

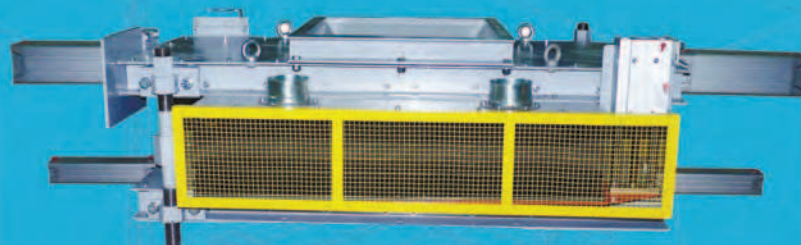
СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ®

№ 5

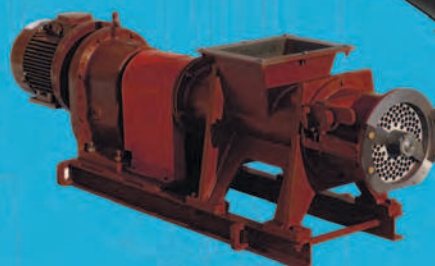


НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ ИЗДАЕТСЯ С 1955 г. WWW.RIFSM.RU WWW.JOURNAL-CM.RU МАЙ 2023 г. (813)

Мы не боимся делать то, что не делает никто



ИНСТИТУТ НОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И АВТОМАТИЗАЦИИ
ПРОМЫШЛЕННОСТИ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ



644113, г. Омск, ул. 1-я Путевая, 100

Тел./факс (3812) 440-471, 440-472

www.inta.ru

Verdés

Leading extrusion to build a better planet.

НЕ ИМЕЮЩИЕ АНАЛОГОВ МОЛОТКОВЫЕ ДРОБИЛКИ

Быстрота и удобство в обслуживании

Наименьшая крупность получаемого материала

Высокая производительность

*Равномерность подачи материала
частотно-регулируемыми шнеками*

Минимальное пылевыведение



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®

№ 5

Основан в 1955 г.

(813) Май 2023 г.

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

Керамические строительные материалы

В.Д. КОТЛЯР, К.М. УЖАХОВ, А.В. КОТЛЯР, Ю.В. ТЕРЁХИНА

Клинкерный кирпич: стандартизация, свойства, применение 4

Т.В. САПЕЛКИНА, Г.И. СТОРОЖЕНКО, Т.Е. ШОЕВА

Композиционные керамические материалы из природных и техногенных пород Республики Тыва 9

А.Ю. СТОЛБОВУШКИН, А.О. ПОРТНОВ, Д.В. АКСТ, Д.А. ЩЕТИНИН, О.А. ФОМИНА, И.В. СПИРИДОНОВА

Объемное окрашивание стеновой керамики добавками попутной продукции производства ферросиликомарганца 14

Новая серия вальцев супертонкого помола TERRA от компании Verdes (Информация) 22

Ю.А. БОЖКО, Д.А. ОВДУН, М.Ю. ПАРТЫШЕВ

Синтетический волластонит – перспективная добавка при производстве лицевого керамического кирпича светлых оттенков 25

В.А. ГУРЬЕВА, А.В. ДОРОШИН

Низкокачественные кирпичные глины и золошлаковые отходы в производстве керамического кирпича 30

Б.А. БОНДАРЕВ, А.Н. КАНИЩЕВ, А.Е. БОРИСОВ

Способы модификации свойств глинистых грунтов с включением органических веществ 35

И.Ф. ШЛЕГЕЛЬ, С.Г. МАКАРОВ, С.С. ШУЛЬГА, С.Н. САПЕЛЬНИКОВ, Л.А. БАГАЕВА

Лопастной экструдер «Лопэкс» как альтернатива шнековым прессам 40

В.В. КУРНОСОВ, В.Р. ТИХОНОВА

Колпаковая печь — универсальный агрегат для обжига керамики 48

П.П. ПАСТУШКОВ, Н.В. ПАВЛЕНКО, С.И. СМИРНОВ

Исследования влияния различных факторов на теплопроводность крупноформатных керамических камней 53

А.И. БЕДОВ, А.И. ГАБИТОВ, Е.В. ДОМАРОВА, А.С. САЛОВ

Напряженно-деформированное состояние сводов из каменной кладки, опирающихся на стальные балки в перекрытиях 58

