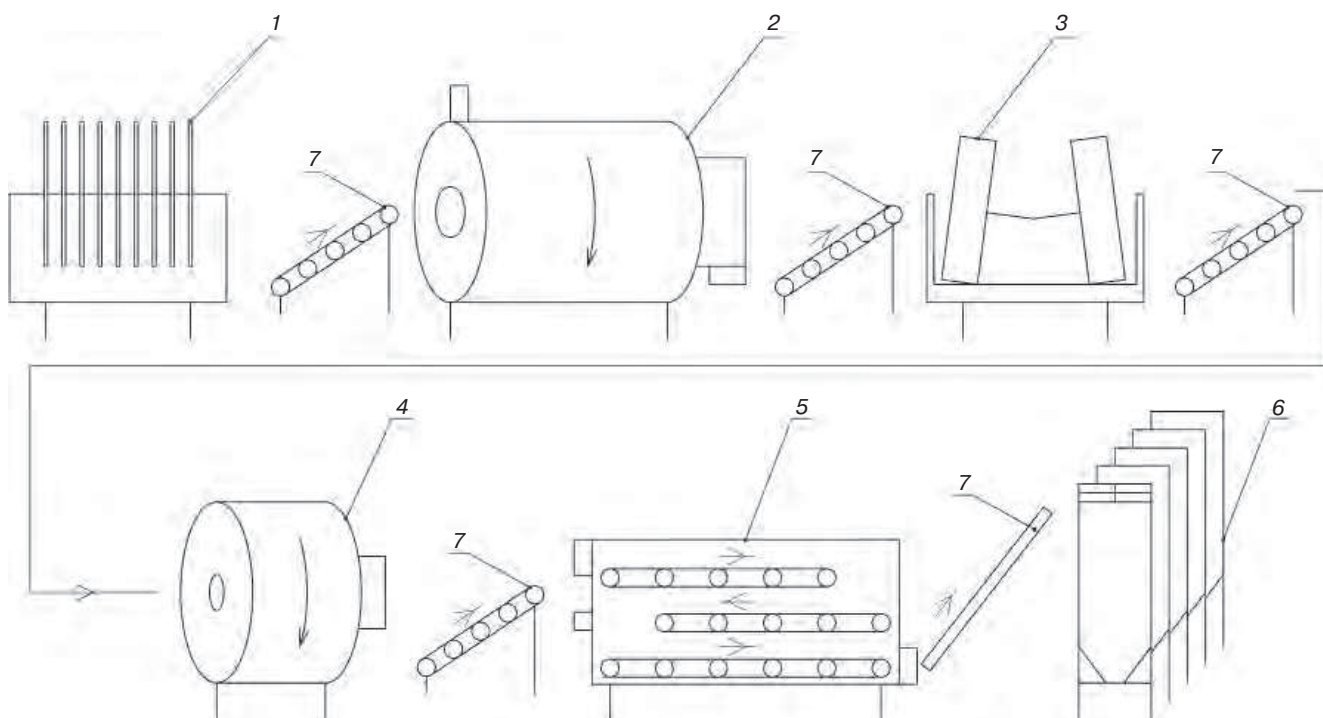


Рис. 1. Технологическая схема грануляции фосфогипса: 1 – вакуумный фильтр; 2 – предварительная сушилка; 3 – смеситель-гомогенизатор; 4 – гранулятор; 5 – сушилка; 6 – силос хранения; 7 – транспортер

Fig. 1. Technological scheme of phosphogypsum granulation: 1 – vacuum filter; 2 – preliminary dryer; 3 – mixer-homogenizer; 4 – granulator; 5 – dryer; 6 – storage silage; 7 – conveyor



Рис. 2. Общий вид гранул фосфогипса
Fig. 2. View of phosphogypsum granules

меняется в пределах $0,48\text{--}0,66\text{ г/см}^3$, то плотность уплотненного слоя фосфогипса, например в нижней части загруженного вагона, составляет $1\text{--}1,63\text{ г/см}^3$. Из-за перечисленных специфических физико-технических свойств фосфогипс может быть использован на действующих цементных и гипсовых предприятиях только в окускованном (гранулированном или брикетированном) виде.

Исследования и разработки по окускованию фосфогипса велись еще в Советском Союзе во ВНИИСТРОМ им. П.П. Будникова, МХТИ им. Д.И. Менделеева, НИУИФ, НИИЦементе и продолжают сегодня [1–4].

Однако разработанные технологические схемы и оборудование для гранулирования и брикетирования фосфогипса оказались достаточно энергоемкими, металлоемкими, требующими значительных капитальных затрат, создания дорогостоящих систем очистки и утилизации сточных вод или пылесосадиельных систем. В результате стоимость получаемого окускованного фосфогипса значительно превышала стоимость природного сырья.

Целью исследований, проводимых группой компаний «Скайград», является разработка комплексной безотходной промышленной технологии переработки отвалов фосфогипса и организация промышленного производства искусственного гипсового камня из фосфогипса, полученного после выделения группового концентрата редкоземельных элементов (РЗЭ), в Московской области на территории отвалов фосфогипса в Воскресенском районе мощностью 150 тыс. т/г .

В результате проведенных исследований разработана технология извлечения РЗЭ, создано опытно-промышленное производство [5–8] в г. Королев (Московская обл.). Образующийся после извлечения РЗЭ фосфогипс передается на опытно-промышленную линию производства искусственного гипсового камня. На рис. 1 представлена технологическая схема производства искусственного гипсового камня.

Отфильтрованная после очистки от РЗЭ, фосфора, фтора и нейтрализации влажная пластичная вязкая масса фосфогипса поступает в приемный бункер шнекового дозатора и в сушилку для подсушивания до технологической влажности $15\text{--}20\%$. Стабилизированный по влажности фосфогипс направляется в смеситель-гомогенизатор. Задача данной операции заключается в уплотнении и гомогенизации фосфогипса. В процессе обработки происходит существенное увеличение объемной плотности сырья.

Уплотненный фосфогипс выгружается на ленточный транспортер и подается в бункер-дозатор барабанного гранулятора. В грануляторе происходит окомкование и уплотнение материала. На выходе из гранулятора образуется полифракционный состав гранул в среднем от 5 до 30 мм. Гранулы размером $5\text{--}10\text{ мм}$ возвращаются на вход гранулятора для дополнительной грануляции и увеличения размеров. Остальные гранулы подаются в сушилку для окончательной сушки до требуемой влажности. Готовый гранулированный гипсовый камень поступает на склад готовой продукции.

Форма и полифракционный состав продукта (рис. 2) позволяют использовать для его перемещения нестандартные методы. В данном случае для этого использован пневмотранспорт, который позволяет подавать материал трубопроводом на расстояние до 200 м.

Исследование возможности использования полученного на опытно-промышленной установке ООО «Скайград Инновации» искусственного гипсового камня из фосфогипса в качестве регулятора сроков схватывания проводили на кафедре цемента БГТУ им. В.Г. Шухова

Для проведения испытаний были использованы клинкеры ЗАО «Белгородский Цемент» и АО «Себряковцемент».

Таблица 1
Table 1

Химический состав искусственного гипса
The chemical composition of a man-made gypsum

Оксиды	CaO	SO ₃	SrO	MgO	SiO ₂	P ₂ O ₅	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Другие	ППП
Мас. %	32,2	43,2	1,53	0,89	0,65	0,34	0,18	0,14	0,42	20,45

Таблица 2
Table 2

Химический состав новомосковского гипса
Chemical composition of Novomoskovsk gypsum

Оксиды	CaO	SO ₃	SrO	MgO	SiO ₂	P ₂ O ₅	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Другие	ППП
Мас. %	30,7	42,39	0,0481	2,85	1,12	-	0,32	0,12	0,35	22,1

**Таблица 3
Table 3**

**Результаты испытаний по определению сроков схватывания с гипсом
Results of tests to determine the setting time with gypsum**

% гипса по SO ₃ сред	Белгородский клинкер + новомосковский гипс			Белгородский клинкер + искусственный гипс			Клинкер «Себряковцемент» + новомосковский гипс			Клинкер «Себряковцемент» + искусственный гипс		
	Начало схватывания	Конец схватывания	% гипса уточнен по хим. анализу	Начало схватывания	Конец схватывания	% гипса уточнен по хим. анализу	Начало схватывания	Конец схватывания	% гипса уточнен по хим. анализу	Начало схватывания	Конец схватывания	% гипса уточнен по хим. анализу
3,7	4 ч 15 мин	5 ч 20 мин	3,86	5 ч 50 мин	6 ч 50 мин	4,22	4 ч 50 мин	5 ч 30 мин	3,7	5 ч 50 мин	6 ч 45 мин	3,7
2,35	3 ч 35 мин	4 ч 45 мин	2,55	3 ч 25 мин	4 ч 45 мин	2,44	4 ч 25 мин	5 ч 10 мин	2,47	4 ч 55 мин	5 ч 45 мин	2,31

Произведен совместный помол клинкера и гипса в шаровой лабораторной мельнице с остатком на сите № 008 не более 7%. Для сравнения использовали также новомосковский гипсовый камень, применяемый ЗАО «Белгородский Цемент» при производстве цемента.

Проведен химический анализ искусственного гипсового камня (табл. 1), новомосковского гипса (табл. 2) и полученных цементов на себряковском и белгородском клинкере с гранулами и новомосковским гипсом.

Гипс в пересчете на SO₃ вводили в клинкер в двух дозировках – 2,35 и 3,7% (ГОСТ 31108–2016 «Цементы общестроительные. Технические условия»).

Определение сроков схватывания проводили по методике, изложенной в ГОСТ 30744–2001 «Методы испытаний». Результаты испытаний приведены в табл. 3.

Из данных табл. 3 видно, что введение 3,7% несколько замедляет начало сроков схватывания на обоих клинкерах. Использование новомосковского

и искусственного гипса при снижении введения SO₃ до 2,35% не дает отличий в сроках начала и конца схватывания.

Таким образом, регулируя количество вводимого гипса в пересчете на SO₃, можно изменять сроки схватывания.

Полупромышленные испытания искусственного гипсового камня были проведены на ряде цементных заводов Центрального региона России, таких как Серебрянский, Подольский и др.

Результаты испытаний в заводских лабораториях подтвердили выводы, сделанные кафедрой цемента БГТУ им. В.Г. Шухова о том, что содержание SO₃ в гранулах из фосфогипса выше (43,8%), чем в природном гипсовом камне (38%), что позволяет снизить дозировку при помолу цемента.

Также отмечено, что искусственный гипсовый камень из фосфогипса имеет неоспоримые технологические преимущества при транспортировке, подаче и дозировании.

Список литературы

1. Шестаков В.Л., Дворкин Л.И. Возможность гранулирования фосфогипса // *Цемент*. 1983. № 7.
2. Бурьянов А.Ф. Гипс, его исследование и применение – от П.П. Будникова до наших дней // *Строительные материалы*. 2005. № 9. С. 40–44.
3. Михеенков М.А. Искусственный гипсовый камень на основе фосфогипса // *Цемент и его применение*. 2009. № 5. С. 81–84.
4. Михеенков М.А., Ким В.Д., Полянский Л.И. Производство искусственного гипсового камня // *Строительные материалы*. 2010. № 7. С. 13–17.
5. Абрамов А.М., Соболев Ю.Б., Галиева Ж.Н., Галиев Р.С., Сабина О.Р. Комплексная технология переработки фосфогипса с получением концентрата РЗМ, гипсового вяжущего и строительных изделий на его основе. *Редкоземельные элементы: геология, химия, производство и применение: Сб. материалов международной конференции*. Москва. 29–31 октября 2012. С. 41–42.
6. Галиева Ж.Н., Абрамов А.М., Соболев Ю.Б., Игумнов М.С., Геря В.О., Шулин С.С.,

References

1. Shestakov V.L., Dvorkin L.I. Possibility of phosphogypsum granulation. *Tsement*. 1983. No. 7. (In Russian).
2. Buryanov A.F. Gypsum, its research and application – from P.P. Budnikov to the present day. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2005. No. 9, pp. 40–44. (In Russian).
3. Mikheenkov M.A. Artificial gypsum stone based on phosphogypsum. *Tsement i yego primeneniye*. 2009. No. 5, pp. 81–84. (In Russian).
4. Mikheenkov M.A., Kim V.D., Polyansky L.I. Production of artificial gypsum stone. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2010. No. 7, pp. 13–17. (In Russian).
5. Abramov A.M., Sobol' Yu.B., Galieva Zh.N., Galiev R.S., Sabinina O.R. Integrated technology for the processing of phosphogypsum with the production of REM concentrate, gypsum binder and building products based on it. *Rare earth elements: geology, chemistry, production and application: Proceedings of the international conference*. Moscow. October 29–31, 2012, pp. 41–42. (In Russian).

- Чижевская С.В. Разработка универсальной технологии и оборудования для разделения редкоземельных концентратов в каскадах центробежных экстракторов, освоение производства // *Химическая промышленность сегодня*. 2019. № 3. С. 54–60.
7. Патент 2487834 РФ: МПК51 C01F 17/00. Способ извлечения редкоземельных металлов из фосфогипса / Абрамов А.М., Галиева Ж.Н., Галиев Р.С., Сабина О.Р., Соболев Ю.Б. Патентообладатель ООО «Лаборатория Инновационных Технологий». Заявл. 27.12.2011. Оpubл. 20.07.2013. Бюл. № 20. 8 с.
 8. Abramov A.M., Volobuev O.I., Galieva Zh.N., Sobol' Yu.B., Solodovnikov A.V., Yachmenov A.A., Kuznetsov G.I., Kosogorov A.V., Trusilov N.N. Separating rare-earth elements on centrifugal extractors: developing technology, designing equipment, and engineering production. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*. 2020. Vol. 54. No. 4, pp. 762–768. DOI: 10.1134/S0040579520040028
 6. Galieva Zh.N., Abramov A.M., Sobol Yu.B., Igumnov M.S., Gerya V.O., Shulin S.S., Chizhevskaya S.V. Development of universal technology and equipment for the separation of rare earth concentrates in cascades of centrifugal extractors, mastering production. *Khimicheskaya promyshlennost' segodnya*. 2019. No. 3, pp. 54–60. (In Russian).
 7. Patent 2487834 RF: MPK51 C01F 17/00 A method for extracting rare earth metals from phosphogypsum. Abramov A.M., Galieva Zh.N., Galiev R.S., Sabinina O.R., Sobol Yu.B. Patent holder LLC “Laboratory of Innovative Technologies”. Declared 12/27/2011. Published 07/20/2013. Bull. No. 20. 8 p. (In Russian).
 8. Abramov A.M., Volobuev O.I., Galieva Zh.N., Sobol' Yu.B., Solodovnikov A.V., Yachmenov A.A., Kuznetsov G.I., Kosogorov A.V., Trusilov N.N. Separating rare-earth elements on centrifugal extractors: developing technology, designing equipment, and engineering production. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*. 2020. Vol. 54. No. 4, pp. 762–768. DOI: 10.1134/S0040579520040028

СТРОИТЕЛЬНЫЕ
МАТЕРИАЛЫ®

КОНКУРС НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИХ СТАТЕЙ

РОССИЙСКАЯ
ГИПСОВАЯ
АССОЦИАЦИЯ

Технологическая безопасность гипсовой отрасли:

результаты научных исследований

развитие технологии и оборудования

применение гипсовых материалов в строительстве



Редакция научно-технического журнала «Строительные материалы» и Российская гипсовая ассоциация объявляют конкурс научных и научно-практических статей по гипсовой тематике.

В конкурсе принимают участие статьи, опубликованные в течение года с № 8-2022 г. по № 8-2023 г. по темам:

- Результаты научных исследований в области создания новых и оптимизации существующих гипсовых материалов
- Развитие технологии производства гипсовых материалов и изделий
- Техногенные гипсовые отходы и возможность их вовлечения в производство
- Применение гипсовых материалов в строительстве

Объявление итогов конкурса и награждение победителей состоится в рамках 11-й Международной научно-практической конференции «Повышение эффективности производства и применения гипсовых материалов и изделий»

К участию в конкурсе приглашаются:

магистранты, аспиранты, соискатели ученой степени кандидата и доктора наук, сотрудники производственных предприятий и научно-производственные коллективы.

Рукописи статей необходимо представлять в редакцию в соответствии с техническими требованиями (см. раздел «Авторам» на сайте журнала <https://journal-cm.ru/index.php/ru/avtoram>) с пометкой «На конкурс статей по гипсу».

Крайний срок подачи конкурсных статей 1 июля 2023 г.

Конкурсная комиссия определяет лучшие статьи и объявляет победителей конкурса.

Победители конкурса награждаются ценными подарками, годовой подпиской на журнал «Строительные материалы» на 2024 г. и дипломами лауреата.

Авторам всех конкурсных статей вручаются дипломы участников конкурса.


www.rifsm.ru
www.journal-cm.ru
www.rosgips.ru

(499) 976-20-36, 976-22-08

А.Ф. БУРЬЯНОВ¹, д-р техн. наук (rga-service@mail.ru);
Х.-Б. ФИШЕР², доктор-инженер (hans-bertram.fischer@uni-weimar.de);
В.Ф. КОРОВЯКОВ¹, д-р техн. наук (vasilykor@yandex.ru),
Н.А. ГАЛЬЦЕВА¹, канд. техн. наук (galcevanadezda@mail.ru),
Е.Н. БУЛДЫЖОВА³, инженер (nusik-9o@yandex.ru)

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

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

³ Московский институт психоанализа, НОЧУ ВО (121170, г. Москва, Кутузовский пр-т, 34, стр. 14)

Ангидритовое вяжущее, модифицированное комплексной добавкой, для сухих строительных смесей

Разработанная комплексная добавка на основе портландцемента, сульфата калия и железного купороса благоприятно влияет на физико-технические свойства ангидритовых вяжущих. Получены математические модели, позволяющие проектировать материал на основе обжигового модифицированного ангидритового вяжущего с заданными свойствами по срокам схватывания и прочностным характеристикам. Комплексный активатор влияет на ускорение гидратации нерастворимого ангидрита и процессы, происходящие при этом. Установлено оптимальное соотношение щелочного и сульфатных ускорителей твердения для активации различных ангидритовых вяжущих: для синтетического и природного ангидритовых вяжущих – щелочного компонента 3,5–5%; сульфатных – 1,5–2% сульфата калия, 0,6–1% железного купороса; для обжигового ангидритового вяжущего – щелочного компонента 2–3,5%; сульфатных – 1–1,5% сульфата калия, 0,2–0,6% железного купороса. Модифицирование ангидритовой системы разработанной добавкой положительно влияет на структурообразование твердеющих образцов. Разработаны составы сухих строительных смесей для стяжки пола на основе модифицированного ангидритового вяжущего с заданными эксплуатационными свойствами. Данные сухие смеси могут применяться в помещениях для слабых, умеренных и значительных нагрузок в зависимости от предела прочности при сжатии.

Ключевые слова: ангидритовое вяжущее, обжиг, активатор твердения, пластификатор, сухие строительные смеси.

Для цитирования: Бурьянов А.Ф., Фишер Х.-Б., Коровяков В.Ф., Гальцева Н.А., Булдыжова Е.Н. Ангидритовое вяжущее, модифицированное комплексной добавкой, для сухих строительных смесей // *Строительные материалы*. 2022. № 8. С. 36–40. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-805-8-36-40>

A.F. BURYANOV¹, Doctor of Sciences (Engineering) (rga-service@mail.ru); H.-B. FISHER², Doctor-Engineer (hans-bertram.fischer@uni-weimar.de); V.F. KOROVIAKOV¹, Doctor of Sciences (Engineering) (vasilykor@yandex.ru),

N.A. GALTSEVA¹, Candidate of Sciences (Engineering) (galcevanadezda@mail.ru), E.N. BULDIZHOVA³, Engineer (nusik-9o@yandex.ru)

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

² Weimar University of Civil Engineering (11, Coudraystraße, Weimar, 99421, Germany)

³ Moscow Institute of Psychoanalysis NIGHT VO (34, building 14, Kutuzovsky Avenue, Moscow, 121170, Russian Federation)

Anhydrite Binder Modified with a Complex Additive for Dry Building Mixtures

The complex additive as Portland cement, potassium sulfate and ferrous sulphate has a positive effect on the physical and technical properties of anhydrite binders. Mathematical models have been obtained that make it possible to design a material based on a fired modified anhydrite binder with specified properties in terms of setting time and strength characteristics. The complex activator affects the acceleration of the hydration of insoluble anhydrite and the processes occurring in this case. The optimal ratio of alkaline and sulfate hardening accelerators for activating various anhydrite binders has been established: for synthetic and natural anhydrite binders - an alkaline component of 3.5–5% and sulfate: 1.5–2% potassium sulfate, 0.6–1% iron sulfate; for roasting anhydrite binder – alkaline component 2–3.5% and sulfate: 1–1.5% potassium sulfate, 0.2–0.6% ferrous sulfate. Modification of the anhydrite system with the developed additive has a positive effect on the structure formation of hardening samples based on anhydrite binder. Compositions of dry building mixtures for floor screed based on modified anhydrite binder with specified performance properties have been developed. These dry mixes can be used in rooms for light, moderate and heavy loads, depending on the compressive strength.

Keywords: anhydrite binder, firing, hardening activator, plasticizer, dry building mixtures.

For citation: Buryanov A.F., Fisher H.-B., Koroviakov V.F., Galtseva N.A., Buldizhova E.N. Anhydrite binder modified with a complex additive for dry building mixtures. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2022. No. 8, pp. 36–40. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-805-8-36-40>

Одной из важнейших задач строительного комплекса России является рациональное использование природных минеральных и энергетических ресурсов. Применение нерастворимого ангидрита в качестве вяжущего, модифицированного комплексным активатором, при получении эффективных сухих строительных смесей для стяжки пола с заданными эксплуатационными характеристиками позволит расширить сырьевую базу гипсовых материалов, а также создать эффективный конку-

рентоспособный аналог применяемых сухих строительных смесей [1, 2].

Ангидритовое вяжущее активно внедряется в строительную отрасль как в России, так и за рубежом, что способствует исследованиям двухводного сульфата кальция [3–5].

Материалы и методы исследования

В исследованиях применялся природный гипсовый камень Бесленевского месторождения, который под-

вергался обжигу во вращающейся печи при температуре 900°C для получения нерастворимого ангидрита.

В качестве активаторов твердения применялись сульфатные химические реактивы марок ЧДА (чисты для анализа) и ХЧ (химически чистый) и щелочные – портландцемент производства ОАО «НОВОРОСЦЕМЕНТ» марки 500 без минеральных добавок.

В качестве пластифицирующей добавки использовался суперпластификатор на меламиновой основе марки «Melment».

Для изготовления сухих строительных смесей использовался природный песок ОАО «Хромцовский карьер».

Результаты исследований

Гидратация ангидритового вяжущего возможна только с применением ускорителей твердения. Ускорения твердения ангидрита можно достигнуть с помощью веществ, которые или ускоряют растворение исходного вяжущего, или способствуют образованию зародышей новой фазы. Литературный анализ ранее проведенных исследований позволяет сделать вывод, что комплексный активатор на основе портландцемента, сульфата калия и железного купороса положительно влияет на физико-механические свойства ангидритовых вяжущих [6–8].

Подбор оптимального содержания компонентов, в нашем случае активатора твердения, возможно произ-

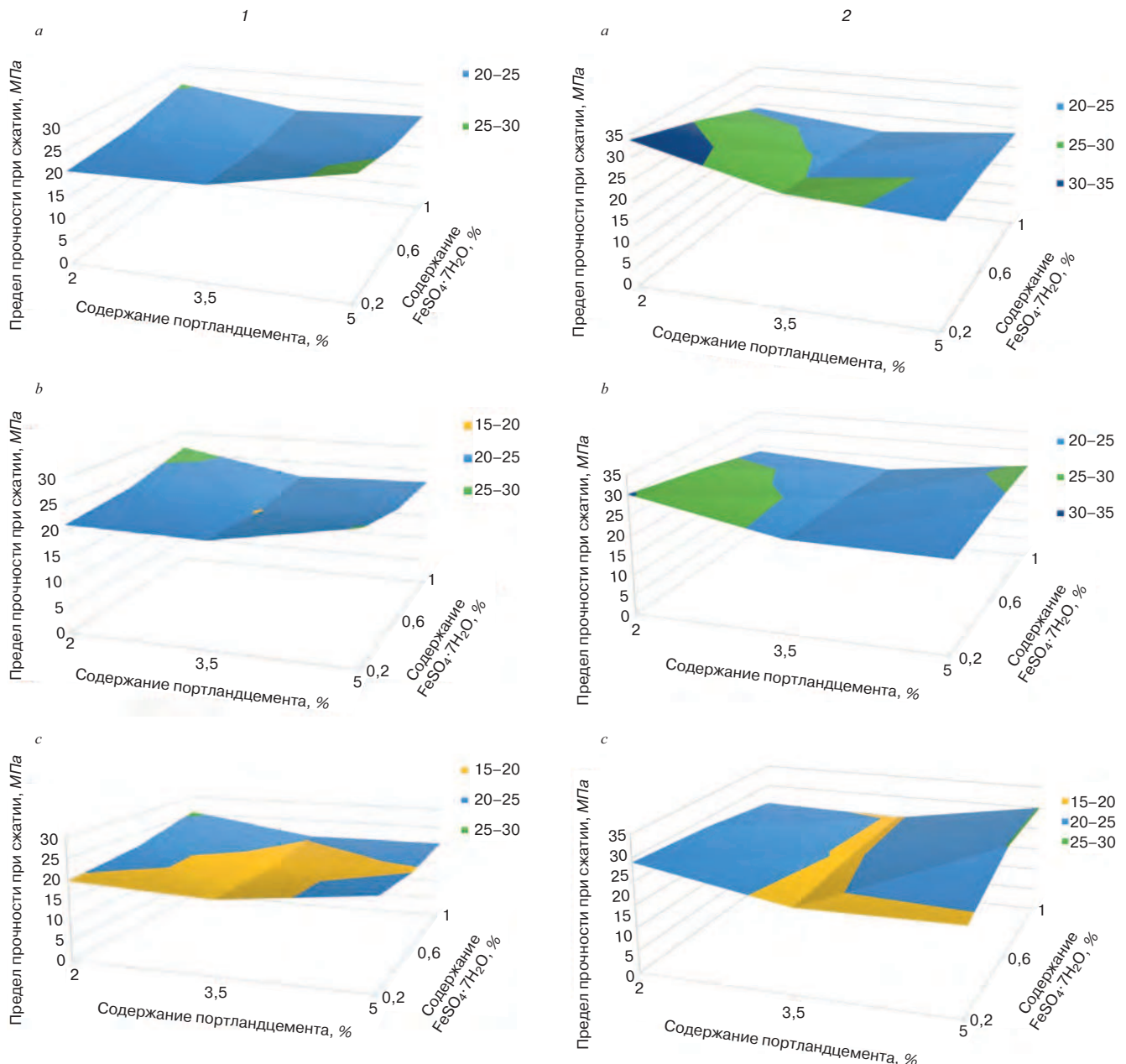


Рис. 1. Зависимость прочности при сжатии образцов в возрасте 7 сут (1) и 28 сут (2) от содержания портландцемента, $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, МПа: *a* – содержание K_2SO_4 – 1%; *b* – содержание K_2SO_4 – 1,5%; *c* – содержание K_2SO_4 – 2%

Fig. 1. Dependence of the compressive strength of specimens aged 7 days on the content of Portland cement, $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, МПа: *a* – content of K_2SO_4 – 1%; *b* – content of K_2SO_4 – 1.5%; *c* – content of K_2SO_4 – 2%

водить с применением математического планирования эксперимента [9]. Факторами варьирования приняты портландцемент (ПЦ 500 Д0), K_2SO_4 и $FeSO_4 \cdot 7H_2O$, а выходными параметрами – начало схватывания и прочностные показатели при сжатии на 7-е и 28-е сут.