П.А. БАКУСОВ

Примеры применения функции когерентности в задачах обследования каменных конструкций 66

С.В. ФЕДОСОВ, Э. КЕНЕВЕИ, А.А. ЛАПИДУС

В поиске инновационных материалов для массового строительства малоэтажных зданий в Республике Чад 72

Гипсовые строительные материалы

С.А. ОТМАН АЗМИ, Н.В. ЧЕРНЫШЕВА, М.Ю. ДРЕБЕЗГОВА, Е.В. КОВАЛЕНКО, С.В. МАСАЛИТИНА

Состав и свойства композиционного гипсового вяжущего повышенной водостойкости 81

Н.И. АЛФИМОВА, С.Ю. ПИРИЕВА, К.М. ЛЕВИЦКАЯ

Повышение качественных характеристик прессованных изделий из цитрогипса и вяжущего на его основе 89

Авторы опубликованных материалов несут ответственность за достоверность приведенных сведений, точность данных по цитируемой литературе и за использование в статьях данных, не подлежащих открытой публикации. Редакция может опубликовать статьи в порядке обсуждения, не разделяя точку зрения автора. Перепечатка и воспроизведение статей, рекламных и иллюстративных материалов возможны лишь с письменного разрешения главного редактора. Редакция не несет ответственности за содержание рекламы и объявлений.

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

Monthly scientific-technical and industrial journal
STROITEL'NYE
MATERIALY[®]
 Founded in 1955
№ 5
 (813) May 2023

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

Ceramic building materials

V.D. KOTLYAR, K.M. UZHAKHOV, A.V. KOTLYAR, Yu.V. TEREKHINA	
Clinker Brick: Standardization, Properties, Application	4
T.V. SAPELKINA, G.I. STOROZHENKO, T.E. SHOEVA	
Composite Ceramic Materials from Natural and Technogenic Rocks of the Republic of Tyva	9
A.Yu. STOLBOUSHKIN, A.O. PORTNOV, D.V. AKST, D.A. SHCHETININ, O.A. FOMINA, I.V. SPIRIDONOVA	
Volume Coloring of Wall Ceramics with Additives of Associated Products from Ferrosilicomanganese Production	14
The New TERRA Superfine Grinding Roller Series From Verdes (Information)	22
Yu.A. BOZHKO, D.A. OVDUN, M.Yu. PARTYSHEV	
Synthetic Wollastonite is a Promising Additive in the Production of Light-Colored Facing Ceramic Bricks	25
V.A. GURYEVA, A.V. DOROSHIN	
Low-Quality Brick Clays and Ash and Slag Waste in the Production of Ceramic Bricks	30
B.A. BONDAREV, A.N. KANISHCHEV, A.E. BORISOV	
Methods for Modifying the Properties of Clay Soils with the Inclusion of Organic Substances	35
I.F. SHLEGEL, S.G. MAKAROV, S.S. SHUL'GA, S.N. SAPEL'NIKOV, L.A. BAGAEVA	
Vane Extruder "Lopex" as an Alternative to Screw Presses	40
V.V. KURNOSOV, V.R. TIHONOVA	
Hood Furnace — Universal Unit for Burning Ceramics	48
P.P. PASTUSHKOV, N.V. PAVLENKO, S.I. SMIRNOV	
Research of the Influence of Various Factors on the Thermal Conductivity of Large-Format Vertically Perforated Clay Blocks	53
A.I. BEDOV, A.I. GABITOV, E.V. DOMAROVA, A.S. SALOV	
Stress-Strain State of Masonry Vaults Supported by Steel Beams in Ceilings	58
P.A. BAKUSOV	
Examples of the Application of the Coherence Function in the Tasks of Inspection of Stone Structures	66
S.V. FEDOSOV, E. KENEWEI, A.A. LAPIDUS	
In Search of Innovative Materials for Mass Construction of Low-Rise Buildings in the Republic of Chad	72

Gypsum building materials

S.A. OTHMAN AZMI, N.V. CHERNYSHEVA, M.Yu. DREBEZGOVA, E.V. KOVALENKO, S.V. MASALITINA	
Composition and Properties of Composite Gypsum Binder with Increased Water Resistance	81
N.I. ALFIMOVA, S.Yu. PIRIEVA, K.M. LEVICKAYA	
Improvement in Qualitative Characteristics of Pressed Products from Citrogypsum and Based Binder	89

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

Главный редактор:

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

Председатель редакционного совета:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

НЕДОСЕКО И.В.,
д-р техн. наук (Уфа)

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

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

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

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)

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), ООО «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)

В.Д. КОТЛЯР¹, д-р техн. наук, профессор (diatomit_kvd@mail.ru);
К.М. УЖАХОВ², канд. техн. наук, профессор (karhan60@mail.ru);
А.В. КОТЛЯР¹, канд. техн. наук, доцент (toss871@yandex.ru),
Ю.В. ТЕРЕХИНА¹, инженер, ст. преподаватель (yuliya-2209@mail.ru)

¹ Донской государственный технический университет (344003, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1)

² Ингушский государственный университет (386001, Республика Ингушетия, г. Магас, пр. И.Б. Зязикова, 7)

Клинкерный кирпич: стандартизация, свойства, применение

Рассмотрены вопросы стандартизации свойств клинкерных изделий – дорожного и стенового кирпича. Отражены основные положения государственных стандартов в части технических характеристик клинкерного кирпича и обозначены пробелы в части применения клинкерного кирпича в строительных правилах. Отмечен европейский подход к нормированию свойств изделий для кладки через параметр средней плотности и установление зависимостей технических характеристик и групп свойств. Приведена классификация керамических изделий в смежных отраслях через параметр водопоглощения: санитарно-технические изделия и керамическая плитка (тонкая керамика). Показаны данные анализа рынка кладочных растворов для клинкерных изделий, состав которых зависит от назначения и вида изделия, его водопоглощения и способа кладки. Предложено ввести термин «клинкерная керамика» для спеченного керамического камня с водопоглощением менее 6%. Клинкерную керамику разделить на три группы: с низким водопоглощением менее 0,5%; со средним водопоглощением 0,5–3%; с высоким водопоглощением 3–6%. Изделия на основе клинкерной керамики могут иметь различную форму, размеры и пустотность и выполнены в виде кирпича, камня, блока, плитки и т. д. Отмечено, что для успешного развития и внедрения клинкерных изделий в массовое строительство необходимо накопление и анализ данных по свойствам клинкерных изделий, а также конструкций на их основе и отражение полученных данных в нормативно-технической базе.

Ключевые слова: стандартизация, клинкер, керамика, кирпич, средняя плотность, водопоглощение, прочность, долговечность, свойства, применение.

Для цитирования: Котляр В.Д., Ужахов К.М., Котляр А.В., Терехина Ю.В. Клинкерный кирпич: стандартизация, свойства, применение // *Строительные материалы*. 2023. № 5. С. 4–8. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-813-5-4-8>

V.D. KOTLYAR¹, Doctor of Sciences (Engineering), Professor, Head of the Department of Construction Materials (diatomit_kvd@mail.ru);

K.M. UZHAKHOV², Candidate of Sciences (Engineering), Professor (karhan60@mail.ru);

A.V. KOTLYAR¹, Candidate of Sciences (Engineering), Associate professor (toss871@yandex.ru),

Yu.V. TEREKHINA¹, Engineer, Lecturer, (yuliya-2209@mail.ru)

¹ Don State Technical University, (1, Gagarina Square, Rostov-on-Don 344003, Russian Federation)

² Ingush State University, (7, I.B. Zyzikova Avenue, Magas, Republic of Ingushetia, 386001, Russian Federation)

Clinker Brick: Standardization, Properties, Application

The article discusses the issues of standardization of the properties of wedge-core products: road and wall bricks. The main provisions of the state standards in terms of technical characteristics of clinker bricks are reflected and gaps are indicated in terms of the use of clinker bricks in construction rules. A European approach to standardizing the properties of products for masonry was noted as a parameter of average density and establishing dependencies of technical characteristics and property groups. The classifications of ceramic products in related industries are given through the parameter of water drainage: sanitary products and ceramic tiles (thin ceramics). The market analysis data for masonry products for clinker products, the composition of which depends on the purpose and type of products, its water absorption and the masonry method, are shown. It is proposed to introduce the term "clinker ceramics" for sintered ceramic stone with water absorption of less than 6%. Clinker ceramics are divided into 3 groups: with a low water absorption of less than 0.5%; with average water absorption of less than 0.5–3%; with high uptake of less than 3–6%. Products based on clinker ceramic can have different shapes, sizes and emptiness and be made in the form of brick, stone, block, tiles, etc. It was noted that for the successful development and introduction of clinker products into mass construction, it is necessary to accumulate and analyze data on the properties of clinker products, as well as structures based on them, and reflect the obtained data in the regulatory and technical framework.