Были получены математические модели (уравнения регрессий) вида полинома второй степени для тройной системы следующего вида:

$$R_7 = 20 - X_2 + 0,6 \cdot X_3 + 2,7 \cdot X_1^2 - X_2^2 + 1,2 \cdot X_3^2 - 0,8 \cdot X_1 \cdot X_2 - 2,1 \cdot X_1 \cdot X_3 + 0,5 \cdot X_2 \cdot X_3; \quad (1)$$

$$R_{28} = 22,9 - X_1 - 2,1 \cdot X_2 - 1,3 \cdot X_3 - 0,5 \cdot X_1^2 - 1,2 \cdot X_2^2 + 3,2 \cdot X_3^2 + 1,6 \cdot X_1 \cdot X_2 + 2,4 \cdot X_1 \cdot X_3 + 1,2 \cdot X_2 \cdot X_3; \quad (2)$$

$$R_{н.с.} = 96,6 - 4,4 \cdot X_1 - 2 \cdot X_2 - 2,5 \cdot X_3 - 2,4 \cdot X_1^2 - 10,4 \cdot X_2^2 - 5,9 \cdot X_3^2 - 0,4 \cdot X_1 \cdot X_2 - 1,1 \cdot X_1 \cdot X_3 - 1,6 \cdot X_2 \cdot X_3. \quad (3)$$

На основании уравнений регрессии были построены поверхностные диаграммы прочностных зависимостей образцов на 7-е и 28-е сут, позволяющие определить оптимальное содержание активатора твердения (рис. 1).

С увеличением срока твердения прочность при сжатии падает как у образцов, содержащих активатор в составе 1% $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ и 2% портландцемента, так и у образцов, содержащих активатор 0,2–0,6% $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ и 5% портландцемента. Падение прочности происходит из-за активизации рекристаллизационных процессов. В первом случае использование большего количества железного купороса приводит к быстрому формированию структуры и набору прочности, что ведет к деформациям образцов из-за роста новообразований в уже сформировавшейся структуре. Во втором случае при введении большего количества портландцемента формируются гидросульфаталюминаты кальция, которые сначала приводят к уплотнению структуры и затем их расширение приводит к разрушению образцов. Также падение прочности происходит из-за крупных пор, образованных кристаллами, которые меньше срослись друг с другом [10].

На основании полученных прочностных зависимостей было установлено, что между щелочным и сульфатным активаторами должно быть определенное соотношение, а именно:

- щелочного компонента 2–3,5%;
- сульфатных: 1–1,5% сульфата калия; 0,2–0,6% железного купороса.

Отклонение от приведенных соотношений приводит к падению прочности.

Таким образом, прочность полученного материала определяется количеством новообразований, а также прочностью связей между кристаллами и количеством контактов между ними. При введении оптимального количества активатора прочностные характеристики повышаются, но при переходе через оптимальную концентрацию активатора происходит падение прочности затвердевших образцов.

На основании полученной математической модели построены диаграммы начала схватывания анги-

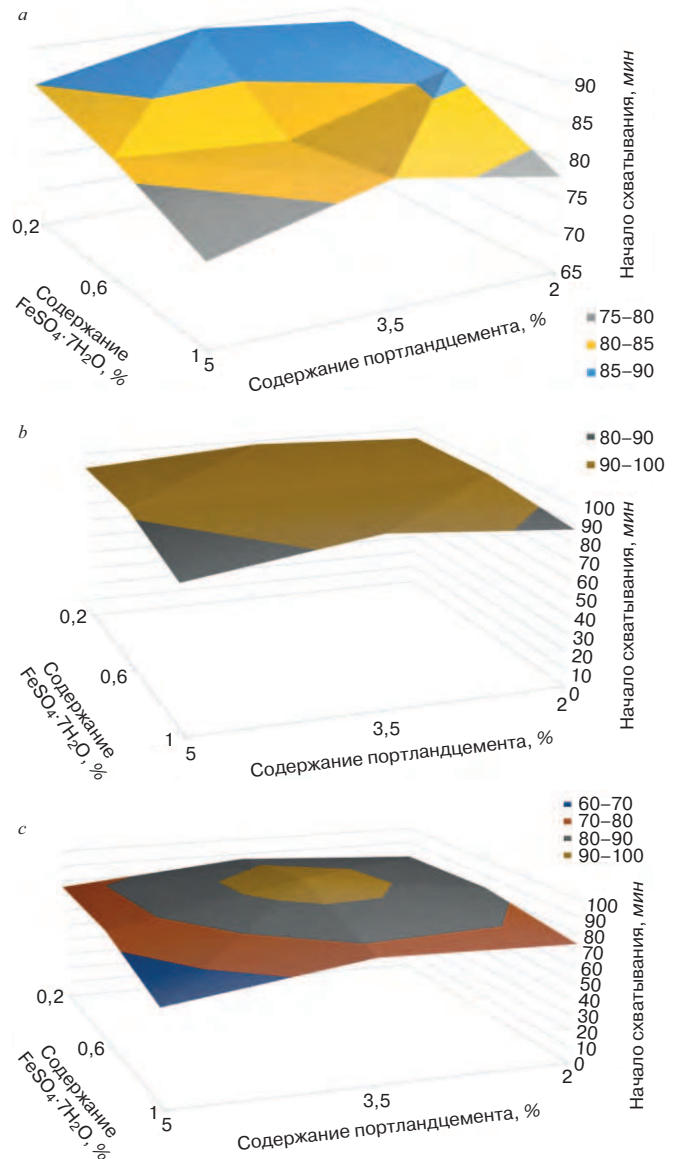


Рис. 2. Зависимость начала схватывания ангидритового теста от содержания портландцемента, $FeSO_4 \cdot 7H_2O$, мин: а – содержание K_2SO_4 – 1%; б – содержание K_2SO_4 – 1,5%; в – содержание K_2SO_4 – 2%
 Fig. 2. Dependence of the beginning of setting of anhydrite dough on the content of Portland cement, $FeSO_4 \cdot 7H_2O$, min: а – content of K_2SO_4 – 1%; б – content of K_2SO_4 – 1.5%; в – content of K_2SO_4 – 2%

дритового теста в зависимости от содержания активатора твердения (рис. 2).

Полученные результаты свидетельствуют о том, что смесевой активатор ускоряет начало схватывания. Установлено, что при введении активатора в количестве: щелочного компонента 2–3,5% и сульфатных: 1–1,5% сульфата калия; 0,2–0,6% железного купороса начало схватывания попадает в область от 80 до 100 мин, а использование активатора, включающего щелочного компонента 3,5–5% и сульфатных: 1,5–2% сульфата калия, 0,6–1% железного купороса, приводит к сокращению начала схватывания, которое находится в пределе 60–80 мин.

С помощью электронной микроскопии была изучена микроструктура полученных образцов (рис. 3).

В образце с комплексной добавкой на кристаллах ангидрита наблюдается рост продуктов гидратации.

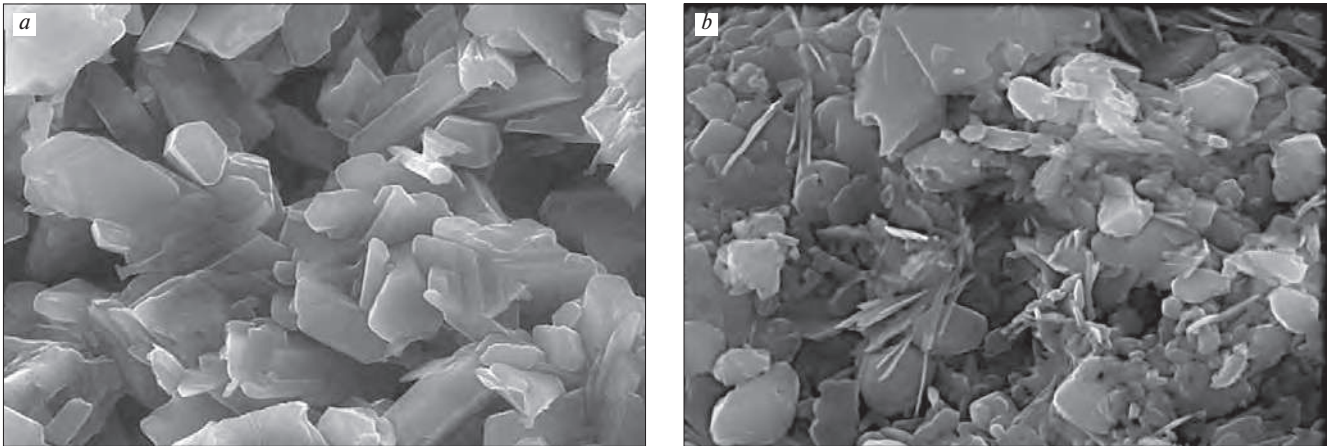


Рис. 3. Микроструктура затвердевшего образца: а – образец, содержащий 2% K_2SO_4 (10 μm); б – образец, содержащий комплексную добавку (2 μm)
 Fig. 3. Microstructure of the hardened sample: a – sample containing 2% K_2SO_4 (10 μm); b – sample containing a complex additive (2 μm)

Составы сухих строительных смесей для стяжки пола Compositions of dry building mixes for floor screed

Состав смеси, кг/м ³	1 (1:2)	2 (1:1,5)	3 (1:1)	4 (1:0,5)	По ГОСТ 31358–2019
Модифицированное вяжущее на основе обжигового ангидрита*	694	833	1042	1389	–
Строительный песок	1384	1250	1042	695	–
Вода	374	396	417	438	–
Свойства строительных смесей для стяжки пола					
Плотность раствора, кг/м ³	2452	2479	2501	2522	Нормируется производителем
Распływ, см	24	22	23	22	$R_{к5}$
Водоотделение, %	2	0,5	0	0	Не нормируется ГОСТом
Жизнеспособность не менее, мин	40	40	40	40	Нормируется производителем
Прочность при сжатии 7 сут, МПа	4,3	7,2	17,3	19,1	Не нормируется ГОСТом
Прочность при сжатии 28 сут, МПа	6,5	10,2	20,4	23,2	V3,5/V5/ V15/ V15
Прочность при изгибе, МПа	2,3	4,1	6,9	7,5	$B_{тб}1,6/B_{тб}3,2/B_{тб}4,4/B_{тб}5,2$
Коэффициент размягчения	–	0,5	0,6	0,6	Не нормируется ГОСТом
Прочность сцепления с основанием не менее, МПа	–	0,4	0,4	0,4	0,3
Усадка не более, мм/м	–	0,4	0,3	0,3	1,5
Выход раствора из 1 кг сухой смеси, мм ³	481,2	480	479,8	479,7	Нормируется производителем
* Модифицированное вяжущее на основе обжигового ангидрита с активатором ПЦ 500 Д0 – 3,5%; K_2SO_4 – 1,5%; $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ – 0,6%; пластификатор 1–2%.					

Структура образца более плотная с кристаллами различной формы, в которой ангидритовые столбчатые кристаллы служат каркасом, а удлиненные иглы двуводного гипса выступают как связующая матрица. Следовательно, комплексная добавка положительно влияет на структурообразование твердеющих образцов на основе ангидритового вяжущего.

На основании полученного модифицированного ангидритового вяжущего разработаны составы сухих строительных смесей для стяжки пола (см. таблицу). В качестве добавки, повышающей удобоукладываемость ангидритовых смесей, используется пластификатор Melment F10.

Из полученных данных можно заключить, что при увеличении соотношения вяжущее:песок на-

блюдается тенденция к ухудшению свойств как растворов, так и затвердевших образцов. Поэтому при получении смесей с требуемыми свойствами соотношение вяжущее:песок не должно превышать 1:1,5.

Заключение и основные выводы

Представленные результаты исследований в области управления процессами структурообразования ангидритовых матриц могут быть использованы как методологическая база для проектирования высокоэффективных гипсовых материалов с заданными технологическими и эксплуатационными характеристиками. Это позволит эффективно решать прикладные задачи снижения энерго- и ресурсоемкости производства и повышения качества строительных материалов.

Список литературы

1. Guerra-Cossio M.A., González-Lopez J.R., Magalanes-Rivera R.X., Zaldivar-Cadena A.A., Figueroa-Torres M.Z. Calcium sulfate: an alternative for environmentally friendly construction. *Conference: 2nd International Conference on Bio-based Building Materials & 1st Conference on ECOlogical valorisation of GRAnular and Ffbrous 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. Мешчеряков Ю.Г., Фёдоров С.В., Сучков В.П. Влияние условий дегидратации гипса и фосфогипса на структуру и технические свойства вяжущего // *Строительные материалы*. 2020. № 7. С. 23–27. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-782-7-23-27>
4. Petropavlovskaya V., Sulman M., Novichenkova T., Zavadko M., Petropavlovskii K. Gypsum composition with a complex based on industrial waste. *Chemical Engineering Transactions*. 2021. Vol. 88, pp. 1009–1014. <https://doi.org/10.3303/CET2188168>
5. 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>
6. 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.
7. Токарев Ю.В., Яковлев Г.И., Бурьянов А.Ф. Ангидритовые композиции, модифицированные ультрадисперсной добавкой на основе MgO // *Строительные материалы*. 2012. № 7. С. 17–19.
8. Клименко В.Г., Павленко В.И., Гасанов С.К. Кислотно-основные взаимодействия в гипсостекляных системах // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2015. № 5. С. 77–81.
9. Бурьянов А.Ф., Гальцева Н.А., Булдыжова Е.Н., Петропавловский К.С. Возможность разработки модели твердения ангидритового вяжущего // *Сборник статей III Всероссийской научно-практической конференции «Молодые ученые России»*. 2020. С. 28–30.
10. Бурьянов А.Ф., Фишер Х.-Б., Соколова Ю.А., Гальцева Н.А., Булдыжова Е.Н. Изучение влияния температуры обжига на природный гипсовый камень. *Строительное материаловедение: настоящее и будущее: Сборник материалов II Всероссийской научной конференции, посвященной столетнему юбилею Московского государственного строительного университета МИСИ – МГСУ. Москва, 18–19 ноября 2021 г.* С. 9–11.

References

1. Guerra-Cossio M.A., González-Lopez J.R., Magalanes-Rivera R.X., Zaldivar-Cadena A.A., Figueroa-Torres M.Z. Calcium sulfate: an alternative for environmentally friendly construction. *Conference: 2nd International Conference on Bio-based Building Materials & 1st Conference on ECOlogical valorisation of GRAnular and Ffbrous 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. Meshcheryakov Yu.G., Fedorov S.V., Suchkov V.P. Influence of gypsum and phosphogypsum dehydration conditions on the structure and technical properties of the binder. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2020. No. 7, pp. 23–27. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-782-7-23-27>
4. Petropavlovskaya V., Sulman M., Novichenkova T., Zavadko M., Petropavlovskii K. Gypsum composition with a complex based on industrial waste. *Chemical Engineering Transactions*. 2021. Vol. 88, pp. 1009–1014. <https://doi.org/10.3303/CET2188168>
5. 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>
6. Klimenko V.G. The role of double salts based on sulfates Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , NH_4^+ in the technology of obtaining anhydrite binders. *Vestnik BSTU named after V.G. Shukhov*. 2017. No. 12, pp. 119–125. (In Russian).
7. Tokarev Yu.V., Yakovlev G.I., Buryanov A.F. Anhydrite compositions modified with an ultrafine additive based on MgO . *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2012. No. 7, pp. 17–19. (In Russian).
8. Klimenko V.G., Pavlenko V.I., Gasanov S.K. Acid-base interactions in gypsum glass systems. *Vestnik BSTU named after V.G. Shukhov*. 2015. No. 5, pp. 77–81. (In Russian).
9. Buryanov A.F., Galtseva N.A., Buldyzhova E.N., Petropavlovsky K.S. The possibility of developing an anhydrite binder hardening model. *Collection of articles of the III All-Russian scientific and practical conference “Young scientists of Russia”*. 2020, pp. 28–30.
10. Buryanov A.F., Fisher Kh.-B., Sokolova Yu.A., Gal'tseva N.A., Buldyzhova E.N. Study of the effect of firing temperature on natural gypsum stone. *Construction materials science: present and future: collection of materials of the II All-Russian scientific conference dedicated to the centenary of the Moscow State University of Civil Engineering. Moscow, November 18–19, 2021*, pp. 9–11. (In Russian).

УДК 691.311

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-805-8-41-45>

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

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

² Институт проблем комплексного освоения недр РАН (111020, г. Москва, Крюковский тупик, 4)

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

Механокомпозиты на основе ангидрита: свойства и применение

Наиболее эффективным способом повышения строительно-технических характеристик вяжущих и материалов на основе сульфата кальция является их модификация за счет использования минеральных добавок. Особый интерес среди модификаторов структуры представляют так называемые механокомпозиты, которые образуются в результате интенсивной механической обработки смеси минеральных компонентов. Механокомпозиты представляют собой метастабильные структуры с высокой плотностью межфазных границ между исходными компонентами, что обеспечивает очень большую концентрацию дефектов на поверхностях и в приповерхностных слоях. При измельчении в центробежно-ударной мельнице смеси ангидрита и глиноземистого шлака получен механокомпозит, представляющий собой систему $\text{CaSO}_4\text{-CaO-Al}_2\text{O}_3$ и состоящий из алюминатов и сульфоалюминатов кальция. Данный механокомпозит используется для активации процесса твердения ангидритового вяжущего за счет образования при его гидратации гидроксидов кальция, алюминия и гидроалюминатов кальция. В вяжущей системе с механокомпозитом кристаллизация двухводного гипса происходит по механизму ориентированного сращивания частиц с образованием дендритов, которые характеризуются четкой взаимной кристаллографической ориентацией ветвей. Это способствует росту прочности ангидритового камня.

Ключевые слова: ангидрит, глиноземистый шлак, механохимическая активация, механокомпозит.

Для цитирования: Гаркави М.С., Артамонов А.В., Колодежная Е.В., Дергунов С.А., Сериков С.В. Механокомпозиты на основе ангидрита: свойства и применение // *Строительные материалы*. 2022. № 8. С. 41–45.

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-805-8-41-45>

M.S. GARKAVI¹, Doctor of Sciences (Engineering) (mgarkavi@mail.ru),

A.V. ARTAMONOV¹, Candidate of Sciences (Engineering) (aav@uralomega.ru);

E.V. KOLODEZHNYAYA², Candidate of Sciences (Engineering) (kev@uralomega.ru);

S.A. DERGUNOV³, Candidate of Sciences (Engineering) (dergunow79@mail.ru), S.V. SERIKOV³, Engineer (svserikov@list.ru)

¹ Ural-Omega ZAO (89, bldg. 7, Lenina Avenue, Magnitogorsk, 455037, Russian Federation)

² Institute for the Problems of Integrated Development of Mineral Resources of the Russian Academy of Sciences (4, Kryukovsky Tupik, Moscow, 111020, Russian Federation)

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

Mechanocomposites Based on Anhydrite: Properties and Applications

The most popular way to improve the construction and technical characteristics of binders and materials based on calcium sulfate is their modification through the use of mineral additives. Of particular interest among structure modifiers are the so-called mechanocomposites, which are formed as a result of intensive mechanical processing of a mixture of mineral components. Mechanocomposites are metastable structures with a high density of interfacial boundaries between the initial components, which provides a very high concentration of defects on surfaces and in near-surface layers. When crushing a mixture of anhydrite and aluminous slag in a centrifugal impact mill, a mechanocomposite was obtained, which is a $\text{CaSO}_4\text{-CaO-Al}_2\text{O}_3$ system and consists of calcium aluminates and sulfoaluminates. This mechanocomposite is used to activate the process of hardening of the anhydrite binder due to the formation of calcium and aluminum hydroxides and calcium hydroaluminates during its hydration. In a binder system with a mechanocomposite, crystallization of gypsum dihydrate occurs by the mechanism of oriented coalescence of particles with the formation of dendrites, which are characterized by a clear mutual crystallographic orientation of the branches. This contributes to the growth of the strength of anhydrite stone.

Keywords: anhydrite, aluminous slag, mechanochemical activation, mechanocomposite.

For citation: Garkavi M.S., Artamonov A.V., Kolodezhnaya E.V., Dergunov S.A., Serikov S.V. Mechanocomposites based on anhydrite: properties and applications. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2022. No. 8, pp. 41–45. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-805-8-41-45>

Расширение использования современных композиционных материалов и сухих строительных смесей на основе сульфатов кальция требует обеспечения их высоких эксплуатационных показателей. Наиболее востребованный способ повышения строительно-технических характеристик вяжущих и материалов

на основе сульфата кальция — их модификация минеральными добавками [1–3].

Относительно новыми минеральными добавками, выполняющими роль модификаторов структуры композиционного материала, являются ультрадисперсные добавки, способные существенно улуч-

шить физико-технические свойства [4]. Особый интерес среди модификаторов структуры представляют так называемые механокомпози́ты, которые образуются в результате интенсивной механической обработки смеси минеральных компонентов [5–8].

Понятие механокомпози́тов связано со спецификой их формирования в результате механической активации в энергонапряженных измельчителях смеси не взаимодействующих компонентов с образованием большой контактной поверхности между ними. Вследствие различной размолоспособности компонентов происходит образование слоистых структур и межфазной поверхности путем «намазывания» одного из компонентов на другой в местах их физического контакта. Согласно [5, 9] механокомпози́ты представляют собой метастабильные структуры с высокой плотностью межфазных границ между исходными компонентами, что обеспечивает очень большую концентрацию дефектов на поверхностях и в приповерхностных слоях.

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

Рассмотрим образование механокомпози́тов и их влияние на свойства композиционных вяжущих на примере ангидритового цемента. Это обусловлено тем, что использование ангидрита является перспективным направлением в строительстве, так как он может быть альтернативным местным материалом цементу или гипсу [10–12].

Материалы и методы исследований

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

Для получения механокомпози́та на основе ангидрита применялся глиноземистый шлак Чусовского металлургического завода, химический состав которого представлен в табл. 2.

По своему фазовому составу рассматриваемый шлак аналогичен глиноземистому цементу, в составе которого преобладают моно- и диалюминат кальция: $CaO \cdot Al_2O_3$ (CA) и $CaO \cdot 2Al_2O_3$ (CA₂). При гидратации шлак обеспечивает ионный состав и кислот-

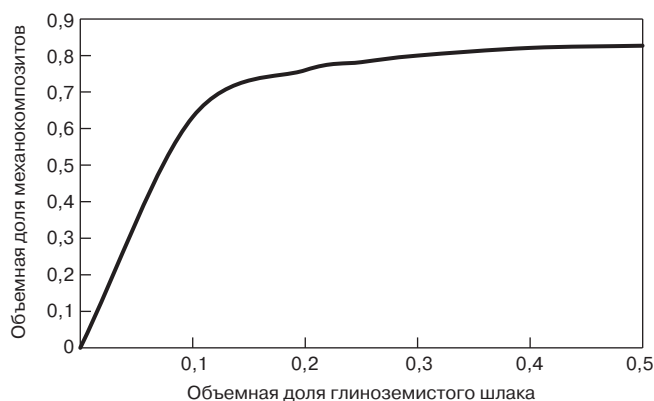


Рис. 1. Влияние состава ангидритшлаковой смеси на количество механокомпози́тов

Fig. 1. Influence of the composition of anhydrite slag on the number of mechanocomposites

ность жидкой фазы, необходимые для активации твердения ангидрита [10, 13, 14].

Для получения механокомпози́тов смесь ангидрита и глиноземистого шлака в заданном соотношении измельчалась в центробежно-ударной мельнице КИ-0,36, в которой совмещены две высокоэффективные системы: центробежно-ударного измельчения и воздушной классификации [15]. Отличительной особенностью центробежно-ударной мельницы является ее высокая энергонапряженность (более 10 кВт/кг). Это позволяет проводить в ней процесс механохимической активации, при которой в измельчаемой смеси создаются необходимые условия для образования механокомпози́тов [5, 16, 17].

Исходя из результатов математического моделирования процесса образования механокомпози́тов [18, 19] установлено оптимальное объемное соотношение между ангидритом и глиноземистым шлаком в смеси. Оптимальное содержание глиноземистого шлака в смеси составляет 25–30% (рис. 1), превышение которого не приводит к росту объема механокомпози́тов.

На рис. 2 приведено изменение объемных долей компонентов ангидритшлаковой смеси в течение процесса измельчения, которое происходит монотонно со скоростью, определяемой их размолоспособностью.

Как следует из представленных данных, при длительности измельчения в центробежно-ударной мельнице свыше 3 мин, что соответствует продолжительности реального процесса помола компонентов ангидритшлаковой смеси, они теряют свою индивидуальность, т. е. продукт помола практически состоит из механокомпози́тов. Зерновой состав полу-

Таблица 1
Table 1

Минеральный состав ангидрита
Mineral composition of anhydrite

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

Таблица 2
Table 2

Химический состав глиноземистого шлака
Chemical composition of aluminous slag

Массовая доля компонентов, %						
CaO	SiO ₂	MgO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	Na ₂ O+K ₂ O	SO ₃
23,5	2,7	0,7	0,6	70,2	0,89	0,3

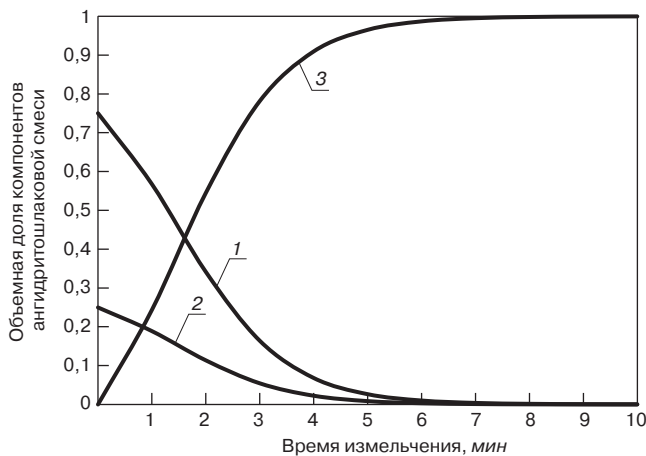


Рис. 2. Кинетика изменения объемных долей компонентов ангидритово-шлаковой смеси при измельчении: 1 – ангидрит; 2 – глиноземистый шлак; 3 – механокомпозит

Fig. 2. Kinetics of changes in the volume fractions of the anhydrite-slag mixture components during grinding: 1 – anhydrite; 2 – aluminous slag; 3 – mechanocomposite

ченного механокомпозита характеризуется размерами частиц $d_{50}=3,63$ мкм и $d_{90}=7,76$ мкм, что находится в хорошем соответствии с моделью [19].