Keywords: standardization, clinker, ceramic, brick, average density, water absorption, strength, durability, properties, application.

For citation: Kotlyar V.D., Uzhakhov K.M., Kotlyar A.V., Terekhina Yu.V. Clinker brick: standardization, properties, application. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2023. No. 5. pp. 4–8. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-813-5-4-8>

На рынке современных строительных материалов все больше появляется позиций с обозначением «клинкерный» в названии: стеновой клинкерный кирпич, клинкерный ригель, клинкерная плитка, дорожный клинкерный кирпич (брусчатка), клинкерные ступени, клинкерные бордюры, клинкерные термопанели, клинкерные подоконники и отливы, колпаки для заборов, клинкерная черепица. С уче-

том свойств перечисленных изделий ассоциациями слова «клинкерный» являются высокая прочность и долговечность, что составляет весомое преимущество в дополнение к внешнему виду, и покупатели все активнее используют эти изделия для реализации проектов различной сложности, несмотря на повышенную стоимость в сравнении с изделиями-аналогами.

Таблица 1
Table 1

Перечень свойств и технических характеристик
клинкерного кирпича
List of properties and technical characteristics
of clinker bricks

Наименование НТД	Дата введения	Технические характеристики	Значение
ГОСТ 530–2012 «Кирпич и камни керамические. Общие технические условия»	01.07.2013	Предел прочности при сжатии	От 30 до 100 МПа
		Предел прочности при изгибе	4,4 МПа (полнотелый) 3,4 МПа (пустотелый)
		Водопоглощение	Не более 6%
		Кислотостойкость	Не менее 95%
		Морозостойкость	Не менее 75 циклов
		Средняя плотность	2 (1410–2000); 2,4 (2010–2400) кг/м ³
ГОСТ 32311–2012 «Кирпич керамический клинкерный для мощения. Технические условия»	01.07.2014	Средняя плотность	Не менее 2100 кг/м ³
		Водопоглощение	Не более 2,5%
		Предел прочности при изгибе	Не менее 7,5 МПа
		Морозостойкость	Не менее 200 циклов
		Истираемость	Не более 1,5 г/см ²
Кислотостойкость	Не менее 95%		

Активная работа по организации современного производства клинкерного кирпича началась на территории нашей страны 10–15 лет назад, и тенденции по наращиванию объемов выпуска сохраняются [1–5]. Увеличению объема производства способствуют два фактора: с одной стороны, это свойства клинкера как материала, которые как нельзя лучше подходят для климатических условий России, а с другой – это новые производственные возможности: появились печи, позволяющие вести обжиг в узком интервале, что существенно расширяет сырьевую базу для производства клинкерных изделий. В России сейчас производят клинкерный кирпич стеновой, клинкерный кирпич дорожный (брусчатку), ригельный кирпич и клинкерную плитку, остальные виды изделий – преимущественно зарубежных поставок.

С учетом областей применения и условий эксплуатации клинкерные изделия должны обладать набором физико-механических свойств и отвечать требованиям нормативно-технической документации, как регламентирующей свойства изделий, так и содержащей правила и требования к их применению. Так как больший объем производства занимает именно клинкерный кирпич – стеновой и дорожный, авторами был проведен анализ действующих нормативно-технических документов (ГОСТ, ГОСТ Р, СП) на предмет охвата свойств и областей его применения. В табл. 1 приведены действующие стандарты на клинкерный кирпич и перечень свойств и технических характеристик, требования к которым они предъявляют, – ГОСТ 530–2012 «Кирпич и камень керамические. Общие технические условия» и ГОСТ 32311–2012 «Кирпич керамический клинкерный для мощения. Технические условия». В рамках программы гармонизации

нормативно-технической документации на территории РФ с 01.07.2017 г. был введен в действие ГОСТ Р 57347–2016/EN 771-1:2011 «Кирпич керамический. Технические условия», идентичный (IDT) CEN EN 771-1:2011. Особенностью данного документа является то, что все свойства керамических изделий, используемых для кладки, рассматриваются через классификацию изделий по плотности брутто в сухом состоянии: группа LD (плотность менее или равна 1000 кг/м³), используемые в защищенной кладке; и HD (плотность более 1000 кг/м³), используемые в защищенной кладке; также к группе HD относятся все изделия, используемые в незащищенной кладке, независимо от плотности. В зависимости от группы определяются прочностные характеристики изделий, кладки, звукоизоляционные и теплозащитные свойства, водопоглощение, паропроницаемость и морозостойкость.