Полученный в результате механохимического синтеза механокомпозит по химическому составу соответствует системе $\text{CaSO}_4\text{--CaO--Al}_2\text{O}_3$, а по фазовому составу – сульфоалюминатному клинкеру, т. е. представлен главным образом алюминатами кальция и сульфоалюминатом кальция [20]. Этот механокомпозит является прекурсором, который, будучи использован как активатор твердения ангидритового вяжущего, определяет не только кинетику процесса, но и свойства затвердевшего камня. Это обусловлено отмеченными выше особенностями структуры механокомпозита и его фазовым составом.

При затворении ангидритового вяжущего в комплексе с разработанным активатором в первую очередь развивается реакция гидратации механокомпозита, что связано с его высокоразвитой поверхностью с большим количеством структурных дефектов. В результате взаимодействия с водой входящих в его состав алюминатов кальция образуются гидроксиды кальция, алюминия и гидроалюминаты кальция [20]. Известно, что гидроксиды кальция и алюминия являются эффективными активаторами твердения ангидритового вяжущего [13, 14], следовательно, в вяжущей системе начнется и гидратация ангидрита с образованием двуводного гипса. Кроме того, будет иметь место и взаимодействие ангидритового компонента механокомпозита с гидроалюминатом каль-

Список литературы

1. 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.
2. Гордина А.Ф., Полянских И.С., Токарев Ю.В., Бурьянов А.Ф., Сеньков С.А. Водостойкие гипсовые материалы, модифицированные цементом,

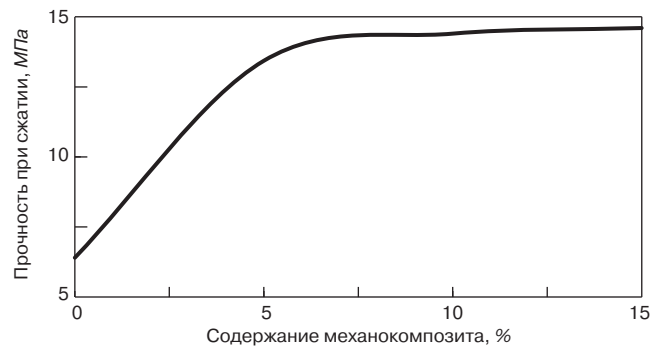


Рис. 3. Влияние дозировки механокомпозита на прочность искусственного ангидритового камня в возрасте 28 сут

Fig. 3. Influence of the dosage of the mechanocomposite on the strength of an artificial anhydrite stone at the age of 28 days

ция с образованием гидросульфоалюминатов кальция различного состава, которые выполняют роль центров кристаллизации двуводного гипса и армируют структуру формирующегося камня. Следует отметить, что данные новообразования в силу своей низкой растворимости способствуют повышению водостойкости и морозостойкости ангидритового камня [21].

Вследствие присутствия в составе механокомпозита сульфата кальция в твердеющей системе создается высокое пересыщение, что предопределяет кристаллизацию двуводного гипса по механизму ориентированного сращивания частиц и образование дендритов, которые характеризуются четкой взаимной кристаллографической ориентацией ветвей [22]. Этот вывод согласуется с экспериментальными данными работы [13].

Прочность формирующегося ангидритового камня зависит от дозировки механокомпозита (рис. 3). Из полученных данных можно заключить, что увеличение доли механокомпозита в составе вяжущей системы сверх 5% не приводит к существенному росту прочности в возрасте 28 сут, которая превышает прочность исходного вяжущего в два раза.

Заключение

Выполненные исследования показали эффективность изготовления и использования механокомпозитов для активации твердения ангидрита. Аналогичный подход может быть развит и применительно к гипсовым системам, в которых целесообразно использовать механокомпозиты, состоящие из двуводного гипса и минеральной компоненты, обладающего кристаллохимическим подобием с сульфатом кальция.

References

1. Rakhimov R.Z., Khaliullin M.I., Gaifullin A.R. Composite gypsum binders using expanded clay dust and blast-furnace slags. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2012. No. 7, pp. 13–16. (In Russian).
2. Gordina A.F., Polyanskikh I.S., Tokarev Yu.V., Buryanov A.F., Senkov S.A. Water-resistant gypsum materials modified with cement, microsilica and na-

- микрокремнеземом и наноструктурами // *Строительные материалы*. 2014. № 6. С. 35–37.
3. Петропавловская В.Б., Белов В.В., Новиченкова Т.Б. Малоэнергоемкие гипсовые строительные композиты: Монография. Тверь: ТвГТУ, 2014. 136 с.
 4. Яковлев Г.И., Плеханова Т.А., Макарова И.С., Маева И.С., Бурьянов А.Ф., Фишер Х.Б. Поризованные ангидритовые композиции, модифицированные углеродными наноструктурами // *Технологии бетонов*. 2007. № 6. С. 20–22.
 5. Анчаров А.И. и др. Механокомпозиты – прекурсоры для создания материалов с новыми свойствами. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2010. 424 с.
 6. Смоляков В.К., Лапшин О.В. Макроскопическая кинетика механохимического синтеза: Монография. Томск: Изд-во Института оптики атмосферы СО РАН, 2011. 192 с.
 7. Лапшин О.В., Смоляков В.К. Динамика структурных превращений при измельчении бинарной смеси // *Физическая мезомеханика*. 2011. Т. 14. № 2. С. 77–84.
 8. Лапшин О.В., Смоляков В.К. Формирование слоистой структуры механокомпозитов при измельчении бинарной смеси // *Химическая физика и мезоскопия*. 2013. Т. 15. № 2. С. 278–284.
 9. Уваров Н.Ф., Болдырев В.В. Размерные эффекты в химии гетерогенных систем // *Успехи химии*. 2001. Т. 70. № 4. С. 307–329.
 10. 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>
 11. Клименко В.Г., Погорелова А.С. Многофазные гипсовые системы для сухих смесей на основе природного гипса // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2005. № 9. С. 108–111.
 12. Дребезгова М.Ю., Чернышова 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.
 13. Токарев Ю.В., Яковлев Г.И. Модифицирование ангидритовых композиций алюмосодержащими ультрадисперсными добавками // *Известия КазГАСУ*. 2009. № 1 (11). С. 302–308.
 14. Будников П.П., Зорин С.П. Ангидритовый цемент. М.: Промстройиздат, 1954. 90 с.
 15. Гаркави М.С., Воробьев В.В., Кушка В.Н., Свитов В.С. Современное оборудование для измельчения и классификации материалов // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2003. № 6. С. 280–284.
 16. Хрипачева И.С., Гаркави М.С., Артамонова А.В., Воронин К.М., Артамонова А.В. Цементы центробежно-ударного измельчения // *Цемент и его применение*. 2013. № 4. С. 106–109.
 17. Хрипачева И.С., Гаркави М.С. Смешанные цементы центробежно-ударного измельчения на ос-
 - nostructures. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2014. No. 6, pp. 35–37. (In Russian).
 3. Petropavlovskaya V.B., Belov V.V., Novichenkova T.B. Maloenergoemkie gipsovye stroitel'nye kompozity: Monografiya [Low-energy gypsum building composites: Monograph]. Tver: TVGTU. 2014. 136 p.
 4. Yakovlev G.I., Plekhanova T.A., Makarova I.S., Maeva I.S., Buryanov A.F., Fisher H.B. Porous anhydrite compositions modified with carbon nanostructures. *Tekhnologii betonov*. 2007. No. 6, pp. 20–22. (In Russian).
 5. Ancharov A.I. et al. Mechanocomposites as precursors for creating materials with new properties. Novosibirsk: Publishing house of SO RAN, 2010. 424 p.
 6. Smolyakov V.K., Lapshin O.V. Makroskopicheskaya kinetika mekhanokhimicheskogo sinteza: Monografiya [Macroscopic kinetics of mechanochemical synthesis: Monograph]. Tomsk: Publishing House of the Institute of Atmospheric Optics SB RAS, 2011. 192 p.
 7. Lapshin O.V., Smolyakov V.K. Dynamics of structural transformations during grinding of a binary mixture. *Physical mesomechanics*. 2011. Vol. 14. No. 2, pp. 77–84. (In Russian).
 8. Lapshin O.V., Smolyakov V.K. Formation of a layered structure of mechanocomposites during grinding of a binary mixture. *Khimicheskaya fizika i mezoskopiya*. 2013. Vol. 15. No. 2, pp. 278–284. (In Russian).
 9. Uvarov N.F., Boldyrev V.V. Size effects in the chemistry of heterogeneous systems. *Uspekhi khimii*. 2001. Vol. 70. No. 4, pp. 307–329. (In Russian).
 10. Buryanov A.F., Fisher H.-B., Gal'tseva N.A., Buldyzhova 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>
 11. Klimenko V.G., Pogorelova A.S. Multiphase gypsum systems for dry mixes based on natural gypsum. *Vestnik BSTU named after V.G. Shukhov*. 2005. No. 9, pp. 108–111. (In Russian).
 12. Drebezgova M.Yu., Chernyshova N.V., Shatalova S.V. Composite gypsum binder with multicomponent mineral additives of different genesis. *Vestnik BSTU named after V.G. Shukhov*. 2017. No. 10, pp. 27–34. (In Russian).
 13. Tokarev Yu.V., Yakovlev G.I. Modification of anhydrite compositions with aluminum-containing ultrafine additives. *Izvestiya KazGASU*. 2009. No. 1 (11), pp. 302–308. (In Russian).
 14. Budnikov P.P., Zorin S.P. Angidritovyi tsement [Anhydrite cement]. Moscow: Promstroyizdat, 1954. 90 p.
 15. Garkavi M.S., Vorobyov V.V., Kushka V.N., Svitov V.S. Modern equipment for grinding and classifying materials. *Vestnik BSTU named after V.G. Shukhov*. 2003. No. 6, pp. 280–284.
 16. Khripacheva I.S., Garkavi M.S., Artamonova A.V., Voronin K.M., Artamonova A.V. Cements of centrifugal-impact grinding. *Cement I ego primeneniye*. 2013. No. 4, pp. 106–109. (In Russian).

- нове доменного отвального шлака // *Строительные материалы*. 2010. № 8. С. 40–41.
18. Гаркави М.С., Дергунов С.А., Сериков С.В. Формирование структуры композиционного цемента в процессе измельчения // *Строительные материалы*. 2021. № 10. С. 65–68. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-796-10-65-68>
 19. Гаркави М.С., Артамонов А.В., Ставцева А.В., Колодежная Е.В., Дергунов С.А., Сериков С.В. Моделирование структурных преобразований при измельчении композиционного цемента // *Строительные материалы*. 2021. № 11. С. 41–46. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-797-11-41-46>
 20. Кузнецова Т.В., Сычев М.М., Осокин А.П. и др. Специальные цементы: Учебное пособие для вузов. СПб.: Стройиздат, 1997. 314 с.
 21. Гаркави М.С., Артамонов А.В., Колодежная Е.В., Бурьянов А.Ф. Композиционное ангидритшлаковое вяжущее центробежно-ударного измельчения // *Строительные материалы*. 2014. № 7. С. 16–18.
 22. Иванов В.К., Федоров П.П., Баранчиков А.Е., Осико В.В. Ориентированное сращивание частиц: 100 лет исследований неклассического механизма роста кристаллов // *Успехи химии*. 2014. Т. 83. № 12. С. 1204–1222.
 17. Khripacheva I.S., Garkavi M.S. Mixed cements of centrifugal-impact grinding based on blast-furnace waste slag. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2010. No. 8, pp. 40–41. (In Russian).
 18. Garkavi M.S., Dergunov S.A., Serikov S.V. Formation of the structure of composite cement in the grinding process. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2021. No. 10, pp. 65–68. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-796-10-65-68>
 19. Garkavi M.S., Artamonov A.V., Stavtseva A.V., Kolodezhnaya E.V., Dergunov S.A., Serikov S.V. Modeling of structural transformations when grinding composite cement. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2021. No. 11, pp. 41–46. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-797-11-41-46>
 20. Kuznetsova T.V., Sychev M.M., Osokin A.P. and others. Special cements: Textbook for universities. St. Petersburg: Stroyizdat, 1997. 314 p.
 21. Garkavi M.S., Artamonov A.V., Kolodezhnaya E.V., Buryanov A.F. Composite anhydrite-slag binder for centrifugal impact grinding. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2014. No. 7, pp. 16–18.
 22. Ivanov V.K., Fedorov P.P., Baranchikov A.E., Osiko V.V. Oriented splicing of particles: 100 years of research on the non-classical mechanism of crystal growth. *Uspekhi khimii*. 2014. Vol. 83. No. 12, pp. 1204–1222.

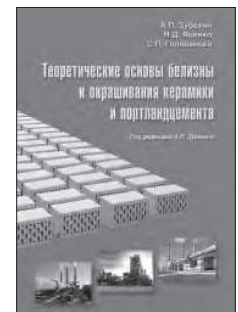
СПЕЦИАЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

Книга «Теоретические основы белизны и окрашивания керамики и портландцемента»

Авторы – Зубехин А.П., Яценко Н.Д., Голованова С.П.

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

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

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

Автор – Федулов А.А.

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

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



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

И.В. БЕССОНОВ¹, канд. техн. наук (bessonoviv@mail.ru);
А.Д. ЖУКОВ^{2,1}, канд. техн. наук (lj211@yandex.ru),
Э.А. ГОРБУНОВА^{1,2}, инженер, магистр (eg15082000@mail.ru),
И.С. ГОВРЯКОВ^{1,2}, инженер, магистр (govr190@mail.ru)

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

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

Текстильно-армированный модифицированный гипсобетон

Цель работы заключалась в исследовании свойств текстильно-армированного модифицированного гипсобетона (текстиль-гипсобетона) и разработке состава материала для изготовления декоративных фасадных плит и различных малых архитектурных форм с увеличенной стойкостью к атмосферным воздействиям и прочностью при изгибе. Использование армирующего материала (текстильной сетки из углеродного, базальтового или полиэфирного волокна) позволяет создавать изделия малой толщины. Улучшенные показатели водостойкости получают за счет применения добавок, модифицирующих гипс. Система из водостойкого гипсового вяжущего и армирующего слоя текстильного полотна позволяет получать изделия сложных архитектурных форм с возможностью использования в условиях атмосферных воздействий. Полученные результаты можно использовать при проектировании состава материала в областях применения, где необходима архитектурная выразительность, высокая прочность при изгибе и водостойкость. Композит может использоваться для изготовления сложных форм декоративных фасадных панелей, малых архитектурных форм, таких как парковая мебель, скульптуры и т. д.

Ключевые слова: текстиль-гипсобетон, модифицированный гипс, текстильное полотно, водостойкость, фасадные элементы, малые архитектурные формы.

Для цитирования: Бессонов И.В., Жуков А.Д., Горбунова Э.А., Говряков И.С. Текстильно-армированный модифицированный гипсобетон // *Строительные материалы*. 2022. № 8. С. 46–50. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-805-8-46-50>

I.V. BESSONOV¹, Candidate of Sciences (Engineering) (bessonoviv@mail.ru);

A.D. ZHUKOV^{2,1}, Candidate of Sciences (Engineering) (lj211@yandex.ru),

E.A. GORBUNOVA^{1,2}, Engineer, student (eg15082000@mail.ru),

I.S. GOVRYAKOV^{1,2}, Engineer, student (govr190@mail.ru)

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

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

Textile-Reinforced Modified Gypsum Concrete

The purpose of the work was to study the properties of textile-reinforced modified gypsum concrete (textile gypsum concrete) and develop a material composition for the manufacture of decorative facade slabs and various small architectural forms with increased weather resistance and bending strength. The use of a reinforcing material (textile canvas made of carbon, basalt, or polyester fibers) allows you to create products of small thickness. Improved water resistance is obtained using additives that modify gypsum. The system of waterproof gypsum binder and reinforcing layer of textile fabric makes it possible to obtain products of complex architectural forms with the possibility of using them under atmospheric conditions. The results obtained can be used in the design of the composition of the material, in applications where architectural expressiveness, high flexural strength and water resistance are needed. The composite can be used to make complex shapes of decorative facade panels, small architectural forms such as park furniture, sculptures, etc.

Keywords: textile gypsum concrete, modified gypsum binder, textile canvas, water resistance, facade elements, small architectural forms.

For citation: Bessonov I.V., Zhukov A.D., Gorbunova E.A., Govryakov I.S. Textile-reinforced modified gypsum concrete. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2022. No. 8, pp. 46–50. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-805-8-46-50>

Текстиль-гипсобетон — многофункциональный материал на основе модифицированного гипсового вяжущего и текстильного армирующего полотна. Использование в качестве армирующего материала холста из базальтового непрерывного волокна, углеродного волокна или полипропиленового волокна позволяет создавать изделия малой толщины в зависимости от поставленной задачи и роли композита в конструкции, что определяется предварительными расчетами на прочность и устойчивость конструкции.

Текстиль-гипсобетон можно отнести к разновидности материалов группы текстиль-бетон. Мате-

риалы этой группы имеют широкую область применения, включая изготовление декоративной фасадной плитки, различных тонких конструкций и изделий, подвесных мостов, сложных форм крыш и т. д. [1–4]. Так, в университете Ахена (Германия) была спроектирована конструкция крыши павильона для семинаров. Крыша изготовлена из текстиль-бетона и состоит из четырех тонких элементов текстиль-бетона, которые имеют двойную кривизну в виде гиперболических параболоидов. Также в сотрудничестве с университетом Ахена в 2010 г. в Альбштадте был построен пешеходный мост. Он

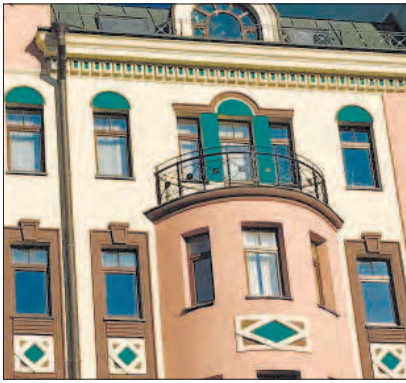


Рис. 1. Элементы гипсового декора на фасадах зданий

Fig. 1. Elements of gypsum decoration on the building facades



Рис. 2. Примеры изделий, выполненных из текстиль-гипсобетона

Fig. 2. Examples of products made of textile-gypsum concrete

имеет длину около 100 м и является самым длинным мостом из текстиль-бетона в мире. В том же месте бетонный мост пришлось снести из-за проблем с коррозией всего через 30 лет; требовалось, чтобы новый мост гарантировал срок службы 80 лет. Еще одним требованием было то, что мост должен быть тонким. Исходя из этих требований была принята конструкция моста из текстиль-бетона, который был построен за один год.

Еще один пример использования текстиль-бетона можно увидеть на фасаде новой пристройки Института конструкционного бетона Рейнско-Вестфальского технического университета Ахена. Элементы из текстиль-бетона работают как облицовка. Благодаря тонкой конструкции в 25 мм вес и стоимость были значительно снижены в сравнении с их бетонными аналогами.

Текстильный армированный бетон является относительно новым материалом на рынке и имеет много преимуществ. Конструкции могут быть более тонкими, когда нет необходимости в дополнительном защитном слое бетона, следовательно, расход вяжущего может быть уменьшен, а вместе с этим стоимость и вес конструкции. Благодаря меньшему количеству материалов и особенно цемента, при производстве которого выделяется большое количество углекислого газа, воздействие на окружающую среду при применении текстильного бетона существенно ниже по сравнению со стальным армированным бетоном.

Считается, что текстильный армированный бетон откроет новую область применения устойчивой и инновационной инженерии и архитектуры с использованием бетона [5–8]. К основным преимуществам текстильно-армированного бетона относят возможность создания сложных форм за счет изгибаемости

материала, легкость при монтаже, долговечность конструкции [9–13]. Использование текстиль-бетона позволяет повысить эксплуатационные и технические характеристики конструкций благодаря следующим свойствам материала:

- высокой прочности на растяжение и изгиб (в 4–5 раз выше, чем у аналогов);
- высокой ударпрочности (в 10–15 раз выше, чем у традиционного бетона);
- морозостойкости (более 300 циклов);
- водонепроницаемости (W20);
- устойчивости к образованию трещин и коррозии;
- огнестойкости.

В данной работе в качестве связующего было выбрано гипсовое вяжущее. Это было обосновано способностью материала создавать сложную декоративную поверхность готовых изделий, а также с целью уменьшения углеродного следа от процесса производства и более высокого уровня экологической безопасности по сравнению с цементом. Известно применение модифицированного гипса при изготовлении декоративных фасадных элементов (рис. 1). В ноябре 2022 г. вводится в действие национальный стандарт ГОСТ Р 70034–2022 «Изделия гипсовые декоративные для фасадов зданий. Технические условия», разработанный с участием авторов данной статьи [17]. Исследование материала текстиль-гипсобетона указывает на возможности вариаций формы и дизайна для изготовления малых архитектурных форм (рис. 2).

Методы и материалы

Проведены эксперименты по подбору состава текстиль-гипсобетона с учетом необходимости получения заданных характеристик. Материал должен

**Таблица 1
Table 1**

**Сырьевые компоненты для изготовления изделий из текстиль-гипсобетона
Raw materials for the manufacture of products from textile gypsum concrete**

Сырьевые компоненты	Количество
Гипс Г10	55–65%
Смола меламиноформальдегидная	8–12%
Полиуретановый компонент	1–1,3%
Кислотный отвердитель	0,12–0,2%
Вода	12–28%
Текстильное полотно	Плотность 100 г/м ²

обладать небольшой толщиной, высокой прочностью при изгибе, эффективностью использования в условиях атмосферных воздействий, а также обладать высокой декоративностью и архитектурной выразительностью. В качестве вяжущего, которое соответствует заданным критериям, выбрано гипсовое вяжущее, модифицированное полимерными смолами с добавлением полиуретанового компонента.

Для получения образцов из модифицированного гипсового вяжущего в отдозированное количество воды добавляли меламиноформальдегидную смолу в количестве 30% от массы воды и полиуретановый компонент в количестве 10% от массы смолы. Затем добавляли гипсовое вяжущее. Для иницирования ускоренного твердения меламиноформальдегидной смолы в присутствии полиуретанового компонента в состав смеси добавляли кислотный отвердитель.

В эксперименте использовалось два варианта процесса заливки свежеприготовленного гипсового раствора и укладки армирующего полотна: заливочный и пропиточный.

Заливочный способ укладки гипсового теста заключался в заливке нижнего тонкого слоя свежеприготовленной массы гипсового раствора с последующей укладкой полотна и заливкой еще одно слоя теста. Процедура повторяется два-три раза в зависимости от необходимого количества слоев армирования.

Пропиточный способ укладки заключается в обмакивании слоя текстиля в свежеприготовленный подвижный гипсовый раствор и укладке с последующим уплотнением. Количество слоев три–пять.

В табл. 1 приведены сырьевые компоненты и их мас. %, использованные для изготовления изделий из текстиль-гипсобетона.

Результаты

Для осуществления эксперимента проводили сравнение нескольких составов с разным набором сырьевых компонентов. Провели испытания на определение прочности изделий выбранных гипсовых составов. Также для определения потери прочности при увлажнении вычисляли коэффициент размягчения K_p . Полученные результаты, соответствующие каждому варианту составов, приведены в табл. 2.

Анализируя экспериментальные данные, можно сделать сравнительные выводы о составах. Результаты показали, что составы № 2 и 4 имеют приближенные показания коэффициента размягчения. При этом состав № 2 имеет более высокие значения прочности при сжатии и наилучшие значения прочности при изгибе, обладая более низкой плотностью по сравнению с составами № 1, 2. Такой эффект объясняется совместной работой матрицы из текстильного полотна, которое увеличивает прочность при изгибе и снижает плотность, и модифицированного гипсового вяжущего, которое способствует получению высоких показателей прочности при сжатии и коэффициента размягчения.

Обсуждение

Большое значение при изготовлении текстиль-гипсобетона имеет количество воды, химически несвязанной в процессе гидратации. Начальная влажность зависит от водогипсового отношения и содержания примесей в гипсе. Известно уравнение реакции гидратации полугидрата сульфата кальция:



**Таблица 2
Table 2**

**Характеристики композиционных гипсовых составов, использованных для проведения эксперимента
Characteristics of the composite gypsum compositions used for the experiment**

№	Состав	Плотность, кг/м ³	Прочность при изгибе, МПа	Прочность при сжатии, МПа	Коэффициент размягчения, K_p
1	Г+В	1425	4,8–5,1	14–16	0,37
2	Г+МФС+В	1640	5,9–6,2	14–16	0,68
3	Г+МФС+ПК+КО+В	1250	4–4,3	7–9	0,35
4	Г+МФС+ПК+КО+В+ТП	1330	7,1–7,4	19–21	0,79

Примечания: * Г – гипсовое вяжущее; В – вода; МФС – меламиноформальдегидная смола; ПК – полиуретановый компонент; КО – кислотный отвердитель; ТП – текстильное полотно.

Исходя из стехиометрического соотношения атомных весов элементов, вступающих в реакцию, следует, что масса воды, необходимой для полного превращения полугидрата сульфата кальция в дигидрат, должна составлять 18,6% от массы полугидрата. Т. е. минимально необходимое водогипсовое отношение, при котором гипсовое вяжущее полностью гидратирует, составляет $V/G=0,186$.

Дополнительное количество воды используется для увеличения подвижности смеси. Излишняя вода повышает пористость и проницаемость гипсового изделия. Снижение количества воды затворения позволяет увеличить плотность материала, повышая его водостойкость. Меламиноформальдегидная смола, пластифицируя гипсовую смесь, позволяет получать литую консистенцию свежеприготовленной массы с водогипсовым отношением около $V/G=0,2$.

В процессе структурообразования возникает каркас из кристаллических сростков дигидрата кальция. Одновременно смола, заполняющая свободное пространство в кристаллической решетке, образует собственную структуру, набирая прочность за счет пространственной сшивки макромолекул. Отвержденная смола экранирует кристаллические сростки гипса, защищая их тем самым от прямых контактов с влагой [14–16].

Полимер образует вокруг кристаллических гипсовых сростков защитный слой, препятствующий до-

ступу молекул воды к обладающим повышенной растворимостью кристалликам дигидрата сульфата кальция.

Полиуретановый компонент при структурообразовании химически связывает свободную воду при твердении композиционной системы, в том числе выделяющуюся при конденсации меламиноформальдегидной смолы.

Таким образом, введение полимерных смол позволяет повышать водостойкость, прочность и плотность гипсовых изделий. При этом армирование текстильным полотном позволяет повышать прочность при изгибе и общую долговечность изделия из модифицированного гипсового вяжущего.

Заключение

Текстильно-армированный модифицированный гипсобетон является композиционным материалом, имеющим широкую область применения. Полученные результаты можно использовать при проектировании конструкций из материала для условий, где необходима не только высокая прочность при изгибе и водостойкости, но и архитектурная выразительность. Текстиль-армированный гипсобетон может использоваться для изготовления сложных форм декоративных фасадных панелей, малых архитектурных форм, таких как парковая мебель, скульптуры и т. д.

Список литературы

1. Lesovik V.S., Glagolev E.S., Popov D.Y., Lesovik G.A., Ageeva M.S. Textile-reinforced concrete using composite binder based on new types of mineral raw materials. *IOP conference series: Materials science and Engineering*. 2018. Vol. 327. 032033 DOI: 10.1088/1757-899X/327/3/032033
2. Лесовик В.С., Попов Д.Ю., Глаголев Е.С. Текстиль-бетон – эффективный армированный композит будущего // *Строительные материалы*. 2017. № 3. С. 81–84.
3. Попов Д.Ю. Состояние и перспективы применения текстиль-бетона // *Промышленное и гражданское строительство*. 2018. № 3. С. 51–57.
4. Волкова А.А., Пайков А.В., Семенов С.Г., Мельников Б.Е. Структура и свойства текстильно-армированного бетона // *Инженерно-строительный журнал*. 2015. № 7. С. 50–55.
5. Лесовик В.С., Попов Д.Ю. Повышение эффективности текстиль-бетона // *Региональная архитектура и строительство*. 2017. № 4. С. 10–16.
6. Поудел Р.С., Бессонов И.В., Жуков А.Д., Гудков П.К., Горбунова Э.А., Михайлик Е.Д. Цифровые методы оптимизации составов бетонного полотна // *Строительные материалы*. 2022. № 6. С. 20–24. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-803-6-20-24>

References

1. Lesovik V.S., Glagolev E.S., Popov D.Y., Lesovik G.A., Ageeva M.S. Textile-reinforced concrete using composite binder based on new types of mineral raw materials. *IOP conference series: Materials science and Engineering*. 2018. Vol. 327. 032033 DOI: 10.1088/1757-899X/327/3/032033
2. Lesovik V.S., Popov D.Yu., Glagolev E.S. Textile-concrete – effective reinforced composite of the future. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2017. No. 3, pp. 81–84. (In Russian).
3. Popov D.Yu. Status and prospects for the use of textile concrete. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2018. No. 3, pp. 51–57. (In Russian).
4. Volkova A.A., Pajkov A.V., Semenov S.G., Mel'nikov B.E. Structure and properties of textile-reinforced concrete. *Inzhenerno-stroitel'niy zhurnal*. 2015. No. 7, pp. 50–55. (In Russian).
5. Lesovik V. S., Popov D. Yu. Improving the efficiency of textile concrete. *Regional'naya arhitektura i stroitel'stvo*. 2017. No. 4, pp. 10–16. (In Russian).
6. Poudel R.S., Bessonov I.V., Zhukov A.D., Gudkov P.K., Gorbunova E.A., Mihaylik E.D. Digital methods for optimizing textile concrete technology. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2022. No. 6, pp. 20–24. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-803-6-20-24>

7. Pyataev E.R., Medvedev A.A., Poserenin A.I., Burtseva M.A., Mednikova E.A. and Mukhametzaynov V.M. Theoretical principles of creation of cellular concrete with the use of secondary raw materials and dispersed reinforcement. 2018. *MATEC Web Conference. VI International Scientific Conference "Integration, Partnership and Innovation in Construction Science and Education" (IPICSE-2018)*. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/20182510101211>
8. Scherer, S., Michler, H., Curbach, M. *Brücken aus Textilbeton. Handbuch Brücken: Entwerfen, Konstruieren, Berechnen, Bauen und Erhalten* (2014), pp. 118–129.
9. Hegger J., Goralksi C., Kulas C. Schlanke fußgängerbrücke aus textilbeton. Sechsfeldrige Fußgängerbrücke mit einer Gesamtlänge von 97 m. *Beton- und Stahlbetonbau*. 2011. Vol. 106. Iss. 2, pp. 64–71.
10. Efimov B., Isachenko S., Kodzoev M.-B., Dosanova G., Bobrova E. Dispersed reinforcement in concrete technology. *E3S Web of Conferences*. 2019. Vol. 110. 01032. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201911001032>
11. Schladitz F., Lorenz E., Jesse F., Curbach M. Verstärkung einer denkmalgeschätzten Tonnenschale mit Textilbeton. *Beton- und Stahlbetonbau*. 2009. Vol. 104. Iss. 7, pp. 432–437.
12. Mana Halvaei, Masoud Jamshidi, Masoud Latifi, Mojtab Ejtemaei. Experimental investigation and modelling of flexural properties of carbon textile reinforced concrete. *Construction and Building Materials*. 2020. Vol. 262, pp. 15–25. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120877>
13. Hadi Bolooki Poorsaheli, Amir Behravan, Seyed TahaTabatabaei Aghda Durability performance of hybrid reinforced concretes (steel fiber + polyolefin fiber) in a harsh marine tidal zone of Persian Gulf. *Construction and Building Materials*. 2021. Vol. 266, pp. 15–25. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121176>
14. 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.
15. Бессонов И.В. Гипс повышенной водостойкости. *Сборник докладов III науч.-практ. конф. «Проблемы строительной теплофизики и энергосбережения в зданиях»*. М.: НИИСФ, 1998. С. 112–117.
16. 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>
17. ГОСТ Р 70034–022 Изделия гипсовые декоративные для фасадов зданий. Технические условия. М.: Росстандарт, 2022. 18 с.
7. Pyataev E.R., Medvedev A.A., Poserenin A.I., Burtseva M.A., Mednikova E.A. and Mukhametzaynov V.M. Theoretical principles of creation of cellular concrete with the use of secondary raw materials and dispersed reinforcement. 2018. *MATEC Web Conference. VI International Scientific Conference "Integration, Partnership and Innovation in Construction Science and Education" (IPICSE-2018)*. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/20182510101211>
8. Scherer, S., Michler, H., Curbach, M. *Brücken aus Textilbeton. Handbuch Brücken: Entwerfen, Konstruieren, Berechnen, Bauen und Erhalten* (2014), pp. 118–129.
9. Hegger J., Goralksi C., Kulas C. Schlanke fußgängerbrücke aus textilbeton. Sechsfeldrige Fußgängerbrücke mit einer Gesamtlänge von 97 m. *Beton- und Stahlbetonbau*. 2011. Vol. 106. Iss. 2, pp. 64–71.
10. Efimov B., Isachenko S., Kodzoev M.-B., Dosanova G., Bobrova E. Dispersed reinforcement in concrete technology. *E3S Web of Conferences*. 2019. Vol. 110. 01032. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201911001032>
11. Schladitz F., Lorenz E., Jesse F., Curbach M. Verstärkung einer denkmalgeschätzten Tonnenschale mit Textilbeton. *Beton- und Stahlbetonbau*. 2009. Vol. 104. Iss. 7, pp. 432–437.
12. Mana Halvaei, Masoud Jamshidi, Masoud Latifi, Mojtab Ejtemaei. Experimental investigation and modelling of flexural properties of carbon textile reinforced concrete. *Construction and Building Materials*. 2020. Vol. 262, pp. 15–25. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120877>
13. Hadi Bolooki Poorsaheli, Amir Behravan, Seyed TahaTabatabaei Aghda Durability performance of hybrid reinforced concretes (steel fiber + polyolefin fiber) in a harsh marine tidal zone of Persian Gulf. *Construction and Building Materials*. 2021. Vol. 266, pp. 15–25. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121176>
14. Stroikova V.V. Features of phase formation in composite nanostructure-ridged gypsum, astringent. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2012. No. 7, pp. 9–12. (In Russian).
15. Bessonov I.V. Gypsum of increased water resistance. *Collection of reports of the III scientific-practical conference "Problems of building thermal physics and energy saving in buildings"*. Moscow: NIISF. 1998, pp. 112–117. (In Russian).
16. 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>
17. GOST R 70034–2022 Gypsum decorative products for building facades. Specifications. Moscow: Rosstandart, 2022. 18 p.

УДК 666.913

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-805-8-51-58>

А.Ф. ГОРДИНА, канд. техн. наук (gism56@mail.ru), И.С. ПОЛЯНСКИХ, канд. техн. наук (irina_maeva@mail.ru), Н.С. ЖУКОВА, инженер (аспирант) (Nata.Ruzina@mail.ru), Г.И. ЯКОВЛЕВ, д-р техн. наук (gyakov@istu.ru)

Ижевский государственный технический университет им. М.Т. Калашникова (426000, г. Ижевск, ул. Студенческая, 7)

Исследование влияния пуццоланового компонента на структуру и состав модифицированных сульфатных матриц

Структура гипсовой матрицы, характеризующаяся размером, формой и морфологией кристаллов, состоянием межфазной поверхности, количеством и прочностью контактов между новообразованиями, определяет основные физико-технические свойства материала. В работе рассмотрено влияние минеральных добавок на основе различных модификаций диоксида кремния, вводимых совместно с портландцементом на структуру и свойства гипсового камня посредством использования сканирующей электронной микроскопии, энергодисперсионной рентгеновской и инфракрасной спектроскопии. В исследовании использовался строительный гипс марки Г5, в качестве минеральных модификаторов применялись: метакаолин, дегидратированная глина, алевролит, керамическая пыль, измельченная минеральная вата, диабаз. В работе установлено, что совместное введение модификаторов приводит к улучшению физико-механических свойств вяжущего, что, вероятно, обусловлено тем, что добавки способствуют формированию продуктов гидратации на основе гидросиликатов или гидроалюминатов кальция, заполняющих поровое пространство каркаса кристаллогидратов гипса. Тонкодисперсные добавки также выступают в качестве центров кристаллизации в процессе структурообразования матрицы. В работе реализовано сравнение структуры, спектральных данных функциональных групп и локального состава новообразований матриц композиционных материалов при оптимальном содержании минеральных модификаторов. Отмеченные изменения в ИК-спектрах и микроструктура гипсовой матрицы подтверждают выдвинутые предположения о влиянии силикатных компонентов на структуру и свойства строительного гипса.

Ключевые слова: строительный гипс, пуццолановые добавки, кристаллогидраты, аморфизированные продукты, портландцемент.

Для цитирования: Гордина А.Ф., Полянских И.С., Жукова Н.С., Яковлев Г.И. Исследование влияния пуццоланового компонента на структуру и состав модифицированных сульфатных матриц // *Строительные материалы*. 2022. № 8. С. 51–58.

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-805-8-51-58>

A.F. GORDINA, Candidate of Sciences (Engineering) (gism56@mail.ru), I.S. POLYANSKIKH, Candidate of Sciences (Engineering) (irina_maeva@mail.ru), N.S. ZHUKOVA, Engineer (postgraduate) (Nata.Ruzina@mail.ru), G.I. YAKOVLEV, Doctor of Sciences (Engineering) (gyakov@istu.ru) Kalashnikov Izhevsk State Technical University (7, Studencheskaya Street, Izhevsk, 426000, Russian Federation)

Pozzolanic Constituent Impact on Structure and Properties of Modified Sulfate-Based Composites

Size, shape, crystal morphology, interphase state, number and strength of an interaction among hydrated new growths are the main characteristics of gypsum structure and all of that forms physical-technical properties of the material. In this work the impact of mineral additives on structure and properties of gypsum based composites is taken into consideration by using scanning electron microscopy, energy-dispersive X-ray analysis, IR-spectroscopy. Used mineral additives include a mixture of Portland cement and a constituent which is based on different forms of silicium dioxide. As binder gypsum with grade G5 was used, as modifiers mineral additives such metakaolin, dehydrated clay, aleurite, ceramic dust, fined mineral wool, diabase were used. It was confirmed that a combined use of modifiers improves physical-mechanical properties of gypsum binder, this effect is likely to bring about by new growths formation such as hydrated silicates and calcium aluminate hydrates. These new growths are to fill porous and void spaces in hydrated structure of gypsum binder. Also, while the composite is hardening these mineral additives play role as crystal seeds. Structure, spectral data of functional groups and local composition of new growths have been compared for modified composites with effective amount of additives. Changes in IR spectrums and microstructure have proved a suggestion about pozzolanic constituent impact on structure and properties of modified sulfate-based composites.

Keywords: gypsum binder, pozzolanic based additives, hydrated new growths, amorphous new growths, Portland cement.

For citation: Gordina A.F., Polyanskikh I.S., Zhukova N.S., Yakovlev G.I. Pozzolanic constituent impact on structure and properties of modified sulfate-based composites. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2022. No. 8, pp. 51–58. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-805-8-51-58>

Структура гипсовой матрицы определяет физико-технические свойства изделий, при этом характеризуется размером, формой и объемным сложением кристаллов, состоянием межфазной поверхности, количеством и прочностью контактов между новообразованиями [1, 2]. Улучшение эксплуатационных и физико-механических характеристик, включая параметры водостойкости вяжущих на основе сульфата кальция, возможно путем направленной модификации структуры камня за счет введения минеральных

компонентов [3, 4]. Эффективность влияния модификаторов во многом будет определяться химическим составом и дисперсностью частиц [5].

Формирование морфологии матрицы переменного состава с аморфизированными продуктами обусловлено введением в состав материала щелочного компонента, как правило портландцемента, и пуццоланового компонента, в качестве которого может быть использован вулканический туф, керамзитовая пыль, метакаолин, трепел, различные техногенные

продукты на основе диоксида кремния [6, 7]. Введение комплексной добавки инициирует процесс образования аморфизированных продуктов — гидросиликатов, гидроалюминатов, гидроалюмоферритов кальция [8], которые связывают кристаллы дигидрата сульфата кальция в непрерывную плотную структуру с увеличенной площадью контактов срастания и межфазной поверхностью.

Диоксид кремния — один из самых распространенных компонентов строительных материалов, использование которого не ограничивается применением в качестве сырья, например при получении керамики; он может быть использован в качестве модифицирующей добавки для направленного управления структурой минеральной вяжущих. При этом стоит отметить полиморфизм соединения, в настоящее время известно более десяти полиморфных модификаций. Структурно можно выделить три типа состояния диоксида кремния [9]: кристаллическое (тригональный α - SiO_2 или кварц, полиморфные модификации β - SiO_2 в виде тримита и кристобалита), квазикристаллическое (низкотемпературный α -кристобалит, опал-кристобалит-тримимитовая фаза в виде опок или трепелов) и наноразмерное (аморфный $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ в виде силикагеля). В зависимости от структуры материал обладает различной химической активностью и способностью вступать во взаимодействие с минеральными вяжущими веществами [9]. Необходимо также отметить изоморфизм кремнекислородных соединений, к которым можно отнести алюмосиликатные соединения, структура которых более разнообразна и предопределяет значительное варьирование свойств [10].

В работе рассмотрено влияние различных полиморфных и изоморфных модификаций диоксида кремния, вводимых совместно с портландцементом, на структуру и свойства гипсового камня посредством использования сканирующей электронной микроскопии, энергодисперсионной рентгеновской и инфракрасной спектроскопии.

В качестве вяжущего использовался строительный гипс марки Г5 Б II производства компаний «BARKRAFT» или «Гипсополимер», произведенный в соответствии с ГОСТ 125–2018 «Вяжущие гипсовые. Технические условия».

С целью получения гипсового камня, отличающегося повышенными прочностными характеристиками и водостойкостью за счет уплотнения кристаллогидратов сульфата кальция аморфизированными продуктами на основе гидросиликатов и гидроалюминатов кальция, в состав был введен портландцемент (ПЦ) марки ЦЕМ II 42,5А (содержание 5%) или ЦЕМ I 32,5Н (содержание 1%) компании ООО ТД «Корунд» совместно с силикатными компонентами. Концентрация щелочного компонента выбрана с учетом содержания клинкерных минералов в составе гипсоцементной композиции.

В качестве силикатных структурирующих добавок были использованы следующие модификаторы:

1. Метакаолин (М) ВМК-45 компании «СИНЕРГО», г. Магнитогорск, соответствующий требованиям ТИ 1613.2010, состоящий из смеси аморфного глинозема и кремнезема практически в равных количествах: массовая доля Al_2O_3 составляет от 39 до 44%, SiO_2 — от 53 до 55%. Частицы метакаолина имеют пластинчатую форму, высокую удельную поверхность, средний размер 50 мкм.

2. Алеврит (А) — мелкообломочная осадочная горная порода, сложенная на 50% и более из сцементированных обломков минералов с размером зерен от 0,1 до 0,01 мм с включениями слюды. В составе превалирует оксид кремния, а также значительное количество вермикулита, каолинита и кальцита. Добавка подвергалась дроблению и истиранию, средний размер частиц составляет 34,5 мкм. Частицы добавки имеют переменное строение: пластинчатые кристаллы слюды связаны аморфизированными глинистыми компонентами — алюмосиликатами кальция [11].

3. Дегидратированная глина (ДГ) получена путем нагревания глины Шабердинского месторождения до 600–700°C. Дисперсионный анализ дегидратированной глины по объему показал, что размер 90% частиц не превышает 5 мкм, а средний размер частиц равен 2,3 мкм.

4. Керамическая пыль (КП) получена измельчением боя керамического кирпича. Анализ размерности частиц добавки, проведенный на лазерном анализаторе дисперсности, показал, что средний размер частиц составляет 27,3 мкм.

5. Минеральная вата (МВ) BASWOOL ФАСАД 90 изготовлена в соответствии с ГОСТ 25880–83 и ТУ 5762-001-80015406–2010, в составе превалирует SiO_2 и составляет более 80%. Для получения изделия были использованы горные породы габбро-базальтовой группы и их аналоги, осадочные породы, вулканические шлаки. Добавка подвергалась предварительному измельчению и просеиванию, после был проведен дисперсионный анализ частиц, который показал, что модификатор является тонкодисперсным: более 90% частиц имеют размер до 0,057 мкм, средний размер составляет 0,031 мкм.

6. Диабазовый порошок, или диабазовая мука (Д), является продуктом тонкого помола кислотостойкой горной породы — диабаз. Проведенный дисперсионный и химический анализ позволил установить, что средний размер частиц диабаз составляет 0,087 мкм, в составе превалирует диоксид кремния (76%).

Комплексное исследование физико-механических свойств, включая прочностные характеристики и параметры водостойкости, проведено в соответствии с ГОСТ 23789–79 или ГОСТ 23789–2018 «Вяжущие гипсовые. Методы испытаний». Для определения свойств изготавливались образцы-балочки размерами 160×40×40 мм, которые хранились при температуре $20 \pm 5^\circ\text{C}$ в течение 28 сут.

Физико-химические свойства композиционных материалов изучены методами инфракрасной спектроскопии и растровой электронной микроскопии.

Таблица 1
Table 1Физико-технические характеристики гипсовых композиций
Physical-mechanical properties of gypsum-based composites

Добавка	Средний размер частиц добавки, мкм	Содержание, %		В/Г отношение	Предел прочности в возрасте 28 сут, МПа		Водопоглощение, %	Коэффициент размягчения
		Добавка	ПЦ		Изгиб	Сжатие		
Контроль	–	–	–	0,56–0,65	5,5	12,0	29,7	0,36
М	50	0,4	5	0,56	6,1	15,1	27	0,49
А	35	1,25	5	0,65	6,2	14,5	28,8	0,42
ДГ	23	0,6	5	0,56	6,3	17,3	28	0,39
КП	27	0,5	5	0,65	5,5	13,6	29,3	0,43
МВ	0,031	0,4	1	0,55	7,9	20,4	28,6	0,53
Д	0,087	0,1	1	0,66	4,6	12,8	31,2	0,4

Таблица 2
Table 2Характеристические колебания основных групп составов
Changes in wave numbers of basic groups in mixtures

Групповой состав композиций	Волновые числа контрольного состава, см ⁻¹					
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>e</i>	<i>f</i>
Симметричные и асимметричные валентные колебания ОН-групп в молекулах воды	3200–3600					
Деформационные колебания H ₂ O	1685,79; 1622,13					
Карбонаты CO ₃ ²⁻	1400–1450; 877,51	1429,25; 875,68	1429,25; 873,75	1417,68; 873,75	–	1436,97; 877,61
Сульфаты SO ₄ ²⁻	1190,08; 1080,14; 1004,91; 671,23; 601,79	1168,86; 1099,86; 1004,91; 669,3; 601,79	1186,22; 1085,92; 671,22; 601,79	1161,15; 1101,35; 1004,91; 669,3; 601,79	1178,51; 1091,71; 1004,91; 671,23; 601,79	1153,4; 1103,28; 671,23; 601,79
Силикатные группы –O–Si–O–	–	1099,86	1085,92	1101,35	1091,71	1103,28
Оксиды металлов	400–500					

Таблица 3
Table 3Основные функциональные группы гипсовых композиций
Basic functional groups of gypsum-based compositions

Групповой состав композиций	Соотношение интенсивности к ширине пика					
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>e</i>	<i>f</i>
Симметричные и асимметричные валентные колебания ОН-групп в молекулах воды	1,2	1,1	1,4	0,8	1,5	1,2
Сульфаты SO ₄ ²⁻	1,4	1,5	1,1	1,5	1,8	1,2
Силикатные группы –O–Si–O–	–					

Исследования методом сканирующей электронной микроскопии и энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии выполнялись на сканирующих электронных микроскопах ThermoFisher Scientific Quattro S в центре коллективного пользования «Поверхность и новые материалы» при УдмФИЦУрО РАН, поддержанного Министерством науки и высшего образования РФ (проект № RFMEFI62119X0035), JSM 7500 F фирмы «JEOL» и ESEM XL-30. Для анализа элементного состава на поверхности новообразований применялся рентгеновский микроанализатор с мощностью электронного пучка 15–25 кВ. ИК-спектральный ана-

лиз проведен с помощью ИК-Фурье-спектрометра IRAffinity-1 производства Shimadzu в области частот 4000–400 см⁻¹.

На первом этапе работы были проведены комплексные исследования влияния минеральных модификаторов (портландцемента и силикатной добавки) на физико-технические свойства гипсового камня и разработаны составы, характеристики которых приведены в табл. 1.

Совместное введение в состав строительного гипса портландцемента и силикатного компонента позволяет создать условия для улучшения механических

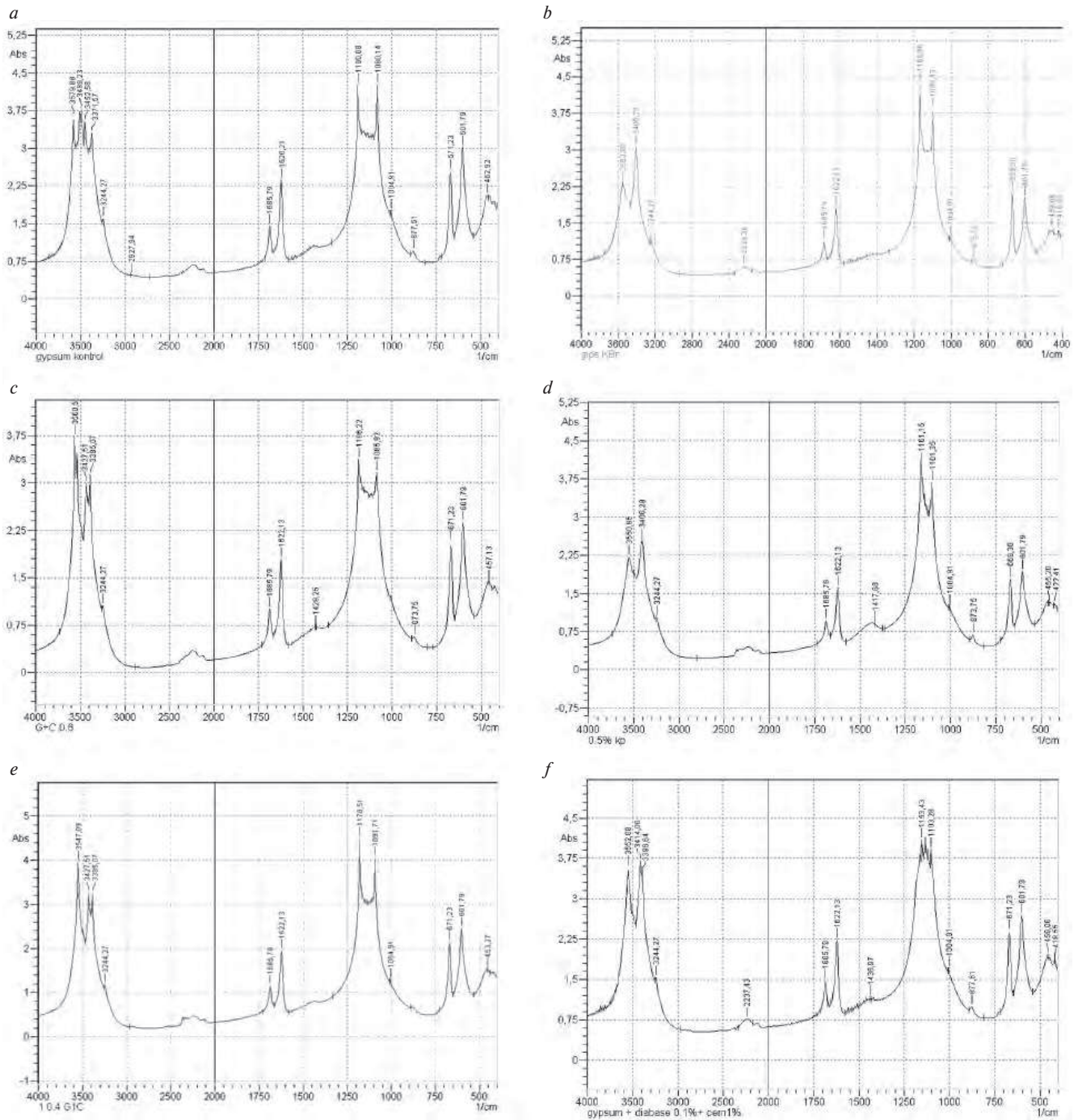


Рис. 1. ИК-спектры гипсовых композиций: без добавок (а); при введении 5% портландцемента (b); совместное добавление 5% портландцемента и минеральных добавок – дегидратированная глина 0,6% (c), керамическая пыль 0,5% (d); гипсоцементная композиция, включающая 1% портландцемента с добавлением 0,4 % минеральной ваты (e) или 0,1% диабазового порошка (f)

Fig. 1. IR-spectrums of gypsum-based composites: without any additives (a); with 5% of Portland cement (b); combination of 5% Portland cement with mineral additives – dehydrated clay 0,6% (c), ceramic dust 0,5% (d); gypsum cement composition with 1% of Portland cement and 0,4 % fined mineral wool (e) or 0,1% diabase in powder form (f)

характеристик. При этом можно отметить, что увеличение прочностных характеристик обусловлено не только дисперсностью модификатора, но также зависит от формы частиц и соотношения аморфизированных и кристаллических фаз в составе добавки [12, 13].