Как видно из анализа действующих российских стандартов, зависимость от средней плотности изделий показана только для теплопроводности кладки, однако приведенные данные ограничены плотностью 2000 кг/м³, а полнотелые стеновые клинкерные кирпичи имеют среднюю плотность более 2000 кг/м³. Следовательно, для клинкерных изделий необходимо накопление статистических данных по взаимосвязи и регламентации свойств как самих изделий, так и свойств кладки из них, таких как: теплопроводность, паропроницаемость, расчетное сопротивление сжатию. Привязка свойств через среднюю плотность изделий в материаловедении достаточно распространена, и зависимости работают во многих материалах, при этом анализ нормативно-технической документации и научно-технической литературы по технологии керамики показал, что свойства керамических материалов также классифицируют через показатель водопоглощения, связанный с плотностью и структурными особенностями [6–10].

В ранних источниках указывается, что определяющим свойством для отнесения изделий к клинкерным было водопоглощение материала, из которого изделия выполнены. В СССР клинкерные изделия рассматривались прежде всего как дорожные, и первый нормативный документ, принятый на клинкерные изделия в 1932 г., – ОСТ 4245 «Общесоюзный стандарт на клинкер дорожный» – говорит о клинкере как о материале, так и о дорожном изделии с водопоглощением менее 6%, так как само изделие является полнотелым. При этом данный нормативный документ четко подразделяет дорожный клинкер на три сорта: с водопоглощением менее 2%, с водопоглощением 2–4% и 4–6%. Временное сопротивление сжатию по данному нормативному документу для изделий с водопоглощением менее 2% должно быть не менее 100 МПа, для изделий с водопоглощением 2–4% не менее 70 МПа, с водопоглощением 4–6% не менее 40 МПа.

А.И. Августиник в книге «Керамика» 1975 г., в разделе «Изделия с водопоглощением черепка ме-

нее 7%» пишет: «Свойства клинкера характеризуются следующими показателями: предел прочности при сжатии 640–1400 кгс/см², водопоглощение 0,9–5,5%...» – и далее в этом же предложении: «...для строительного клинкера прочность при сжатии – не менее 350 кгс/см²» [11].

В смежных керамических отраслях водопоглощение также является главным показателем при классификации и назначении технических требований к изделиям. Например, ГОСТ 15167–93 «Изделия санитарные керамические. Общие технические условия» классифицирует материал, из которого выполнены санитарно-технические изделия, на три группы по требованиям к водопоглощению:

- фарфор – с водопоглощением не более 1%;
- полуфарфор – с водопоглощением не более 5%;
- фаянс – с водопоглощением не более 12%.

При этом стоит учесть, что подавляющая часть санитарно-технических изделий производится именно из фарфора, так как именно фарфор гарантированно обеспечивает высокие эксплуатационные свойства изделий, а составы сырьевых масс для его получения могут быть совершенно различными.

Производители керамической плитки также детально подошли к классификации по водопоглощению материала, из которого выполнена плитка. Согласно ГОСТ 13996–2019 «Плитки керамические. Общие технические условия» керамические плитки подразделяют на группы и подгруппы с водопоглощением: менее 0,5%; 0,5–3%; 3–6%; 6–10% и более 10%. К водопоглощению привязаны другие свойства изделий, а, учитывая, что плитка – это полнотелое тонкостенное изделие, собственно свойства изделий и керамики как материала одни и те же. К примеру, предел прочности при изгибе в зависимости от вида (толщины плитки) и назначения плитки с водопоглощением менее 0,5% должен быть не менее 28–35 МПа, для плитки с водопоглощением 0,5–3% – 23–30 МПа; для плитки с водопоглощением 3–6% – 13–20 МПа; для плитки с водопоглощением более 10% – 8–15 МПа.