При совместном введении 0,4% метакаолина и 5% портландцемента наблюдается рост предела прочности при сжатии до 26%, снижение водопоглощения и увеличение коэффициента размягчения. Изменение

характеристик, вероятно, обусловлено формированием новообразований на основе гидроалюминатов кальция [14], однако пластинчатая форма частиц, объединенных в конгломераты, уменьшает удельную поверхность модификатора и соответственно снижает эффективность. Аналогичное влияние оказывает и алевролит, однако частицы добавки дополнительно цементированы в более прочные структуры, что приводит к росту оптимальной концентрации.

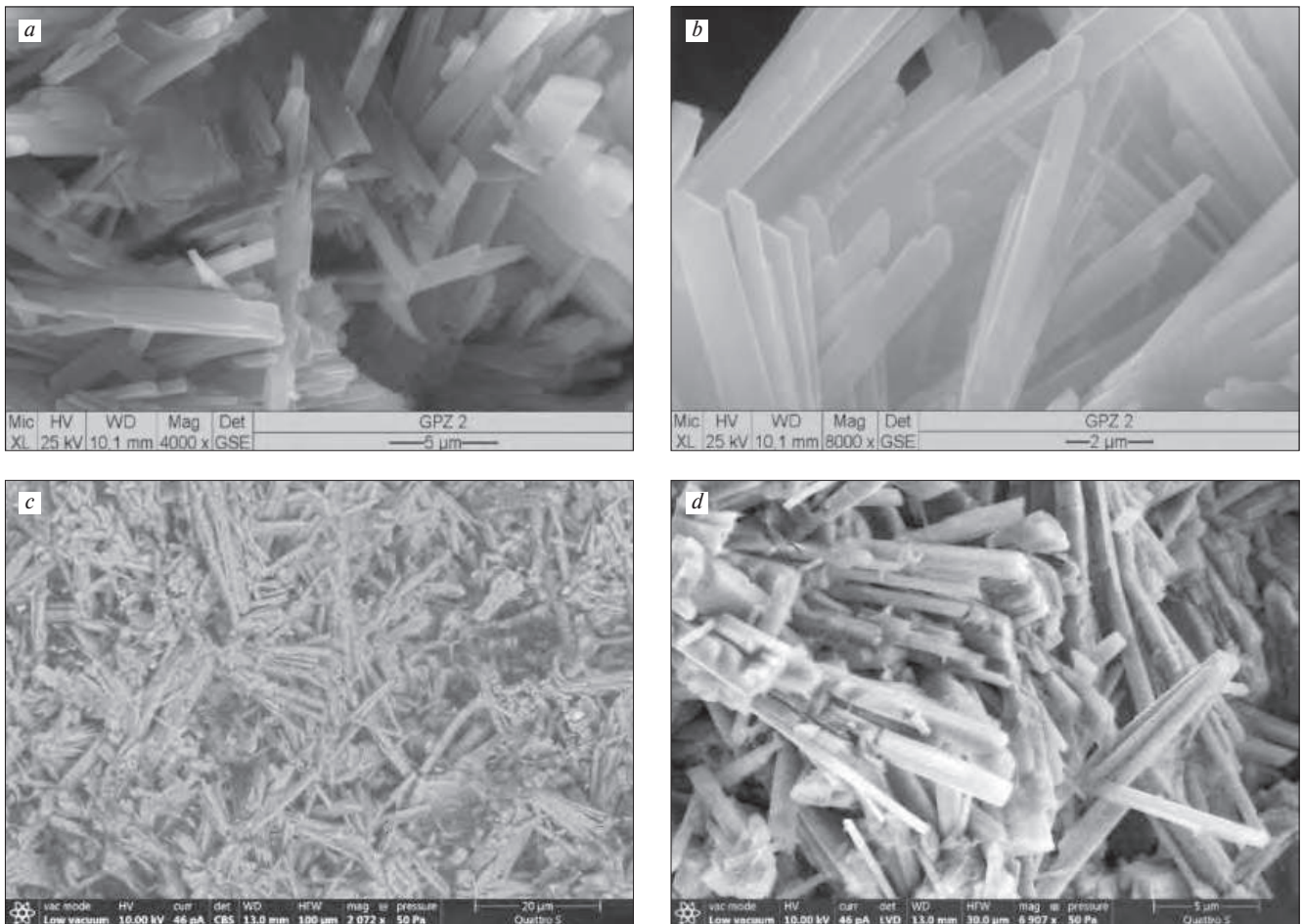


Рис. 2. Микроструктура гипсовой матрицы при различных увеличениях: без добавок $\times 4000$ (a); $\times 8000$ (b); с добавлением 5% портландцемента $\times 2000$ (c); $\times 7000$ (d)
Fig. 2. Microstructure of gypsum-based composites with different magnification: without any additives $\times 4000$ (a); $\times 8000$ (b); with 5% of Portland cement $\times 2000$ (c); $\times 7000$ (d)

После обжига глинистых материалов, которые в исследовании представлены в виде дегидратированной глины и керамической пыли [12, 15], пластинчатые структуры переходят в мелкокристаллические образования и аморфную фазу, характеризующиеся высокой химической активностью. Добавление модификаторов способствует росту прочностных свойств, при этом характеристики водостойкости изменяются незначительно, что, вероятно, обусловлено нестабильностью аморфных фаз и процессами их набухания в воде, которые приводят к возникновению внутренних напряжений в гипсовом камне.

Введение кристаллических компонентов — диатомита и минеральной ваты, которые характеризуются значительно более тонким помолом, приводит к росту механических характеристик, вероятно, вследствие ускорения процесса структурообразования, поскольку частицы модификаторов выступают в качестве активных центров кристаллизации (нанодисперсная часть модификатора) и частично при взаимодействии с цементом формируют малорастворимые соединения.

Для изучения механизма влияния добавок были проанализированы спектры гипсовых композиций

(рис. 1), полученные на ИК-Фурье-спектрометре «IRAffinity-1» в диапазоне частот $400\text{--}4000\text{ см}^{-1}$.

Анализ спектральных данных позволил установить основной групповой состав гипсовых материалов, представленный в табл. 2.

Сравнительный анализ контрольного и модифицированных составов позволил выявить изменение окружения вокруг сульфатных групп и дополнительное формирование силикатных образований, что также подтверждает изменение характера пика гидратных групп (табл. 3).

Соотношение интенсивности пика к ширине позволяет судить об изменении характера пиков: более узкие пики с высокой интенсивностью свидетельствуют о кристаллической структуре материала, а близкие значения интенсивности и ширины пика говорят об аморфизации структуры или наложении близких по частотам функциональных групп. Введение силикатных добавок в состав гипса совместно с портландцементом приводит к изменению характера пика гидроксильных групп, что свидетельствует о формировании новых продуктов гидратации, вероятно, гидросиликатов или гидроалюмосиликатов кальция. Данную гипотезу также подтверждает сме-

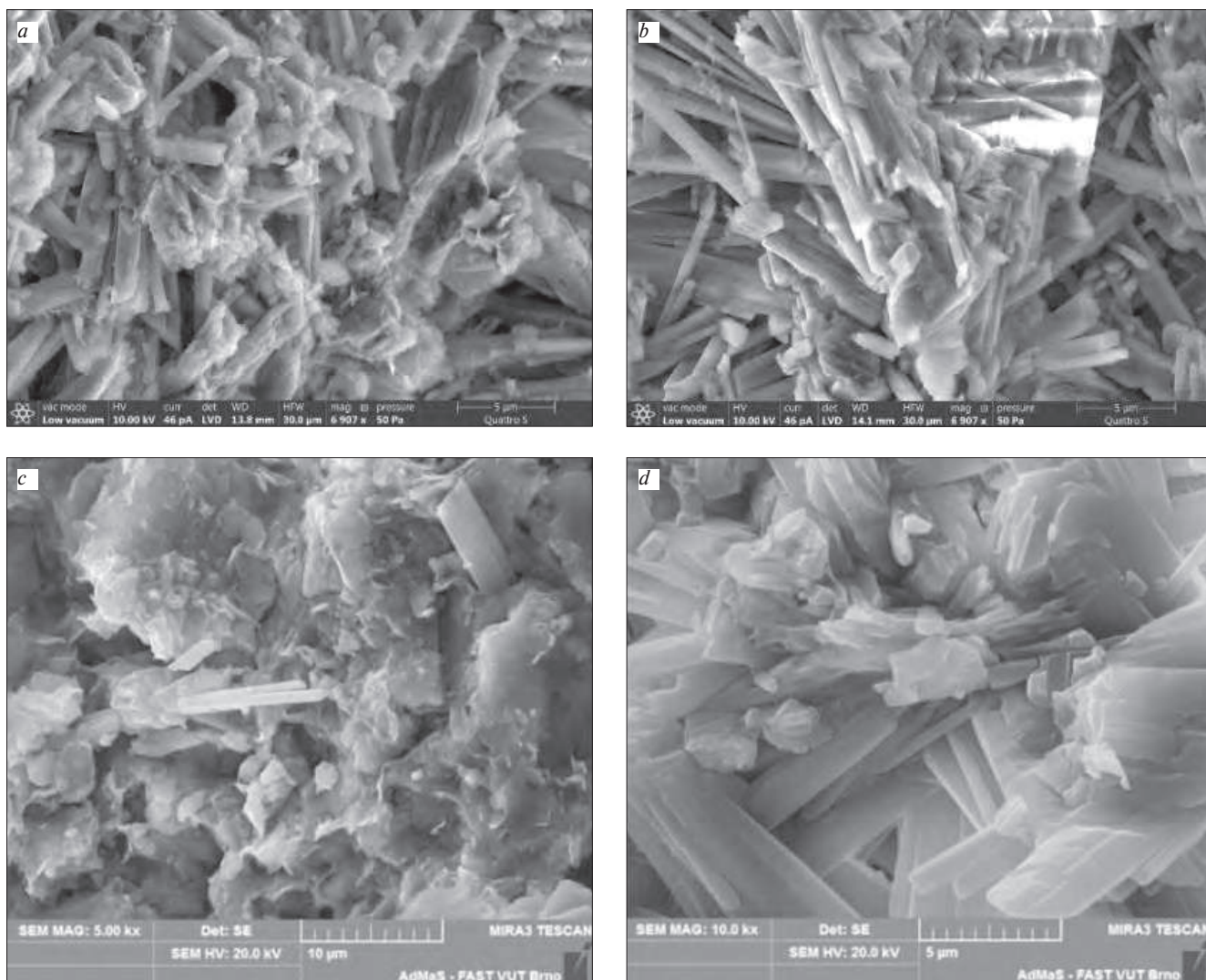


Рис. 3. Микроструктура гипсоцементного камня при различных увеличениях: при введении метакаолина $\times 7000$ (a, b); при добавлении алевролита $\times 5000$ (c); $\times 10000$ (d)

Fig. 3. Microstructure of gypsum-based composites with different magnification: with metakaolin $\times 7000$ (a, b); with aleuroelite $\times 5000$ (c); $\times 10000$ (d)

шение волновых чисел пиков, характеризующих наличие сульфатных и силикатных соединений.

Для подтверждения механизма влияния добавок на структуру матрицы разработанные составы были исследованы методом сканирующей электронной микроскопии и энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии. Структура матрицы (рис. 2, a, b) сложена из призматических и игольчатых кристаллов с четко выраженными гранями, которые распределены в хаотичном порядке. Длина кристаллогидратов сульфата кальция достигает 10–15 мкм, в поперечном направлении – 1–2 мкм. Добавление портландцемента в состав приводит к появлению аморфных образований (рис. 2, c, d), которые связывают кристаллы гипса в конгломераты. Их размер в поперечном направлении может достигать 20 мкм.

Микроструктура гипсоцементного камня при введении дополнительно метакаолина или алевролита характеризуется большей плотностью, поскольку аморфные соединения обволакивают кристаллогидраты гипса, обеспечивая рост межфазной поверхно-

сти. Новообразования на основе гидроалюмосиликатов и гидросиликатов кальция, уплотняя структуру материала, заполняют поровое пространство, связывают кристаллы в единый прочный конгломерат, который отличается более высокими параметрами прочности и водостойкости.

Анализ микроструктуры гипсовой композиции с керамической пылью, введенной совместно с портландцементом, показал аналогичные изменения – формирование более плотной структуры в сравнении с контрольным составом и наличие участков с плотноупакованными кристаллами, обволакивающими частицы керамической пыли (рис. 4, a, b).

Проведенный рентгеновский микроанализ (рис. 4, d) фрагмента с включениями керамической пыли показал наличие атомов кремния Si, алюминия Al и кислорода O. Данные свидетельствуют о формировании в структуре материала новообразований не только на основе гидросиликатов кальция, но и образование гидроалюминатов или гидроалюмосиликатов кальция.

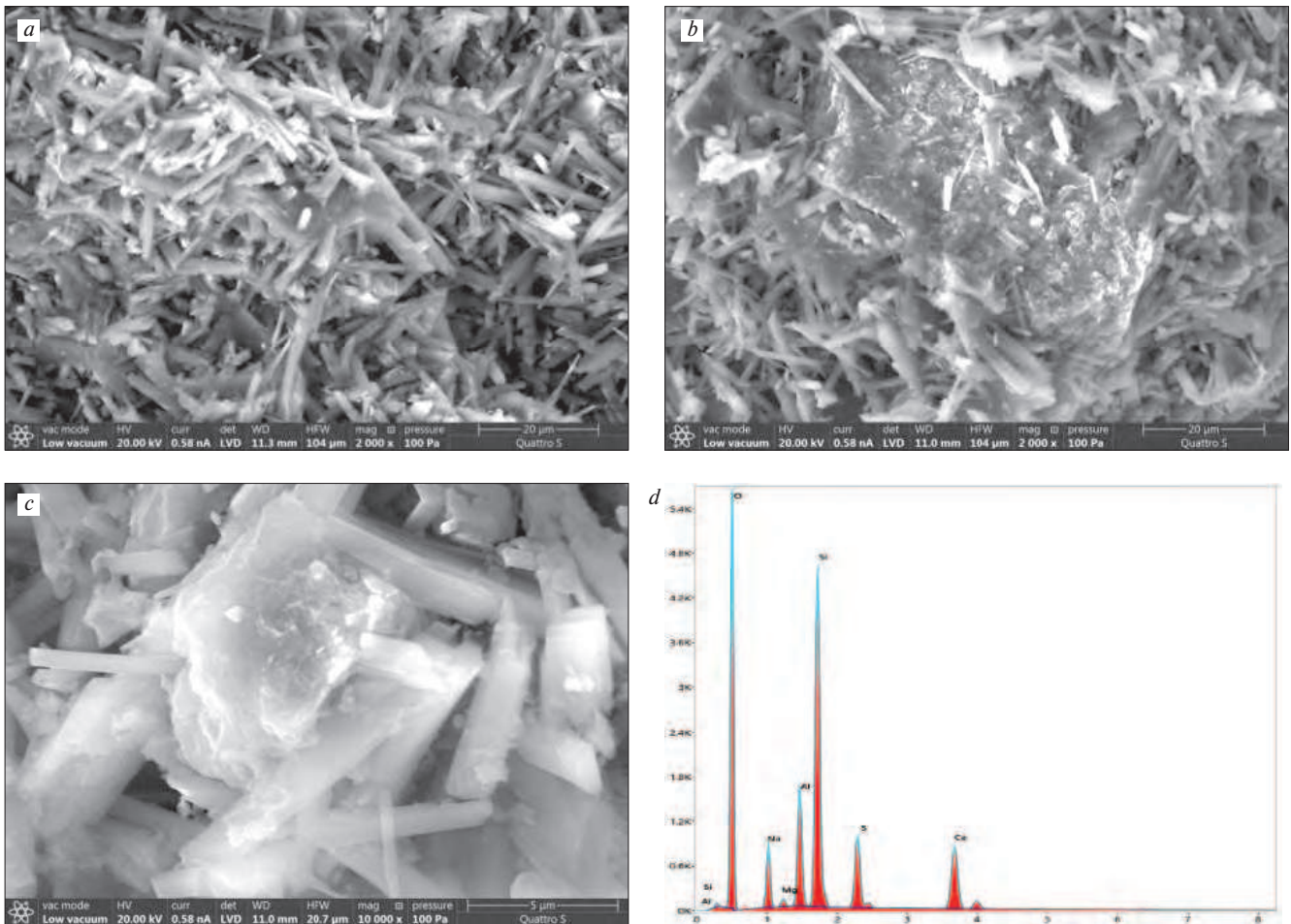


Рис. 4. Микроструктура модифицированной гипсовой матрицы при введении керамической пыли при увеличении $\times 2000$ (a, b), $\times 10000$ (c); результаты рентгеновского микроанализа модифицированной гипсовой матрицы (d)

Fig. 4. Microstructure of gypsum-based composite modified with ceramic dust $\times 2000$ (a, b), $\times 10000$ (c); data of energy-dispersive X-ray analysis of modified gypsum composite (d)

Выводы

Сравнительный анализ микроструктуры и спектральных данных гипсовых композиций при введении комплексных минеральных добавок (портландцемента и силикатного компонента) позволил подтвердить предположения о механизме влияния добавок, выдвинутые на основе анализа физико-механических свойств материалов. Применение РЭМ позволило установить формирование плотной структуры компо-

зита, состоящей из кристаллогидратов дигидрата сульфата кальция различной дисперсности, объединенных в конгломераты, что обеспечивает увеличение площади контактов. Частицы добавки выступают в качестве центров кристаллизации в процессах структурообразования (нанодисперсная часть добавки) и заполняют поровое пространство матрицы продуктами, формирующимися при взаимодействии портландцемента с компонентом на основе диоксида кремния.

Список литературы

1. Белов В.В., Бурьянов А.Ф., Яковлев Г.И., Петропавловская В.Б., Фишер Х.-Б., Маева И.С., Новиченкова Т.Б. Модификация структуры и свойств строительных композитов на основе сульфата кальция: Монография / Под общ. ред. А.Ф. Бурьянова. М.: Изд-во Де Нова. 2012. 196 с.
2. Коровяков В.Ф. Современные достижения в области создания водостойких гипсовых вяжущих. Сборник научных трудов. М.: ГУП «НИИМОССТРОЙ», 2006. 149 с.
3. Чернышева Н.В., Агеева М.С., Эльян Исса Жямал Исса, Дребезгова М.Ю. Влияние минеральных добавок различного генезиса на микроструктуру

References

1. Belov V.V., Buranov A.F., Yakovlev G.I., Petropavlovskaya V.B., Fisher H.-B., Maeva I.S., Novichenkova T.B. Modifikatsiya struktury i svoistv stroitel'nykh kompozitov na osnove sul'fata kal'tsiya: monografiya [Modification of the structure and properties of calcium sulfate-based building composites: monography] Moscow: Publishing house De Nova. 2012. 196 p.
2. Korovyakov V.F. Modern advances in water-resistant gypsum binders. Collection of scientific works. Moscow: State unitary enterprise NIIMosstroy. 2006. 149 p. (In Russian).
3. Chernysheva N.V., Ageeva M.S., Elyan Issa Zhyamal Issa, Drebezgova M.Yu. Influence of mineral additives

- гипсоцементного камня // *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова*. 2013. № 4. С. 12–18.
4. Пантелеев А.С., Тимашев В.В. Твердение вяжущих веществ в присутствии кристаллических добавок различной структуры // *Строительные материалы*. 1961. № 12. С. 32–34.
 5. Королев Е.В. Нанотехнология в строительном материаловедении. Анализ состояния и достижений. Пути развития // *Строительные материалы*. 2014. № 11. С. 47–79.
 6. Изотов В.С., Мухаметрахимов Р.Х., Галаутдинов А.Р. Исследование влияния активных минеральных добавок на реологические и физико-механические свойства гипсоцементно-пуццоланового вяжущего // *Строительные материалы*. 2015. № 5. С. 20–23.
 7. Мухаметрахимов Р.Х., Галаутдинов А.Р. Роль активных минеральных добавок природного происхождения в формировании структуры и свойств гипсоцементно-пуццоланового вяжущего // *Вестник Казанского технологического университета*. 2017. № 6. С. 60–63.
 8. Галаутдинов А.Р., Мухаметрахимов Р.Х. Особенности гидратации модифицированного гипсоцементно-пуццоланового вяжущего // *Строительные материалы*. 2019. № 10. С. 58–61. DOI: 10.31659/0585-430X-2019-775-10-58-63
 9. Ильичёва О.М., Наумкина Н.И., Лыгина Т.З. О структурном совершенстве природного и синтетического кремнезема // *Вестник Казанского технологического университета*. 2010. № 8. С. 459–463.
 10. Игнатова А.М. Правила управления структурой и свойствами материала каменного литья // *Вестник ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение*. 2010. № 3. С. 94–102.
 11. Yakovlev G., Gordina A., Khritankov V., et al. Gypsum composition with siltstone-based mineral modifier. *Selected papers of the 13th International Conference “Modern Building Materials, Structures and Techniques”*. Vilnius Gediminas Technical University. 2019, pp. 217–223. DOI: 10.3846/mbmst.2019.041
 12. Халиуллин М.И., Нуриев М.И., Рахимов Р.З., Гайфуллин А.Р. Влияние добавки термоактивированной глины на свойства композиционного гипсового вяжущего // *Известия КазГАСУ*. 2016. № 1 (35). С. 205–210. EDN: VUSKSH.
 13. Петропавловская В.Б. Использование минеральных ультрадисперсных модификаторов на основе отходов промышленности в гипсовых композитах // *Строительные материалы*. 2018. № 8. С. 18–23. DOI: 10.31659/0585-430X-2018-762-8-18-23
 14. Сегодня Д.Н., Потапова Е.Н. Гипсоцементно-пуццолановое вяжущее с активной минеральной добавкой метакеолин // *Успехи в химии и химической технологии*. 2014. № 8 (157). С. 77–79.
 15. Барковская С.В., Пчельникова В.А. Разработка композиционных гипсовых вяжущих веществ с использованием керамзитовой пыли и стеклобоя // *Эксперт: теория и практика*. 2022. № 3 (18). С. 34–38. DOI: 10.51608/26867818_2022_3_34
 - of different genesis on microstructure of gypsum cement stone. *Vestnik BSTU named after V.G. Shukhov*. 2013. No. 4, pp. 12–18. (In Russian).
 4. Panteleev A.S., Timashev V.V. Hardening of binders in the presence of crystalline additives of various structures. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 1961. No. 12, pp. 32–34. (In Russian).
 5. Korolev E.V. Nanotechnology in building materials science. Status and achievement analysis. Development paths. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2014. No. 11, pp. 47–79. (In Russian).
 6. Izotov V.S., Muhametrahimov R.H., Galautdinov A.R. Study of the effect of active mineral additives on the rheological and physical-mechanical properties of gypsum-pozzolan binder. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2015. No. 5, pp. 20–23. (In Russian).
 7. Muhametrahimov R.H., Galautdinov A.R. The role of active mineral additives of natural origin in the formation of the structure and properties of gypsum-cement-pozzolan binder. *Vestnik of Kazan Technical University*. 2017. No. 6, pp. 60–63. (In Russian).
 8. Galautdinov A.R., Muhametrahimov R.H. Features of hydration of modified gypsum-cement-pozzolan binder. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2019. No. 10, pp. 58–61. (In Russian). DOI: 10.31659/0585-430X-2019-775-10-58-63
 9. Il'icheva O.M., Naumkina N.I., Lygina T.Z. On the structural perfection of natural and synthetic silica. *Vestnik of Kazan Technical University*. 2010. No. 8, pp. 459–463. (In Russian).
 10. Ignatova A. M. Rules for managing the structure and properties of stone casting material. *Vestnik PNIPIU. Mashinostroenie, materialovedenie*. 2010. No. 3, pp. 94–102. (In Russian).
 11. Yakovlev G., Gordina A., Khritankov V., et al. Gypsum composition with siltstone-based mineral modifier. *Selected papers of the 13th International Conference “Modern Building Materials, Structures and Techniques”*. Vilnius: Vilnius Gediminas Technical University. 2019, pp. 217–223. DOI: 10.3846/mbmst.2019.041
 12. Khaliullin M.I., Nuriev M.I., Rakhimov R.Z., Gaifullin A.R. Influence of thermoactivated clay additive on properties of composite gypsum binder. *Izvestiya KazGASU*. 2016. No. 1 (35), pp. 205–210. (In Russian).
 13. Petropavlovskaya V.B. Use of mineral ultrafine modifiers based on industrial waste in gypsum composites. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2018. No. 8. pp. 18–23. (In Russian). DOI: 10.31659/0585-430X-2018-762-8-18-23
 14. Segodnik D.N., Potapova E.N. Gypsum-pozzolan binder with active mineral additive metacaolin. *Uspekhi v khimii i khimicheskoi tekhnologii*. 2014. No. 8 (157), pp. 77–79. (In Russian).
 15. Barkovskaya S.V., Pchel'nikova V.A. Development of composite gypsum binders using expanded clay dust and glass cladding. *Ekspert: teoriya i praktika*. 2022. No. 3 (18), pp. 34–38. (In Russian). DOI: 10.51608/26867818_2022_3_34

УДК 579.222.2:666.972

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-805-8-59-61>

Н.В. БАЙКИНА, эксперт (n.baykina@narfu.ru), А.М. АЙЗЕНШТАДТ, д-р хим. наук (a.isenshtadt@narfu.ru)
Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова (163002, г. Архангельск, наб. Северной Двины, 17)

Переработка бетона: сотрудничество в сфере экологически эффективных технологий

Новые подходы к ревизии отходов перед сносом и реновацией зданий и управлению строительным мусором изучают эксперты трех стран – России, Норвегии и Финляндии – в рамках международного проекта «Переработка бетона: сотрудничество в сфере экологически эффективных технологий в Арктической зоне»/ «DeConcrete: Eco-efficient Arctic Technologies Cooperation». Ученым важно понять, какие скрытые возможности содержит разрушенный бетон, как можно инициировать физико-химические процессы, способствующие его практическому применению. Полученные данные будут использоваться при создании новых композитных материалов на основе переработанного бетона.

Ключевые слова: энергосбережение, утилизация отходов, строительный мусор, переработанный бетон, интернационализация интеллектуальных ресурсов.

Международный проект реализуется при финансовой поддержке программы приграничного сотрудничества КОЛАРКТИК 2019–2022 https://narfu.ru/international/projects/mezdunarodnie_proekti/detail.php?ID=332976.

Для цитирования: Байкина Н.В., Айзенштадт А.М. Переработка бетона: сотрудничество в сфере экологически эффективных технологий // *Строительные материалы*. 2022. № 8. С. 59–61. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-805-8-59-61>

N.V. BAYKINA, Expert (n.baykina@narfu.ru), A.M. AYZENSHTADT, Doctor of Sciences (Chemistry) (a.isenshtadt@narfu.ru)
Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov (17, Severnaya Dvina Emb., Arkhangelsk, 163002, Russian Federation)

Concrete Recycling: Cooperation in the Field of Environmentally Efficient Technologies

New approaches to the audit of waste before demolition and renovation of buildings and management of construction waste are being studied by experts from three countries – Russia, Norway and Finland – within the framework of the international project: “Concrete recycling: cooperation in the field of environmentally efficient technologies in the Arctic zone” / “DeConcrete: Eco-efficient Arctic Technologies Cooperation”. It is important for scientists to understand what hidden possibilities the destroyed concrete contains, how it is possible to initiate physico-chemical processes that contribute to its practical application. The data obtained will be used to create new composite materials based on recycled concrete.

Keywords: energy saving, waste disposal, construction waste, recycled concrete, internationalization of intellectual resources.

The international project is being implemented with the financial support of the KOLARCTIC cross-border cooperation program 2019–2022
DOI: https://narfu.ru/international/projects/mezdunarodnie_proekti/detail.php?ID=332976

For citation: Baykina N.V., Ayzenshtadt A.M. Concrete recycling: cooperation in the field of environmentally efficient technologies. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2022. No. 8, pp. 59–61. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-805-8-59-61>

Важнейшим критерием эффективности индустрии строительных материалов является рациональное природопользование и оптимизация системы «человек – материал – окружающая среда». В этом плане одна из главенствующих ролей принадлежит использованию техногенных отходов [1–4]. Для стройиндустрии всех стран это сырье, представляющее собой строительный мусор, мировые объемы которого постоянно растут. В связи с этим востребованы экономически обоснованные решения по использованию отработанных бетонных конструкций, начиная с оптимизации методов демонтажа объектов и сепарации отходов и заканчивая созданием новых продуктов с добавленной стоимостью [5–12].

Международные проекты имеют большой потенциал наращивания интеллектуального ресурса стран-участниц для решения практических задач социального и экономического развития регионов.

Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова выступает лидером меж-

дународного исследовательского альянса в составе Университета Тромсё – Арктического университета Норвегии, Норвежского исследовательского института SINTEF, Университета Оулу (Финляндия) и Норвежского инновационного кластера по производству бетона. Исследования, выполняемые учеными из трех стран в рамках проекта, показали, что материалы, полученные в результате дробления бетонного лома, могут стать хорошей альтернативой природным материалам, служащим в качестве заполнителя при производстве бетонных работ и активного компонента в вяжущих композициях. Данный факт влечет за собой значительный эффект, связанный с ресурсосбережением – снижением затрат на сырье.

Результаты экспериментов и исследований, реализованных в рамках проекта, были представлены на многочисленных конференциях и семинарах (рис. 1): в апреле 2021 г. в Томском государственном архитектурно-строительном университете,



Рис. 1. Проект представлен в г. Лулео (Швеция) на семинаре ППС Коларктик 2014–2020 «Партнеры программы собираются вместе»
Fig. 1. DeConcrete project was presented in Lulea (Sweden) at Kolarctic CBC seminar “Program Partners Get-Together”

в октябре 2021 г. на круглом столе «Приграничное сотрудничество в действии на благо сопредельных регионов» в рамках Форума стратегов 2020–2021. Сотрудники кафедр строительных материалов и технологий, железобетонных и каменных конструкций ТГАСУ выступают внешними рецензентами аналитических отчетов по методам демонтажа объектов и сепарации бетонного лома, подготовленных норвежскими партнерами.

В ноябре 2021 г. состоялся международный семинар «Использование пылевидных фракций бетонных отходов», в котором приняли участие около семидесяти представителей образовательных организаций и бизнес-компаний со всего мира. Партнеры проекта представили методы и эксперименты по созданию гранулированных заполнителей из мелкодисперсного вторичного бетона, использованию бетонной пыли для создания композиционных вяжущих материалов, применению гидроразделения для очистки плит перекрытий от бетона и разработке интегральных показателей качества отработанного бетона (рис. 2).

Список литературы

1. Владимиров С.Н. Проблемы переработки отходов строительной индустрии // *Системные технологии*. 2016. № 2 (19). С. 101–105.
2. Каунова А.С., Михайлова М.А. Современные методы утилизации строительных отходов // *Электронный научный журнал*. 2017. № 1–2 (16). С. 218–221.
3. Ключева Н.А. Проблемы утилизации строительного мусора. В сборнике: *Потенциал цифровой трансформации предпринимательства. Материалы меж-*



Fig. 2. Лабораторные исследования по использованию агрегатов из переработанного бетона (Университет Тромсё – Арктический университет Норвегии)
Fig. 2. Laboratory test on RCA (UiT – The Arctic University of Norway)

В рамках проекта сформировалась модель единого глобального научного рынка с общими стандартами, механизмами работы, понятийным аппаратом, принципами оценки результатов и адаптации разработок для международных научных рынков.

Наиболее ценным результатом научного проекта можно считать публикации в профильных международных журналах и коллективные монографии. Экспертами проекта за два года работы в тесной научной кооперации опубликовано семь научных статей.

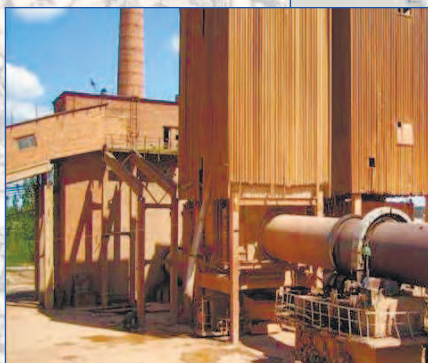
Важным результатом реализации проекта является конвертация его результатов в учебные материалы посредством создания новых учебных курсов и их методическое обеспечение. Так, полученные в ходе реализации проекта DeConcrete новые научные знания использованы для разработки дополнительной профессиональной программы повышения квалификации «Переработка бетона: экологически эффективные технологии для Арктической зоны». В САФУ первый набор на программу проведен в апреле 2022 г.

References

1. Vladimirov S.N. Problems of waste processing in the construction industry. *Sistemnyye tekhnologii*. 2016. No. 2 (19), pp. 101–105. (In Russian).
2. Kaunova A.S., Mikhailova M.A. Modern methods of construction waste disposal. *Elektronnyy nauchnyy zhurnal*. 2017. No. 1–2 (16), pp. 218–221. (In Russian).
3. Klyueva N.A. Problems of disposal of construction waste. In the collection: *The potential of digital transformation of entrepreneurship. Materials of the internation-*

- дународной научно-практической конференции. 2019. С. 47–49.
4. Шевцов В.Р., Стариков А.П., Гончаров В.Г. Использование техногенных отходов производства в строительстве автомобильных дорог. В сборнике: Развитие дорожно-транспортного комплекса и строительной инфраструктуры на основе рационального природопользования: Материалы VII Всероссийской научно-практической конференции (с международным участием). 2012. С. 216–220.
 5. Ерохина Я.Ю., Сергиенко А.Д., Герасимова А.В. Использование вторичного сырья в производстве строительных материалов. Дни студенческой науки: Сборник докладов научно-технической конференции по итогам научно-исследовательских работ студентов института гидротехнического и энергетического строительства НИУ МГСУ. М., 2020. С. 95–106.
 6. Зайцева Л.Р., Луцык Е.В., Латыпова Т.В., Латыпов В.М., Федоров П.А., Попов В.П. Влияние вида заполнителя из отходов производств на коррозионную стойкость бетона // Строительные материалы. 2021. № 11. С. 23–29. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-797-11-23-29>
 7. Лукутцова Н.П., Пыкин А.А., Соболева Г.Н., Золотухина Н.В., Обыденная А.А. Композиционный заполнитель 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>
 8. Матар П.Ю., Петропавловская В.Б., Баркая Т.Р., Байсари М.Ф., Эль-Хасание Л.С. Пустотелые стеновые бетонные блоки с рециклированными заполнителями и стеклом // Строительные материалы. 2016. № 3. С. 69–75.
 9. Лотов В.А., Сулейменова М.Е., Осмонов П.А. Использование техногенных отходов при изготовлении строительных материалов. V Международная конференция-школа по химической технологии: Сборник тезисов докладов сателлитной конференции XX Менделеевского съезда по общей и прикладной химии. 2016. С. 260–262.
 10. Рязанова Г.Н., Лукьянова А.О. Оценка проблем развития процесса реновации жилья в крупных городах России // Градостроительство и архитектура. 2020. Т. 10. № 2 (39). С. 131–138.
 11. Асанова А.С., Лузгина Е.А. Современные материалосберегающие методы переработки строительных отходов // Современные научные исследования и инновации. 2016. № 11 (67). С. 181–184.
 12. Кальгин А.А., Фахратов М.А., Сохряков В.И. Опыт использования отходов дробленого бетона в производстве бетонных и железобетонных изделий // Строительные материалы. 2010. № 6. С. 32–33.
 - al scientific-practical conference. 2019, pp. 47–49. (In Russian).
 4. Shevtsov V.R., Starikov A.P., Goncharov V.G. The use of industrial waste in the construction of roads. In the collection: Development of the road transport complex and construction infrastructure based on rational environmental management. materials of the VII All-Russian Scientific and Practical Conference (with international participation). 2012, pp. 216–220. (In Russian).
 5. Erokhina Ya.Yu., Sergienko A.D., Gerasimova A.V. The use of secondary raw materials in the production of building materials. Days of Student Science. Collection of reports of the scientific and technical conference on the results of research work of students of the Institute of Hydrotechnical and Power Engineering NRU MGSU. Moscow. 2020, pp. 95–106. (In Russian).
 6. Zaitseva L.R., Lutsyk E.V., Latypova T.V., Latypov V.M., Fedorov P.A., Popov V.P. Influence of the type of filler from production waste on the corrosion resistance of concrete. Stroitel'nye Materialy [Construction Materials]. 2021. No. 11, pp. 23–29. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-797-11-23-29>
 7. Lukuttsova 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>
 8. Matar P.Yu., Petropavlovskaya V.B., Barkaya T.R., Baisari M.F., El'-Khasaniie L.S. Hollow wall concrete blocks with recycled aggregates and glass. Stroitel'nye Materialy [Construction Materials]. 2016. No. 3, pp. 69–75. (In Russian).
 9. Lotov V.A., Suleimenova M.E., Osmonov P.A. The use of man-made waste in the manufacture of building materials. V International Conference-School on Chemical Technology. Collection of abstracts of reports of the satellite conference of the XX Mendeleev Congress on General and Applied Chemistry. 2016, pp. 260–262. (In Russian).
 10. Ryazanova G.N., Lukyanova A.O. Evaluation of the problems of development of the process of housing renovation in large cities of Russia. Gradostroitel'stvo i arkhitektura. 2020. Vol. 10. No. 2 (39), pp. 131–138. (In Russian).
 11. Asanova A.S., Luzgina E.A. Modern material-saving methods of construction waste processing. Sovremennyye nauchnyye issledovaniya i innovatsii. 2016. No. 11 (67), pp. 181–184. (In Russian).
 12. Kalgin A.A., Fakhratov M.A., Sokhryakov V.I. Experience in the use of crushed concrete waste in the production of concrete and reinforced concrete products. Stroitel'nye Materialy [Construction Materials]. 2010. No. 6, pp. 32–33. (In Russian).

Следуя традициям открываем НОВОЕ!

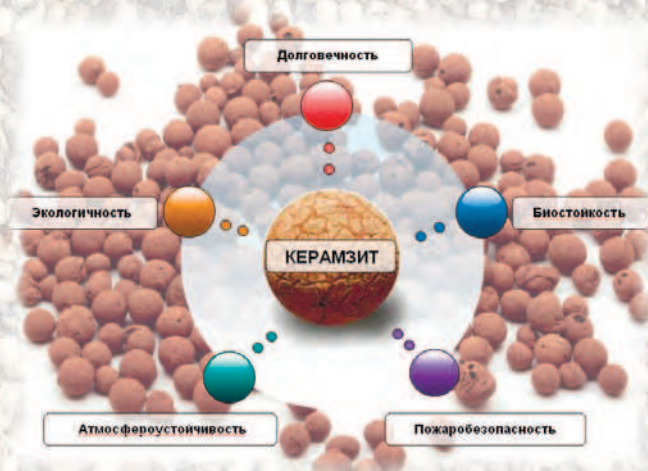


НИИКерамзит — ведущий научно-исследовательский институт Более 60-ти лет работы в области производства искусственных пористых заполнителей

- научно-исследовательские работы в области производства пористых заполнителей
- лабораторно-технологические и опытно-промышленные испытания сырья
- обследование, техническая и технологическая экспертиза действующих производств
- разработка предложений по оптимизации и реконструкции технологических линий
- подбор и оказание услуг по поставке технологического оборудования и газогорелочных устройств для производства
- разработка рекомендаций по устройству футеровки обжиговых печей
- разработка технических решений по снижению расхода топлива и электроэнергии
- разработка научно-технической и нормативной документации
- разработка технологий утилизации и переработки крупнотоннажных отходов
- разработка технологии получения высокопрочных заполнителей специального назначения

Искусственные пористые заполнители используются:

- в легких бетонах для жилищно-гражданского и промышленного строительства;
- в качестве теплоизоляционных засыпок;
- в коммунальном хозяйстве, в качестве фильтрующих засыпок в водоочистке;
- в сельском хозяйстве;
- в гидротехническом, дорожном, аэродромном строительстве, мостостроении для изготовления плит, проезжей части мостов, сборных элементов арочных мостов, балок пролетных строений, сборных элементов надарочных строений, плит путепроводов и т. д.



443086, г. Самара, ул. Ерошевского, 3а
(846) 263-00-79, тел. (846) 263-42-49
keramzit_union@mail.ru,
2630079@mail.ru

www.NIIKeramzit.ru

Керамзит – многофункциональный материал для современного строительства

Expanded Clay is a Multifunctional Material for Modern Construction



6–7 июля 2022 г. в Самаре прошла XVIII ежегодная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы расширения производства и применения керамзита и керамзитобетона в строительстве». Организаторами традиционно выступили НИИКерамзит и Союз производителей керамзита и керамзитобетона (НО «СПКиК»). Журналы издательства «Стройматериалы» – «Строительные материалы»® и «Жилищное строительство» выступают постоянными информационными партнерами мероприятия.

В работе конференции приняли участие более 50 руководителей и ведущих специалистов 16 керамзитовых заводов из 12 регионов России, Беларуси и Казахстана, представители машиностроительных организаций, ученые отраслевых НИИ и вузов. Было представлено более 15 докладов и сообщений. В рамках конференции состоялось собрание НО «СПКиК».

Участников конференции приветствовал генеральный директор НИИКерамзит, председатель Совета НО «СПКиК», канд. техн. наук **В.М. Горин**. Он отметил, что керамзитовая отрасль относительно молода. Пик создания керамзитовых предприятий приходится на 1960–1970-е гг., когда керамзит требовался в огромных количествах для индустрии крупнопанельного домостроения. К 1990 г. в стране действовало более 330 заводов.

Резкое повышение теплотехнических требований в строительстве в начале 1990-х гг. (печально знаменитое Изменение № 3 к СНиП II-3-79 «Строительная теплотехника») и соответствующее изменение строительных технологий (переход к многослойным конструкциям с эффективным утеплителем) обусловили снижение применения керамзитобетона и постепенное закрытие более половины керамзитовых предприятий. При этом объем производства керамзита сократился почти в пять раз.

Однако керамзит и керамзитобетон далеко не исчерпали свои возможности в современном строительстве. В настоящее время ученые и производители керамзита предлагают рынку продукцию (архитектурно-строительные решения и керамзит для их реализации) с принципиально новыми качественными и экономическими характеристиками.

В первую очередь речь идет о создании энергоэффективных экологичных зданий из легкого керамзитобетона, что позволяет снизить до 35% массу зданий, экономить на стоимости материалов и трудозатратах порядка 20%, выигрывая полезную площадь за счет уменьшения толщины стен. При этом керамзитобетон абсолютно негорючий материал.

О разработках легкого и особо легкого керамзита и бетонов на их основе, а также о новых технических решениях по их применению в промышленном и гражданском строительстве рассказал **И.В. Недосеко**, д-р техн. наук (УГНТУ).

Доклад **С.С. Каприелова**, д-ра техн. наук (НИИЖБ), был посвящен перспективе создания высокопрочного керамзитобетона класса В45–В60. Научные работы в этом направлении ведутся в институте не первый год. Потребность в легком высокопрочном бетоне особенно велика при строительстве инженерных сооружений и в высотном строительстве.

Рынок диктует требования к строительным материалам и технологиям строительства. В настоящее время от керамзитовой отрасли производители бетонных конструкций ждут керамзит насыпной плотностью 180–400 кг/м³ для производства энергоэффективных конструкций, к более плотному керамзиту (600–800 кг/м³) предъявляются более высокие требования по прочности – 10 МПа и выше. Кроме того, требуются более мелкие и узкие фракции керамзита, например 0–4, 4–10 мм.

Те предприятия, которые смогли перестроиться и перейти на выпуск востребованной рынком продукции, чувствуют себя вполне уверенно.

Одним из лидеров керамзитовой отрасли еще со времен СССР является «Завод керамзитового гравия г. Новолукомль» (Беларусь). Его директор **М.Г. Лазарашвили** неизменный участник и докладчик конференции. На предприятии постоянно совершенствуется технология, что позволяет гибко реагировать на запросы рынка по ассортименту и качеству продукции и при этом снижать себестоимость, обеспечивая стабильную рентабельность. Михаил Гурамович рассказал, что выпуск керамзита мелких фракций неуклонно растет. Например, в 2021 г. совокупный





объем фракций 0–4 и 4–10 мм составил более 77%. Все больше керамзита (порядка 34% в 2021 г.) используется для производства керамзитобетонных блоков – востребованных изделий с высокой добавленной стоимостью. В 2021 г. выпуск блоков увеличился более чем вдвое по сравнению с 2016 г. и составил 138,6 тыс. м³. Ассортимент включает более 15 форматов и типоразмеров.

Новинка – пенокерамзитобетонные блоки, разработанные совместно с белорусскими учеными. При применении комплексной воздухововлекающей добавки удалось снизить плотность изделий на 7%, сохранив прочностные характеристики. Морозостойкость изделий без применения добавки составляла не менее 50 циклов, с применением добавки достигнуто более 150 циклов, при этом расход цемента снижен на 17,6%, до 140 кг на 1 м³ блоков.

Неуклонно наращивает выпуск керамзита (в 2021 г. +15% к 2020 г.) и керамзитобетонных блоков (в 2021 г. +73% к 2020 г.) флагман российской керамзитовой отрасли «Винзилинский завод керамзитового гравия». Его генеральный директор **Р.Ф. Саммасов** – апологет расширения применения керамзитобетона за счет ассортимента, а также оптимизации свойств керамзита в соответствии с требованиями заказчика. На заводе кроме блоков выпускается товарный керамзитобетон с высокой подвижностью, что позволяет подавать смесь бетононасосами и возводить монолитные каркасы, перекрытия и другие конструкции. Востребована строителями сухая керамзитобетонная смесь для стяжки пола, которая обеспечивает не только выравнивание поверхности, но и снижает теплопроводность и уровень ударного шума.

Немалый вклад в производственные успехи предприятия обеспечивает сотрудничество с отраслевой наукой, в частности с Тюменским индустриальным университетом.

Однако выпуск и широкое применение качественного керамзита сдерживаются не только рыночными факторами. Как и в других отраслях, использующих минеральное сырье, в керамзитовой отрасли

наблюдается истощение доступных качественных вспучивающихся глин. Предприятия вынуждены искать альтернативы путем применения различных добавок, вовлечения в производство нетрадиционного сырья и техногенных отходов.

Этой теме на конференции были посвящены доклады **Н.Г. Чумаченко**, д-ра техн. наук (СамГТУ), о применении кремнистых пород; **В.Д. Аваковой**, ведущего научного сотрудника НИИКерамзит, о цеолитовом сырье Республики Саха (Якутия).

Важнейшим вопросом технологической устойчивости отрасли является обеспеченность и постоянное совершенствование производственного оборудования. В советское время оборудование для промышленности строительных материалов изготавливалось в основном в Белоруссии и на Украине. В постсоветский период многие подотрасли сделали ставку на зарубежные машиностроительные компании. Однако в настоящее время всем приходится рассчитывать только на потенциал российской промышленности, которая, к сожалению, не может пока в полной мере обеспечить выпуск требуемого оборудования. При этом следует отметить, что в НИИКерамзит разработаны многие агрегаты, выпуск которых можно было бы наладить на отечественных предприятиях. Об этом неоднократно говорила зам. директора института **С.А. Токарева**.

Социально-экономические и политические изменения, происходящие в России и мире, неизбежно отражаются на экономике в общем и строительном комплексе в частности. Но любой кризис является также периодом возможностей. Открываются они и перед керамзитовой отраслью. Это направления использования продукции предприятий в дорожном строительстве и сельском хозяйстве, возвращение в индивидуальное и индустриальное строительство. Крупными потребителями керамзита и керамзитобетона могут стать участники инфраструктурных проектов в арктической зоне. Важно производить продукцию, отвечающую техническим требованиям, в нужных количествах и по рыночной цене. Перспективы у отрасли есть, важно их не упустить.



УДК 691.175/8

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-805-8-65-69>

О.Б. РУДАКОВ, д-р хим. наук, профессор (robi57@mail.ru),
 А.М. ХОРОХОРДИН, начальник центра (a_horohordin@mail.ru),
 Я.О. РУДАКОВ, инженер (voroneth36@gmail.com),
 Е.А. ХОРОХОРДИНА, канд. хим. наук, доцент (chorochordina@mail.ru)

Воронежский государственный технический университет (394006, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84)

Применение пиролитической хромато-масс-спектрометрии в контроле качества строительных полимеров и композитов

Рассмотрены возможности метода пиролитической газовой хромато-масс-спектрометрии (Py-GC-MS) в идентификации и контроле качества полимеров и композитов на их основе, используемых в строительных материалах, в определении теплофизических характеристик высокомолекулярных соединений, их молекулярно-массового распределения, в установлении строения структурных звеньев гомо- и гетерополимеров, в идентификации присадок, используемых в полимерных материалах, в контроле качества и безопасности изделий из полимеров. Пиролитические ячейки, применяемые в Py-GC-MS, позволяют помещать взвешенный образец (как твердый, так и жидкий) в стальной тигель с кварцевым покрытием, который может нагреваться до 1050°C. Современные комплексы Py-GC-MS работают в шести основных режимах: анализ в режиме программирования температуры пиролиза; одностадийный пиролиз; термодесорбция; двухстадийный и многоступенчатый анализ с хроматографическим разделением каждой термической зоны; реакционный пиролиз. Приведены примеры применения метода Py-GC-MS в контроле качества поливинилхлорида, композитных материалов на основе полиэтилена, древесно-композитных материалов, фторуглеродных эластомеров, композиций полимочевины и полиуретана, неорганических вяжущих.

Ключевые слова: пиролитическая газовая хромато-масс-спектрометрия, полимеры, композиты, строительное материаловедение.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и образования Российской Федерации. Проект № 2021-2296-512-0001-060.

Для цитирования: Рудаков О.Б., Хорохордин А.М., Рудаков Я.О., Хорохордина Е.А. Применение пиролитической хромато-масс-спектрометрии в контроле качества строительных полимеров и композитов // *Строительные материалы*. 2022. № 8. С. 65–69. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-805-8-65-69>

O.B. RUDAKOV, Doctor of Sciences (Chemistry) (robi57@mail.ru), A.M. KHOROKHORDIN, Head of the Center (a_horohordin@mail.ru), Ya.O. RUDAKOV, Engineer (voroneth36@gmail.com), E.A. KHOROKHORDINA, Candidate of Sciences (Chemistry) (chorochordina@mail.ru) Voronezh State Technical University (84, 20th Anniversary of October Street, Voronezh, 394006, Russian Federation)

Application of Pyrolytic Chromatography-Mass Spectrometry in Quality Control of Building Polymers and Composites

In a brief review, the possibilities of the pyrolytic gas chromatography-mass spectrometry (Py-GC-MS) method in the identification and quality control of polymers and composites based on them used in building materials, in determining the thermal and physical characteristics of high-molecular compounds, their molecular mass distribution, in establishing the structure of the structural units of homo- and heteropolymers, in the identification of additives used in polymer materials, in quality control and safety of polymer products. Pyrolytic cells used in Py-GC-MS allow the suspended sample (both solid and liquid) to be placed in a quartz-coated steel crucible, which can be heated up to 1050°C. Modern Py-GC-MS complexes operate in 6 main modes: analysis in the pyrolysis temperature programming mode; single-stage pyrolysis; thermal desorption; two-stage and multi-stage analysis with chromatographic separation of each thermal zone; and reaction pyrolysis. Examples of the use of the Py-GC-MS method in quality control of polyvinyl chloride, composite materials based on polyethylene, wood-composite materials, fluorocarbon elastomers, compositions of polyurea and polyurethane, inorganic binders are given

Keywords: pyrolytic gas chromatography-mass spectrometry, polymers, composites, building materials science.

The work was supported by the Ministry of Science and Education of the Russian Federation, project No. 2021-2296-512-0001-060.

For citation: Rudakov O.B., Horohordin A.M., Rudakov Ya.O., Horohordina E.A. Application of pyrolytic chromatography-mass spectrometry in quality control of building polymers and composites. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2022. No. 8, pp. 65–69. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-805-8-65-69>

В настоящее время строительная отрасль нуждается в материалах, обладающих целым комплексом иногда мало сочетающихся физико-механических и эксплуатационных характеристик. Классическая пиролитическая газовая хроматография внесла существенный вклад в анализ синтетических полимеров, биополимеров, в их идентификацию и контроль качества [1]. Пиролитическая газовая хроматография стала обязательным методом, применяемым в заводских лабораториях предприятий, производящих каучуки и полимеры. Современное развитие пиролитической аппаратуры и совмещение ее с газовой хромато-масс-спектрометрией

(Py-GC-MS) придали мощный импульс в исследовании полимерных материалов и композитов на качественно новом уровне [2].

Газовая хромато-масс-спектрометрия Py-GC-MS решает следующие задачи: а) расшифровка химической структуры полимера и технологии производства (обратный инжиниринг), в частности позволяет определить природу концевых групп, молекулярно-массовое распределение, последовательность структурных звеньев гетерополимеров, характеристики смеси или сополимера, стереорегулярность; б) качественный и количественный анализ добавок — анти-

оксидантов, стабилизаторов, пластификаторов, антистатиков, антипомутнителей, огнеупоров, порообразователей и др.; в) определение токсичности материалов – летучих органических соединений, эфиров терефталевой кислоты и других фталатов; г) выяснение механизма и кинетики термической деградации материала, устойчивости его к воздействию УФ-излучения, агрессивных газов и влаги.

Пиролитические ячейки, применяемые в Py–GC–MS, позволяют помещать взвешенный образец (как твердый, так и жидкий) в стальной тигель с кварцевым покрытием объемом 80 мкл, который может нагреваться до 1050°C. Современные комплексы Py–GC–MS работают в шести основных режимах: а) анализ в режиме программирования температуры пиролиза (EGA–MS); б) одностадийный пиролиз (Py–GC–MS); в) термодесорбция (TD–GC–MS); г) двухстадийный анализ (TD–GC–MS и Py–GC–MS); д) многоступенчатый анализ с хроматографическим разделением каждой термической зоны (Heart–Cut–GC–MS); е) реакционный пиролиз (R×Py–GC–MS).

Пирохроматограммы различных полимеров имеют индивидуальный профиль, создаются атласы термограмм, пирохроматограмм и масс-спектров продуктов пиролиза полимерных материалов [3]. Так, в справочнике [3] по Py–GC–MS собраны как обычные данные Py–GC–MS, где для фрагментации полимерных материалов используется только тепловая энергия, так и данные реакционного пиролиза R×Py–GC–MS в присутствии органической щелочи для конденсации полимеров. Эта книга включает в себя последние технологические достижения в области аналитических методов пиролиза, особенно полезных для определения характеристик 163 типичных синтетических полимеров. В книге [3] кратко рассматриваются приборы, доступные для продвинутого аналитического пиролиза, и предлагаются рекомендации по эффективному использованию этого метода в сочетании с газовой хроматографией и масс-спектрометрией. Основным содержанием справочника являются подробные пирохроматограммы образцов, термограммы, таблицы для идентификации и репрезентативные масс-спектры типичных пиролизатов для синтетических полимеров. В этом издании освещается также технология термического гидролиза и метилирования, эффективно применяемая к тридцати трем основным поликонденсационным полимерам. Приборы для Py–GC–MS оснащаются базами данных, которые постоянно пополняются; на момент подготовки публикации базы содержали термограммы более 1000 полимеров, более 2800 пирохроматограмм, более 5500 масс-спектров пиролизатов.

Рассмотрим некоторые частные примеры применения Py–GC–MS. Так, в режиме EGA–MS осуществляют быстрый анализ фталатов в поливинилхлориде (ПВХ). Именно ПВХ из всех полимеров наиболее широко применяется в строительстве. В Европе используется в строительстве больше 50% всего производимого ПВХ, в США – больше 60%. Из ПВХ изготов-

ливают инженерно-строительные изделия – трубы, конвейерные ленты, тенты, фитинги, гидроизоляционные мембраны, проволочные ограждения, ограждения безопасности и заборы; защитно-изоляционные материалы – сайдинги; для отделки помещений – краски, лаки, клеи, обои, герметики, фурнитуру, покрытия для полов, потолки, ограждения и лестничные перила; кровельные материалы – изоляционные листы, волнистый листовый материал, гидроизоляционные мембраны, элементы вентиляции, фитинги; двери и окна, уплотнители стекол, подоконники, ролики и жалюзи; электрооборудование – штепсельные вилки, кабели, провода, предохранительные коробки, вспомогательные приспособления.

Количественный анализ присадок в ПВХ реализуют в режиме TD–GC–MS после термодесорбции фталатов. В этом же режиме можно одновременно определять добавки различного строения в синтетических каучуках: 1-октантиола, 1-октадеканола, Irganox 1076, октилдисульфида, 4-винил-1-циклогексена и др. [3]. Качество эпоксидного клея, контроль в нем наличия остаточного количества бисфенола А и его биглицидиловых эфиров, эфиров бисфенола С также реализуемы в режиме TD–GC–MS.

Полиэтиленовые изделия, как и изделия из ПВХ, также широко применяются в строительной сфере. Основные полиэтиленовые изделия, которые используют в строительстве, – это пленка, трубы и полиэтиленовые листы. Наряду с исходным полиэтиленом разных марок разрабатываются и композиты на его основе. В работе [4] исследованы термические и физико-механические свойства композиций полиэтилена с добавками микрокристаллической и нанофибриллярной целлюлозы (МКЦ и НФЦ). На основании результатов проведенного термогравиметрического анализа определены основные температурные характеристики термической и термоокислительной деструкции полученных композиций. С помощью метода Py–GC–MS проведен анализ состава продуктов пиролиза композиционных материалов. Установлено влияние добавок МКЦ и НФЦ на характер массового распределения углеводородных продуктов пиролиза композиционных материалов. В работе [4] также выполнена сравнительная оценка влияния МКЦ и НФЦ в качестве наполнителей на деформационно-прочностные характеристики полиэтиленовых композиций.

Весьма эффективным и информативным методом Py–GC–MS оказался при изучении древесно-композитных материалов [5]. Анализ продуктов пиролиза отходов древесно-волоконистых плит средней плотности (ДВП) и древесно-стружечных плит (ДСП) показал, что древесно-волоконистые плиты средней плотности и древесно-стружечные плиты демонстрируют сходные характеристики пиролиза. Термогравиметрический анализ показал основную потерю веса между 200 и 400°C, продолжающуюся до 600°C. Значения энергии активации (E_a) при каждой конверсии находились в диапазоне 166–372 кДж/моль

для ДВП и 161–325 кДж/моль для ДСП и указывали на независимые реакции стабилизации гемицеллюлозы, целлюлозы, лигнина и образующегося угля. При изотермическом пиролизе образуются пиролизаты гемицеллюлозы при 300°C. Основные продукты пиролиза при температуре 400°C имели аналогичное распределение между ДВП и ДСП. При 600°C количество газовых продуктов увеличивалось за счет второго крекинга пиролизатов.

В публикации [6] приведены данные по составу внешней полимерной части композитных оксидных покрытий на основе политетрафторэтилена (ПТФЭ), полученных на алюминии в одну стадию плазменно-электролитическим оксидированием (ПЭО). Покрытия сформированы в водном силикатном электролите с добавленной дисперсией порошка ПТФЭ в силоксан-акрилатной эмульсии. Установлено, что внешний полимерподобный слой ПТФЭ/ПЭО покрытий не является механической смесью силоксан-акрилатного сополимера и частиц ПТФЭ, а состоит из их фрагментов. Обнаружено частичное замещение во фторуглеродах, входящих в состав покрытий, фтора на водород. Полученные результаты важны для расширения представлений об образовании, строении, составе и свойствах композитных полимерсодержащих оксидных покрытий, формируемых в одну стадию методом плазменно-электролитического оксидирования на поверхности вентильных металлов.

Фторуглеродные эластомеры применяются в случаях, где требуется превосходная термостойкость и химическая стойкость. Чтобы гарантировать, что используется фторэластомер с требуемыми свойствами для конкретного применения, требуются методы определения характеристик, которые позволяют точно идентифицировать эластомер. В статье [7] описана характеристика четырех составов фторэластомеров – диполимера винилиденфторид/гексафторпропена, терполимера винилиденфторид/гексафторпропен/тетрафторэтилена и двух тетраполимеров винилиденфторид/перфтор (метилвиниловый эфир)/тетрафторэтилена. Методы определения характеристик указанных сополимеров включали Py–GC–MS, инфракрасную спектрометрию с Фурье-преобразованием (FT-IR), дифференциальную сканирующую калориметрию (DSC) и термогравиметрический анализ (TGA). Py–GC–MS был единственным методом определения характеристик, который мог однозначно идентифицировать указанные четыре состава. Эффективная идентификация была основана на различиях в продуктах пиролитического разложения составов фторэластомеров.

В работе [8] представлены результаты исследования нескольких материалов на основе полиэфируретанов, полимочевины и полиэфируретаномочевины методом Py–GC–MS. В этой работе были предложены механизмы образования продуктов пиролитического разложения. Полученные данные могут быть использованы для различения между полиэфируретанами,

полимочевинной и полиэфируретаномочевинной, а также между различными по мономерному составу полиэфируретанами, полимочевинной и композитами на их основе. В сочетании с инфракрасной спектроскопией (FT-IR) и методами термического анализа (DSC и термогравиметрия) Py–GC–MS предоставляет достаточную информацию, которая позволяет охарактеризовать и идентифицировать эти полимеры.

Надо отметить, что алифатическая полимочевина имеет высокую устойчивость к воздействию УФ-компоненты солнечного спектра. Благодаря этому качеству она применяется для нанесения на наружные поверхности – кровельное покрытие, фасады, цоколь, придомовые сооружения, требующие гидроизоляции. Кроме того, она максимально устойчива к агрессивной среде, к нефтепродуктам. Ароматическая полимочевина является универсальным материалом, т. е. применяется в самых различных областях строительства – это гидроизоляция полов, стен, потолков, крыш. Привлекает ее ценовая доступность. Модифицированные (гибридные) варианты полимочевины получают путем включения в состав добавок антипиренов, эпоксидных смол, пластификаторов и других низкомолекулярных компонентов, улучшающих эксплуатационные характеристики покрытия. Например, при гидроизоляции деревянных поверхностей в состав включается антипирен, позволяющий защитному покрытию длительное время противостоять воздействию открытого огня. Чтобы сделать гидроизоляцию более эластичной, в полимочевину добавляются пластификаторы, с помощью которых покрытие будет более устойчиво и к динамическим нагрузкам, и к атмосферным воздействиям. Проблема применения полимочевин различного типа – высокая стоимость материалов, поэтому их могут фальсифицировать более дешевыми покрытиями, а значит, нужен контроль, подтверждение аутентичности строительного материала.

Что касается полиуретанов, они также все шире применяются в строительных изделиях. Они отличаются небольшой массой, устойчивостью к внешним воздействиям среды, химически устойчивы, не проводят электричество, эластичны, долговечны, износостойчивы. Полиуретаны можно использовать при критических температурах, в том числе коротко при температуре до 100°C. Материалы из полиуретана используют для создания защитной прослойки при сооружении крыш. Он входит в состав красок, лаков, герметиков, клеящих веществ. Из него изготавливаются формы для производства бетонных, гипсовых, восковых изделий, в том числе небольшого размера, архитектурных, декоративных форм. Пенополиуретан служит сырьем для наполнения, материалом для теплоизолирующих конструкций. Py–GC–MS является важным методом контроля качества полиуретанов.

Даже при анализе неорганических вяжущих [9, 10] показана возможность применения Py–GC–MS для определения химических добавок, вводимых при

помоле цементного клинкера при производстве портландцемента или введенных в смесь цемента, песка и воды при производстве бетона. Этот метод применим для обнаружения гликолей, алканолamines и интенсификаторов помола цемента на основе фенола, а также добавок на основе конденсата формальдегида и нафталинсульфоната для бетонных смесей. Установлено, что эффективность методологии применения Py–GC–MS может быть повышена за счет процесса дериватизации методом *in situ*, что может значительно увеличить извлекаемость добавок, которые обычно термически не десорбируются ни из цемента, ни из бетона. В целом анализ состава цемента и бетона этим методом может быть менее трудоемким и более точным, чем стандартные методы анализа, применяемые в настоящее время в строительном материаловедении.

Еще одну важную проблему из-за широкого применения полимеров в разных областях, в том числе и в строительной индустрии, позволяет решать метод Py–GC–MS. С его помощью можно контролировать как качественно, так и количественно наличие микропластика и нанопластика в окружающей среде [11, 12]. Микропластик – это мелкие (меньше 5 мкм) частицы пластика. Нанопластик – частицы от сотен до нескольких десятков нанометров. Микро- и нанопластик образуются при изготовлении и эксплуатации изделий из различных полимеров, т. е., микропластик и нанопластик – это не особые виды пластмассы, а микро- и наночастицы любого типа пластика. Эти частицы попадают в экосистемы из различных источников, включая промышленные, технологические процессы, бытовые отходы и т. п. Микро- и нанопластик накапливаются в окружающей среде в значительных количествах и представляют серьезную опасность для здоровья людей [13, 14].

В работе [11] показана возможность количественно определять с высокой точностью (относительные стандартные отклонения <10%, хорошая линейность интегрированных площадей, коэффициент детерминации $R^2 > 0,96$) содержание микропластика разных

полимеров в пробе, кроме полиуретана и полиэтилентерефталата. Результаты [11] показывают, что предлагаемые смеси образцов сравнения могут быть использованы в анализе методом Py–GC–MS микропластиков в качестве надежного эталонного материала по меньшей мере для девяти из одиннадцати исследованных полимеров.

В обзоре [12] показана настоятельная необходимость в получении количественных и качественных данных о количестве и типах микропластиков в экологических матрицах, организмах и товарах, а также в проведении пространственных и временных сопоставлений. Это привело к разработке, оптимизации и применению аналитических методов для характеристики микропластиков в водных, наземных или биологических образцах. Инструментальные аналитические методы, основанные на аналитическом пиролизе и термическом анализе с применением Py–GC–MS, обеспечивают качественную и основанную на масс-спектрах количественную информацию. Py–GC–MS имеет высокий потенциал для широкого использования при анализе микро- и нанопластиков.

Заключение

Таким образом, пиролитическая газовая хромато-масс-спектрометрия является перспективным инструментальным методом контроля качества полимеров и композиционных материалов технического и строительного назначения. Пиролитические ячейки не требуют перевода пробы в раствор и позволяют выполнять анализ твердых, нерастворимых и окрашенных материалов. Развитие рассмотренного метода анализа придает мощный импульс в исследовании полимерных материалов и композитов на качественно новом уровне. Актуальной задачей является внедрение пиролитической газовой хромато-масс-спектрометрии в рутинную аналитическую практику; необходима разработка нормативной базы, метрологической аттестации методик выполнения измерений с использованием пиролитической газовой хромато-масс-спектрометрии.

Список литературы

1. Алексеева К.В. Пиролитическая газовая хроматография. М.: Химия, 1985. 256 с.
2. Пыцкий И.С., Кузнецова Е.С., Буряк А.К. Масс-спектрометрия как современный метод анализа полимеров // *Сорбционные и хроматографические процессы*. 2021. Т. 21. № 1. С. 69–76. DOI: 10.17308/sorpchrom.2021.21/3221
3. Tsuge Snin, Ohtani Hajime, Watanabe Chuichi. Pyrolysis-GC/MS Data Book of Synthetic Polymers. Pyrograms, Thermograms and MS of Pyrolyzates. Elsevier. 2011. 390 p.
4. Tae Uk Han, Young-Min Kim, Chuichi Watanabe, Norio Teramae, Young-Kwon Park, Seungdo Kim, Yunhee Lee. Analytical pyrolysis properties of waste medium-density fiberboard and particle board. *Journal*

References

1. Alekseeva K.V. Piroliticheskaya gazovaya hromatografiya [Pyrolytic gas chromatography]. Moscow: Himiya. 1985. 256 p.
2. Pytskiy I.S., Kuznecova E.S., Buryak A.K. Mass spectrometry as a modern method for the analysis of polymer. *Sorbcionnye i hromatograficheskie processy*. 2021. Vol. 21. No. 1, pp. 69–76. (In Russian). DOI: 10.17308/sorpchrom.2021.21/3221
3. Tsuge Snin, Ohtani Hajime, Watanabe Chuichi. Pyrolysis-GC/MS Data Book of Synthetic Polymers. Pyrograms, Thermograms and MS of Pyrolyzates. Elsevier. 2011. 390 p.
4. Tae Uk Han, Young-Min Kim, Chuichi Watanabe, Norio Teramae, Young-Kwon Park, Seungdo Kim, Yunhee Lee. Analytical pyrolysis properties of waste

- of *Industrial and Engineering Chemistry*. 2015. Vol. 32. No. 12, pp. 345–352. DOI: 10.1016/j.jiec.2015.09.008
5. Перова А.Н., Бревнов П.Н, Усачев С.В. и др. Сравнительный анализ термических и физико-механических свойств композиций полиэтилена, содержащих микрокристаллическую и нанофибриллярную целлюлозу // *Химическая физика*. 2021. Т. 40. № 7. С. 49–57. DOI 10.31857/S0207401X21070074
 6. Ваганов-Вилькинс А.А., Руднев В.С., Павлов А.Д., Суховерхов С.В. Состав композитных полимер-оксидных покрытий на алюминии по данным пиролитической хромато-масс-спектрометрии // *Физикохимия поверхности и защита материалов*. 2018. Т. 54. № 3. С. 280–286. DOI: 10.7868/S0044185618030099
 7. Hiltz J.A. Characterization of fluoroelastomers by various analytical techniques including pyrolysis gas chromatography/mass spectrometry. *Journal of analytical and applied pyrolysis*. 2014 Vol. 109. No. 9, pp. 283–295. DOI: 10.1016/j.jaap.2013.06.008
 8. Hiltz J.A. Analytical pyrolysis gas chromatography/mass spectrometry (py-GC/MS) of poly(ether urethane)s, poly(ether urea)s and poly(ether urethane-urea)s. *Journal of analytical and applied pyrolysis*. 2015. Vol. 113. No. 5, pp. 248–258. DOI: 10.1016/j.jaap.2015.01.013.
 9. Чекнаворян А.А. Новые методы пиролитической газовой хромато-масс-спектрометрии для определения химических добавок в портландцементе. Ч. I // *ALITinform: Цемент. Бетон. Сухие смеси*. 2013. Т. 29. № 2. С. 76–83.
 10. Чекнаворян А.А. Новые методы пиролитической газовой хромато-масс-спектрометрии для определения химических добавок в портландцементе. Ч. II // *ALITinform: Цемент. Бетон. Сухие смеси*. 2013. Т. 30. № 3. С. 88–95.
 11. Mai Matsueda, Marco Mattonai, Itsuko Iwai, Atsushi Watanabe, Norio Teramaea, William Robberson, Hajime Ohtani, Young-Min Kim, Chuichi Watanabe Preparation and test of a reference mixture of eleven polymers with deactivated inorganic diluent for microplastics analysis by pyrolysis-GC–MS. *Journal of analytical and applied pyrolysis*. 2021. Vol. 154, No. 3. 104993. DOI: 10.1016/j.jaap.2020.104993
 12. La Nasa J., Biale G., Fabbri D., Modugno F. A review on challenges and developments of analytical pyrolysis and other thermoanalytical techniques for the qualitative determination of microplastics. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 2020. Vol. 149. No. 8. 104841. DOI: 10.1016/j.jaap.2020.104841
 13. Рудаков О.Б., Рудакова Л.В. Микропластик – злободневная проблема загрязнения пищевой продукции // *Переработка молока*. 2020. № 1. С. 32–35. DOI: 10.33465.2222-5455-2020-01-32-34
 14. Рудаков О.Б., Рудакова Л.В. Наночастицы из пластика – актуальный контаминант пищевой продукции // *Мясные технологии*. 2019. № 10. С. 36–39. DOI: 10.33465/2308-2941-2019-10-48-51
 5. Perova A.N., Brevnov P.N, Usachev S.V. Comparative analysis of thermal and physical-mechanical properties of polyethylene compositions containing microcrystalline and nanofibrillar cellulose. *Himicheskaya fizika*. 2021. Vol. 40. No. 7, pp. 49–57. (In Russian). DOI 10.31857/S0207401X21070074
 6. Vaganov-Vil'kins A.A., Rudnev V.S., Pavlov A.D., Suhoverhov S.V. Composition of composite polymer-oxide coatings on aluminum according to pyrolytic chromatography-mass spectrometry data. *Fizikohimiya poverhnosti i zashchita materialov*. 2018. Vol. 54. No. 3, pp. 280–286. (In Russian). DOI: 10.7868/S0044185618030099
 7. Hiltz J.A. Characterization of fluoroelastomers by various analytical techniques including pyrolysis gas chromatography/mass spectrometry. *Journal of analytical and applied pyrolysis*. 2014 Vol. 109. No. 9, pp. 283–295. DOI: 10.1016/j.jaap.2013.06.008
 8. Hiltz J.A. Analytical pyrolysis gas chromatography/mass spectrometry (py-GC/MS) of poly(ether urethane)s, poly(ether urea)s and poly(ether urethane-urea)s. *Journal of analytical and applied pyrolysis*. 2015. Vol. 113. No. 5, pp. 248–258. DOI: 10.1016/j.jaap.2015.01.013.
 9. Cheknavoryan A.A. New methods of pyrolytic gas chromatography-mass spectrometry for the determination of chemical additives in Portland cement (Part I). *ALITinform: Cement. Beton. Suhie smesi*. 2013. Vol. 29. No. 2, pp. 76–83. (In Russian).
 10. Cheknavoryan A.A. New methods of pyrolytic gas chromatography-mass spectrometry for the determination of chemical additives in Portland cement (Part II). *ALITinform: Cement. Beton. Suhie smesi*. 2013. Vol. 30. No. 3, pp. 88–95(In Russian).
 11. Mai Matsueda, Marco Mattonai, Itsuko Iwai, Atsushi Watanabe, Norio Teramaea, William Robberson, Hajime Ohtani, Young-Min Kim, Chuichi Watanabe. Preparation and test of a reference mixture of eleven polymers with deactivated inorganic diluent for microplastics analysis by pyrolysis-GC–MS. *Journal of analytical and applied pyrolysis*. 2021. Vol. 154, No. 3. 104993. DOI: 10.1016/j.jaap.2020.104993
 12. La Nasa J., Biale G., Fabbri D., Modugno F. A review on challenges and developments of analytical pyrolysis and other thermoanalytical techniques for the qualitative determination of microplastics. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 2020. Vol. 149. No. 8. 104841. DOI: 10.1016/j.jaap.2020.104841
 13. Rudakov O.B., Rudakova L.V. Microplastics are a hot topic of food contamination. *Pererabotka molo-ka*. 2020. No. 1, pp. 32–35. (In Russian). DOI: 10.33465.2222-5455-2020-01-32-34
 14. Rudakov O.B., Rudakova L.V. Plastic nanoparticles are a topical food contaminant. *Myasnye tekhnologii*. 2019. No. 10, pp. 36–39. (In Russian). DOI: 10.33465/2308-2941-2019-10-48-51

Т.А. МУХАМЕДИЕВ, д-р техн. наук (takhir50@rambler.ru),

С.А. ЗЕНИН, канд. техн. наук (lab01@mail.ru)

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

О расчете прочности наклонных сечений железобетонных элементов с различной формой поперечного сечения

Действующий СП 63.13330.2018 содержит методики расчета прочности по наклонным сечениям только для элементов с прямоугольной формой поперечного сечения. В статье рассмотрены вопросы расчета прочности наклонных сечений железобетонных элементов с различной формой их поперечного сечения. Изложен способ учета формы поперечного сечения элементов при их расчете по бетонной полосе между наклонными сечениями, при расчете на действие поперечных сил и на действие изгибающих моментов. Приведены зависимости для расчета элементов с тавровой, двутавровой, круглой, кольцевой и трапецидальной формой поперечного сечения, а также с сечением в форме креста. Представлено сопоставление результатов расчета прочности наклонных сечений элементов, выполненных по различным методикам, а также сопоставление результатов расчета с опытными данными. В целом полученные результаты расчета прочности по наклонным сечениям железобетонных элементов с различной формой поперечного сечения согласуются с опытными данными.

Ключевые слова: железобетонные конструкции, прочность, наклонное сечение, методы расчета, форма поперечного сечения.

Для цитирования: Мухамедиев Т.А., Зенин С.А. О расчете прочности наклонных сечений железобетонных элементов с различной формой поперечного сечения // *Строительные материалы*. 2022. № 8. С. 70–74.

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-805-8-70-74>

T.A. MUKHAMEDIEV, Doctor of Sciences (Engineering), (takhir50@rambler.ru), S.A. ZENIN, Candidate of Sciences (Engineering) (lab01@mail.ru) Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete (NIIZB) named after A.A. Gvozdev, JSC "Research Center of Construction" (6, bldg. 5, 2nd Institutskaya Street, Moscow, 109428, Russian Federation)

On the Calculation of the Strength of Inclined Sections of Reinforced Concrete Elements with Different Cross-Section Shapes

The current SP 63.13330.2018 contains methods for calculating the strength in inclined sections only for elements with a rectangular cross-section shape. The article considers the issues of calculating the strength of inclined sections of reinforced concrete elements with different shapes of their cross-section. A method for taking into account the shape of the cross-section of elements when calculating them along a concrete strip between inclined sections, when calculating the action of transverse forces and the action of bending moments is described. Dependences are given for calculating elements with a T-bar, I-beam, round, annular and trapezoidal cross-section shape, as well as with a cross-section in the form of a cross. A comparison of the results of calculating the strength of inclined sections of elements made according to different methods, as well as a comparison of the calculation results with experimental data, is presented. In general, the results obtained for calculating the strength of inclined sections of reinforced concrete elements with different cross-sectional shapes are consistent with experimental data.

Keywords: reinforced concrete structures, strength, inclined section, calculation methods, cross-section shape.

For citation: Mukhamediev T.A., Zenin S.A. On the calculation of the strength of inclined sections of reinforced concrete elements with different cross-section shapes. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2022. No. 8, pp. 70–74. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-805-8-70-74>

Согласно требованиям СП 63.13330.2018 «Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 52-01–2003» расчет прочности изгибаемых железобетонных стержневых элементов при действии на них поперечных сил следует производить по нормальным и наклонным сечениям.

Представленные в СП 63.13330.2018 методики расчета прочности по нормальным сечениям охватывают элементы с любой формой поперечного сечения. В то же время указания по расчету прочности по наклонным сечениям ограничены элементами с только прямоугольной формой поперечного сечения. Поэтому при расчете прочности по наклонным сечениям конструкций с формой поперечного сечения, отличной от прямоугольной, пользователи СП 63.13330.2018 вынуждены прибегать к определенным упрощениям. Как правило, это приводит к

недооценке прочности наклонного сечения, а в отдельных случаях и к снижению надежности принимаемых конструктивных решений.

В статье предлагается методика расчета прочности наклонных сечений элементов с учетом формы их поперечного сечения. Методика разработана на основе анализа результатов испытаний образцов с различной формой поперечного сечения, выполненных отечественными и зарубежными исследователями. Среди опытных образцов рассмотрены образцы с круглой формой сечения [1], кольцевой формой сечения [2], таврового сечения с полкой в растянутой и сжатой зоне [3, 4 и 5], а также опытных образцов с квадратной формой поперечного сечения, испытанных на кривой изгиб под различными углами [6].

Согласно СП 63.13330.2018 [1] при действии поперечных сил должны быть обеспечены прочность элемента по полосе между наклонными сечениями,

прочность по наклонному сечению на действие поперечных сил и прочность по наклонному сечению на действие момента.

В СП 63.13330.2018 [1] применяется отдельный расчет наклонных сечений на действие поперечных сил и моментов. Предлагаемая методика расчета железобетонных элементов по прочности наклонных сечений при действии поперечных сил с учетом формы поперечного сечения также исходит из отдельного расчета наклонных сечений на действие поперечных сил и моментов.

Расчет изгибаемых железобетонных элементов с различной формой поперечного сечения по бетонной полосе между наклонными сечениями предлагается производить из условия:

$$Q \leq 0,3 \cdot R_b \cdot A_0, \quad (1)$$

где R_b – расчетное сопротивление бетона осевому сжатию; A_0 – площадь поперечного сечения элемента, вычисляемая без учета площади сечения защитного слоя бетона, а для элементов таврового и двутаврового сечения – с ограничениями расчетной ширины полок.

Формула для вычисления площади поперечного сечения A_0 зависит от формы сечения элемента. Например, для элементов с формами поперечного сечения, показанными на рис. 1, она имеет вид:

– для элементов таврового сечения:

$$A_0 = b \cdot h_0 + (b_f' - b) \cdot h_f'; \quad (b_f' - b) \leq 3 \cdot h_f'; \quad (2)$$

– для элементов двутаврового сечения:

$$A_0 = b \cdot h_0 + (b_f' - b) \cdot h_f' + (b_f - b) \cdot (h_f - a); \quad (b_f' - b) \leq 3 \cdot h_f'; \quad (b_f - b) \leq 3 \cdot h_f, \quad (3)$$

где b , b_f и b_f' – ширина ребра растянутой и сжатой полки сечения соответственно; h , h_f и h_f' – высота ребра растянутой и сжатой полки сечения соответственно;

– для элементов круглого сечения радиусом r (рис. 1, а):

$$A_0 = \pi \cdot r_0^2; \quad r_0 = r - a; \quad (4)$$

– для элементов кольцевого сечения радиусом R и внутренним радиусом r (рис. 1, б):

$$A_0 = \pi \cdot (R_0^2 - r^2); \quad R_0 = R - a. \quad (5)$$

– для элементов с сечением в форме креста (рис. 1, с):

$$A_0 = b \cdot h_0 + (b_f - b) \cdot h_f; \quad (6)$$

– для элементов с трапецидальным сечением (рис. 1, d):

$$A_0 = \frac{b' + b_0}{2} \cdot h_0. \quad (7)$$

Для элементов прямоугольной формы сечения $A_0 = b \cdot h_0$ и условие прочности (1) бетонной полосы

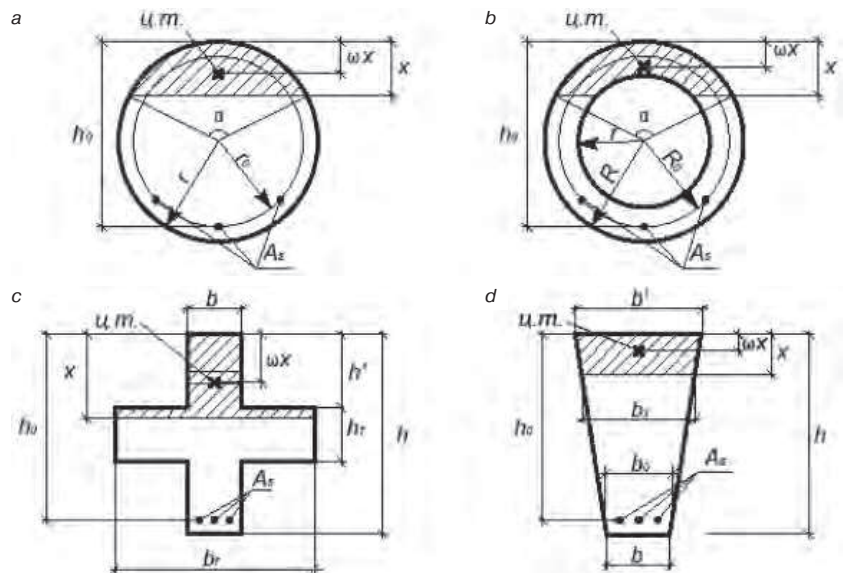


Рис. 1. Определение расчетной площади и высоты сжатой зоны сечения элементов с различной формой поперечного сечения: а – для сечения круглой формы; б – для сечения кольцевой формы; с – для сечения крестообразной формы; d – для сечения трапецидальной формы
Fig. 1. Determination of the calculated area and height of the compressed zone of the section of elements with different cross-sectional shapes

между наклонными сечениями будет совпадать с принятым в СП 63.13330.2018.

Как и в СП 63.13330.2018, принимается, что поперечная сила, воспринимаемая наклонным сечением, складывается из усилия Q_b в бетоне и усилия Q_{sw} в поперечной арматуре по длине наклонной трещины:

$$Q \leq Q_b + Q_{sw}. \quad (8)$$

Поперечная сила, воспринимаемая поперечной арматурой, не зависит от формы поперечного сечения железобетонного элемента. Поэтому указания СП 63.13330.2018 по ее вычислению для элементов с прямоугольной формой сечения справедливы и для элементов с любой другой формой сечения.

Поперечная сила, воспринимаемая бетоном в наклонном сечении, зависит от формы поперечного сечения элемента и наличия продольной арматуры в растянутой зоне сечения. Как и в зарубежных нормативных документах, усилие в бетоне в СП 63.13330.2018 определяют по эмпирической зависимости, при этом наличие продольной арматуры в растянутой зоне сечения не учитывают и рассматривают элементы только прямоугольного сечения.

Для элементов с различной формой поперечного сечения поперечную силу, воспринимаемую бетоном в наклонном сечении, предлагается определять по следующей зависимости, учитывающей и наличие продольной арматуры в растянутой зоне сечения:

$$Q_b = \frac{1,5 \cdot R_{bt} \cdot (A_0 + A_{s,red}) \cdot h_0}{C} \quad (9)$$

и при этом принимать

$$0,5 R_{bt} \cdot (A_0 + A_{s,red}) \leq Q_b \leq 2,5 R_{bt} \cdot (A_0 + A_{s,red}), \quad (10)$$

где

$$h_0 = h - a; \quad (11)$$

R_{bt} – расчетное сопротивление бетона осевому растяжению; A_0 – то же, что и в формуле (1); $A_{s,red}$ – приведенная площадь сечения продольной арматуры в растянутой зоне сечения элемента, которую в расчетах принимают не более $0,5A_0$; C – наиболее опасная длина проекции наклонного сечения на продольную ось элемента, определяемая по указаниям СП 63.13330.2018.

Для круглых и кольцевых сечений в формулу (9) вместо h_0 подставляют $d_0 = 2 \cdot r_0$.

Приведенную площадь сечения продольной арматуры в растянутой зоне сечения элемента можно определить из условия, что перед образованием наклонной трещины напряжения в бетоне растянутой зоны достигают сопротивления растяжению, а соответствующие ему относительные деформации – значений $\varepsilon_{bt2} = 0,00015$:

$$A_{s,red} = A_s \cdot \frac{E_s}{E_{bt,red}} = A_s \cdot \frac{E_s}{R_{bt} / \varepsilon_{bt2}} \leq 0,5A_0. \quad (12)$$

Для элементов прямоугольного сечения зависимости (9) и (10), записанные без учета продольной арматуры в растянутой зоне сечения, совпадают с принятыми в СП 63.13330.2018.

Расчет железобетонных элементов по наклонным сечениям на действие моментов производят из условия:

$$M \leq M_s + M_{sw}, \quad (13)$$

где M – момент в наклонном сечении с длиной проекции C на продольную ось элемента, определяемый от всех внешних сил, расположенных по одну сторону от рассматриваемого наклонного сечения, относительно конца наклонного сечения (точка 0), противоположного концу, у которого располагается проверяемая продольная арматура, испытывающая растяжение от момента в наклонном сечении, при этом учитывают наиболее опасное нагружение в пределах наклонного сечения; M_s – момент, воспринимаемый продольной арматурой, пересекающей наклонное сечение, относительно центра тяжести эпюры напряжений в сжатой зоне сечения (точка 0); M_{sw} – момент, воспринимаемый поперечной арматурой, пересекающей наклонное сечение, относительно центра тяжести эпюры напряжений в сжатой зоне сечения.

Момент M_{sw} , воспринимаемый поперечной арматурой, нормальной к продольной оси элемента, не зависит от формы поперечного сечения, и его определяют по указаниям СП 63.13330.2018.

Момент M_s определяют по формуле:

$$M_s = N_s \cdot z_s, \quad (14)$$

где N_s – усилие в продольной растянутой арматуре, равное $R_s A_s$, а в зоне анкеровки принимается по указаниям п. 10.3.26 СП 63.13330.2018; R_s – расчетное сопротивление арматуры растяжению; z_s – плечо внутренней пары сил.

Значение z_s для элементов с любой формой поперечного сечения принимают равным:

$$z_s = h_0 - \omega \cdot x, \quad (15)$$

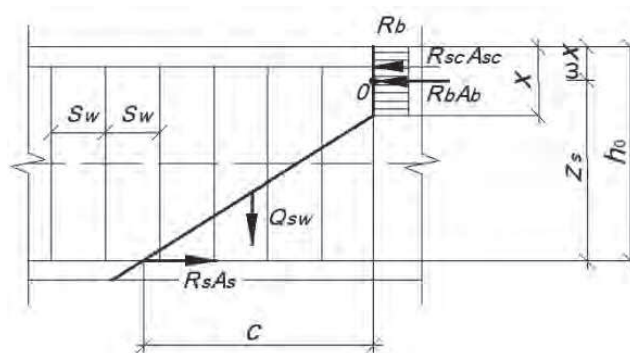


Рис. 2. Схема усилий при расчете железобетонных элементов по наклонному сечению на действие моментов

Fig. 2. Scheme of forces in the calculation of reinforced concrete elements along an inclined section for the action of moments

где $\omega \cdot x$ – расстояние от сжатой грани сечения до равнодействующей эпюры напряжений в сжатой зоне сечения; x – высота сжатой зоны.

Высоту сжатой зоны элементов с различной формой поперечного сечения можно определить по площади сжатой зоны сечения A_b , значение которой устанавливают из уравнения равновесия предельных усилий в сжатом бетоне и в растянутой A_s и сжатой A'_s арматуре (рис. 2):

$$A_b = \frac{N_s - R_{sc} A'_s}{R_b}, \quad (16)$$

где R_{sc} – расчетное сопротивление арматуры сжатию.

Формула для вычисления высоты сжатой зоны зависит от формы сечения элемента. Например, для элементов с формами поперечного сечения, показанными на рис. 1, она имеет вид:

– для элементов круглого сечения (рис. 1, a):

$$x = r \cdot \left(1 - \cos \frac{\alpha}{2}\right), \quad (17)$$

где угол α определяют из зависимости для площади сжатого сегмента высотой x и радиусом r :

$$A_b = 0,5 \cdot r^2 \cdot (\alpha - \sin \alpha); \quad (18)$$

– для элементов кольцевого сечения (рис. 1, b):

$$x = R \cdot \left(1 - \cos \frac{\alpha}{2}\right), \quad (19)$$

где угол α определяют из зависимости от площади сжатого сегмента кольца высотой x , внешним радиусом R и внутренним радиусом r , определяемой как разность площади сегмента круга радиусом R и площади сегмента круга радиусом r :

$$A_b = 0,5 \cdot (R^2 - r^2) \cdot (\alpha - \sin \alpha); \quad (20)$$

– для элементов с сечением в форме креста при $x > h'$ (рис. 1, c):

$$x = \frac{N_s + R_b \cdot h' \cdot (b_f - b) + R_{sc} \cdot A_{sc}}{R_b \cdot b_f}; \quad (21)$$

– для элементов трапециевидального сечения (рис. 1, d):

$$x = \frac{\left(b' - \sqrt{(b')^2 - \frac{2 \cdot (b' - b_0) \cdot A_b}{h_0}}\right) \cdot h_0}{b' - b_0}, \quad (22)$$

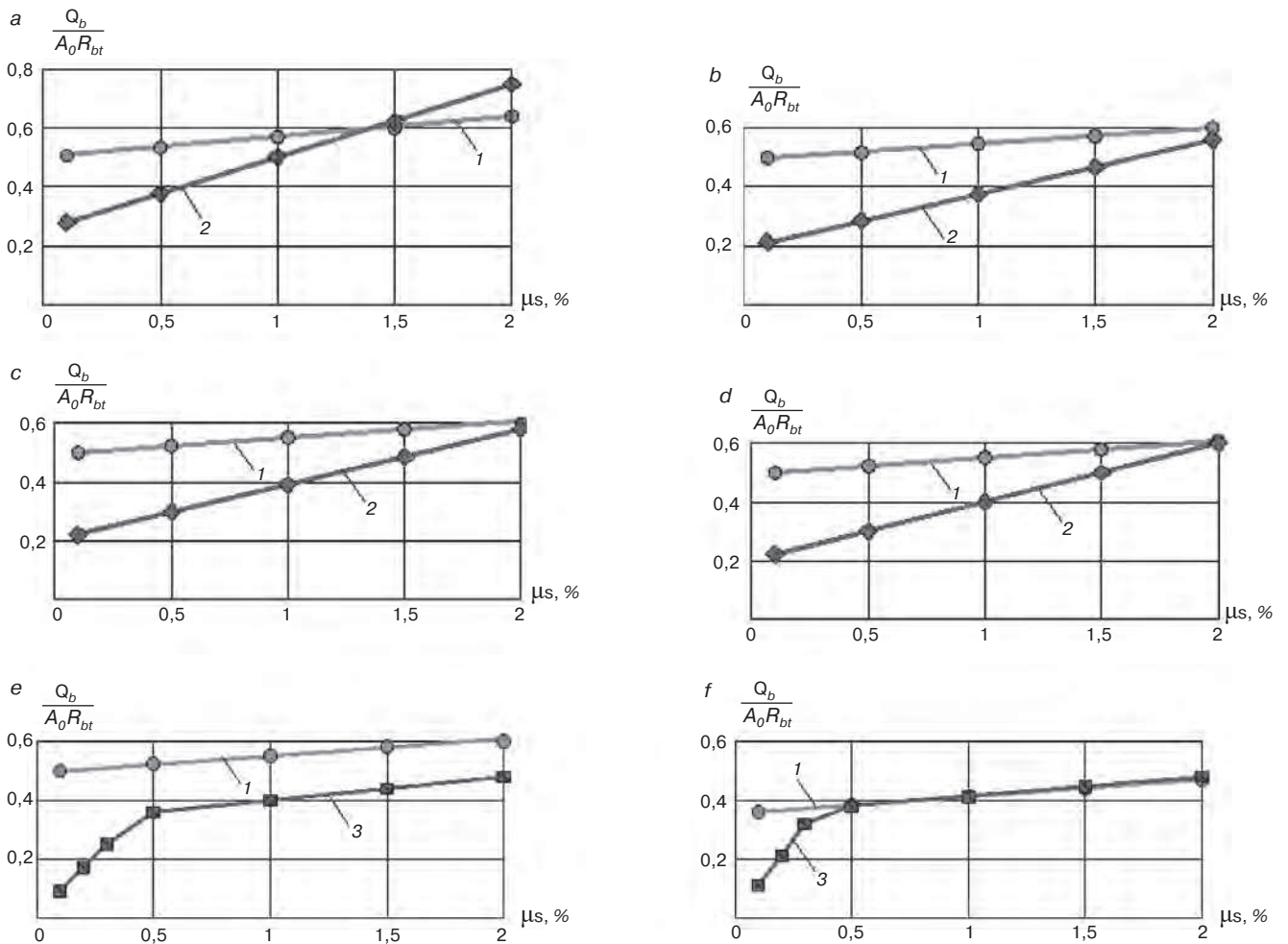
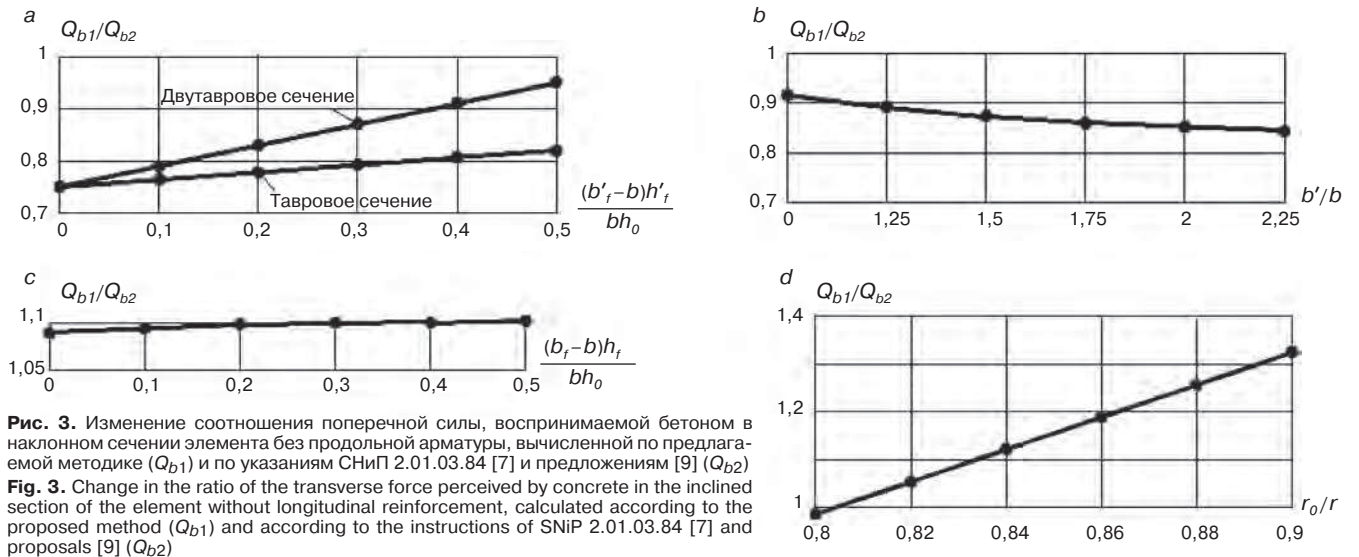


Fig. 4. Change in the values of the transverse force perceived by concrete in an inclined section in the calculation of elements with different cross-sectional shapes with different methods of accounting for longitudinal reinforcement in the tension zone of the section: 1 – according to the proposed methodology; 2 – according to the instructions [8]; 3 – according to the methodology [9]

где b' – ширина сжатой грани сечения; b_0 – ширина трапеции на уровне центра тяжести продольной арматуры, расположенной в растянутой зоне сечения.

Коэффициент ω в формуле (15) определяют из условия, что равнодействующая эпюры напряжений в сжатой зоне приложена в центре тяжести сжатой зоны сечения:

$$\omega = \frac{S_b}{A_b \cdot x}, \quad (23)$$

где S_b – статический момент площади сжатой зоны сечения относительно наиболее сжатого волокна бетона; A_b – площадь сжатой зоны сечения.

Для элементов прямоугольного сечения зависимости для вычисления момента M_s , записанные без учета продольной арматуры в растянутой зоне сечения, полностью совпадают с представленными в СП 63.13330.2018.

Для оценки предложенных зависимостей для расчета поперечной силы, воспринимаемой бетоном в наклонном сечении железобетонного элемента с отличной от прямоугольной формой поперечного сечения, выполнили сопоставление результатов расчета по различным методикам. Для этого использовали методику расчета:

- принятую в СНиП 2.03.01–84 [7] – для расчета элементов с тавровой и двутавровой формой сечения без продольной арматуры в растянутой зоне сечения;
- принятую в EN 1992-1-1 [8] – для расчета элементов с прямоугольной, тавровой и трапециевидной формой сечения, имеющих продольную арматуру в растянутой зоне сечения;
- изложенную в работе [9] – для расчета элементов с трапециевидной, крестообразной и круглой формой сечения с продольной арматурой в растянутой зоне сечения и без нее.

На рис. 3 для иллюстрации представлено сравнение результатов расчета поперечной силы, воспринимаемой бетоном в наклонном сечении элементов без продольной арматуры в растянутой зоне, полученных по предложенной методике, с результатами расчета, выполненными:

- по указаниям СНиП 2.01.03.84 [7] – для элементов таврового и двутаврового (рис. 3, а) сечения с различной площадью сечения свесов полки;
- по методике [9] – для элементов трапециевидной (рис. 3, б), крестовой (рис. 3, с) и круглой (рис. 3, д) формы сечения с различным соотношением размеров оснований трапеции, площадью свесов полки креста и толщиной защитного слоя бетона круга.

В целом результаты расчета элементов без продольной арматуры в растянутой зоне сечения, полученные по разным методикам, близки между собой, за исключением элементов круглого сечения, для которых с уменьшением толщины защитного слоя бетона расхождение становится существенным.

На рис. 4 представлено сравнение результатов расчета поперечной силы, воспринимаемой бетоном в наклонном сечении элементов, полученных с использованием предложенной методики учета продольной арматуры в растянутой зоне сечения, с результатами расчета, выполненными:

- по указаниям EN 1992-1-1:2004 [8] – для элементов прямоугольного (рис. 4, а), таврового (рис. 4, б), двутаврового (рис. 4, с) и трапециевидного сечения (рис. 4, д);
- по методике [9] – для элементов крестовой (рис. 4, е) и круглой (рис. 4, ф) формы сечения.

Как видно из рис. 4, при учете по различным методикам продольной арматуры в растянутой зоне результаты расчета поперечной силы, воспринимаемой бетоном в наклонном сечении, различаются. С уменьшением продольного армирования это различие повышается.

В целом полученные результаты расчета прочности по наклонным сечениям железобетонных элементов с различной формой поперечного сечения по предложенной и по другим методикам близки между собой.

Список литературы / References

1. Uffe G. Jensen, Linh C. Hoang, Henrik B. Joergensen, Lars S. Fabrin. Shear strength of heavily reinforced concrete members with circular cross section. *Engineering Structures*. 2010. 32, pp. 617–626.
2. Шиванов В.Н., Ягодин В.К. Определение поперечной силы в изгибаемых железобетонных элементах кольцевого сечения // *Бетон и железобетон*. 1968. № 1. С. 37–38.
2. Shivanov V.N., Yagodin V.K. Determination of the transverse force in the bent reinforced concrete elements of the annular section. *Beton i Zhelezobeton [Concrete and Reinforced Concrete]*. 1968. No. 1, pp. 37–38. (In Russian).
3. Изотов Ю.Л. Прочность железобетонных балок. Киев: Будівельник. 1978. 160 с.
3. Izotov Yu.L. Prochnost ghelezobetonnyh balok [Strength of reinforced concrete beams]. Kiev: Budivelnik, 1978. 160 p.
4. Сврдлов Б.М. Совершенствование методов расчета прочности ригелей каркасных зданий: Дис. ... канд. техн. наук. Москва, 1989. 149 с.
4. Sverdlov B.M. Improvement of methods for calculating the strength of crossbars of frame buildings. Dis... Candidate of Sciences. Moscow. 1989. 149 p. (In Russian).
5. Rendy Thamrin et al. Shear Strength of Reinforced Concrete T-beams without Stirrups. *Journal of Engineering Science and Technology*. 2016. Vol. 11, No. 4, pp. 548–562.
6. Rendy Thamrin et al. Shear Capacity of Reinforced Concrete Beams with Square Cross Section Subjected to Biaxial Bending. *2020 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 713 012029
7. СНиП 2.03.01–84* «Бетонные и железобетонные конструкции». М., 1985.
7. SNiP 2.03.01–84* “Betonnye I Zhelezobetonnye Konstruktsii”. Moscow. 1985.
8. EN 1992-1-1:2004 Eurocode 2: Design of concrete structures. Part 1-1: General rules and rules for buildings.
9. Крылов С.Б., Травуш В.И., Крылов А.С. Модель прочности наклонных сечений балок произвольной формы // *Вестник НИЦ «Строительство»*. 2020. № 4 (27). С. 46–64.
9. Krylov S.B., Travush V.I., Krylov A.S. Strength model of inclined sections of beams of arbitrary shape. *Vestnik NITS “Stroitelstvo”*. 2020. No. 4 (27), pp. 46–64.

РМЗ НИХАРД-СЕРВИС

| Антифрикционные сплавы
| Износостойкие детали
| Литье с мехобработкой



РМЗ «Нихард-сервис»
456208, Челябинская область,
г. Златоуст, ул. Садовая, 10Б



+7(351)-399-66-72
+7(351)-777-62-09



rmz.zlatoust@yandex.ru



www.nihard.anosov74.ru

МЕЖДУНАРОДНЫЙ СТРОИТЕЛЬНЫЙ ФОРУМ «АРКТИКА»

5-7
ОКТАБРЯ
2022

МОСКВА
ОТЕЛЬ MARRIOTT
IMPERIAL PLAZA



12+

Организатор форума



INTERNATIONAL
ASSOCIATION OF
FOUNDATION
CONTRACTORS

10 ЛЕТ 2022

МЕЖДУНАРОДНАЯ АССОЦИАЦИЯ
ФУНДАМЕНТОСТРОИТЕЛЕЙ

Официальная поддержка



НИЦ строительство
научно-исследовательский центр



АО ЦНИИТС



ЦНИИПСК stako
им. Мельникова

Генеральный спонсор форума



Спонсоры форума



PETROMODELING



Институт
экологического
проектирования
и изысканий



Генеральные информационные партнеры



ФУНДАМЕНТЫ
научно-практический журнал для проектировщиков и строителей



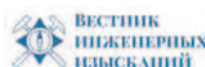
Гидротехника



ГОР-ТИ
журнал о строительстве и транспорте



НАВИГАТОР



ВЕСТНИК
ИНЖЕНЕРНЫХ
ИЗЫСКАНИЙ



Геоинфо

www.fc-union.com

info@fc-union.com, +7 (495) 66-55-014, +7 925 57-57-810