Проводя в аккредитованной лаборатории испытания клинкерного кирпича – как стенового, так и дорожного, авторы установили четкие зависимости и отличия физико-механических свойств от водопоглощения изделий. Для кирпича с водопоглощением 5,5 и 0,5%, соответствующего требованиям ГОСТ 530–2012, остальные свойства будут сильно отличаться: чем ниже водопоглощение керамики, тем меньше пористость, тем больше прочность, теплопроводность и морозостойкость.

Анализируя рынок строительных растворов для кладки керамического кирпича, в частности клинкерного, можно отметить, что производители кладочных смесей также используют водопоглощение изделий как определяющий маркер для назначения и использования кладочного раствора и предлагают кладочные смеси, например для изделий с водопоглощением 2–5%, 3–8%, более 10%.

Таблица 2
Table 2

Свойства клинкера в зависимости от водопоглощения
Properties of clinker depending on water absorption

Свойства	Вид (водопоглощение, мас. %), показатели свойств		
	менее 0,5	0,5–3	3–6
Плотность, кг/м ³	2300–2400	2150–2300	1950–2150
Предел прочности при сжатии, МПа	>150	80–150	<80
Предел прочности при изгибе, МПа	>35	25–35	<25
Теплопроводность, Вт/(м·°С)	0,8–0,9	0,7–0,8	0,5–0,7
Паропроницаемость, Мг/(м·ч·Па)	0,01–0,03	0,03–0,05	0,05–0,07
Коэффициент Пуассона μ	0,18–0,2	0,18–0,16	0,16–0,14
Модуль упругости, ГПа, Е	50–70	40–50	20–40

По мнению авторов, в российской нормативно-технической документации назрела необходимость введения классификации клинкера как материала для производства стеновой керамики с указанием свойств самого материала, видов изделий, получаемых из данного материала, свойств изделий, связанных с материалом (прочность, водопоглощение, паропроницаемость, химическая стойкость, теплопроводность и т. д.), а также внедрения данной классификации в проектные решения, нормы и правила. Для решения такой многогранной задачи необходим большой объем статистических данных и результаты практического применения клинкерного кирпича. Первым шагом для решения данной задачи является классификация клинкера как материала и приведение применяемой терминологии к единообразию.

Учитывая опыт предыдущих поколений и смежных отраслей, для обсуждения вносятся следующие предложения:

1. Керамику, как материал, в промышленности стеновых материалов, с водопоглощением менее 6% считать клинкерной и соответственно называть – клинкер или клинкерная керамика.

2. Клинкерную керамику разделить на три группы:
- с низким водопоглощением менее 0,5%;
 - со средним водопоглощением менее 0,5–3%;
 - с высоким водопоглощением менее 3–6%.

Характеризоваться данные группы могут как клинкер с низким, средним и высоким водопоглощением с соответствующими названиями: Н-клинкер; С-клинкер и В-клинкер.

3. Стеновые изделия из клинкерной керамики могут иметь различную форму, размеры и пустотность и выполнены в виде кирпича, блока, плитки и т. д.

Справочные данные и проведенные расчеты, результаты наших и других исследователей позволили каждую из групп клинкерной керамики охарактеризовать по показателям свойств, которые будут уточняться по мере накопления данных и на основании

которых можно принимать новые решения в строительстве (табл. 2) [12–15].

Четкая классификация изделий, статистический банк их свойств и кладок на их основе, свойства материалов для устройства кладок (кладочные растворы) позволят, в свою очередь, расширить области использования и требования к применению клинкерного кирпича на законодательном уровне и актуализировать строительные правила с включением в них клинкерных изделий.

В настоящее время в СП 70.13330.2012 «Свод правил. Несущие и ограждающие конструкции» в разделе 9 нет даже упоминания о клинкерном кирпиче, в СП 15.13330.2020 «Каменные и армокаменные конструкции» в разделе 5 «Материалы» просто указывается: «М250, М300, М400, М500, М600, М800 и М1000 – кирпич и камни высокой прочности, в том числе клинкерные, природные и бетонные», в СП 345.1325800.2017 «Здания жилые и общественные. Правила проектирования тепловой защиты» приводятся данные только о кирпиче глиняном обыкновенном, в СП 327.1325800.2017 «Стены наружные с лицевым кирпичным слоем. Правила проектирования, эксплуатации и ремонта» о клинкерном кирпиче упоминается только в п. 13.8: «Проектирование трехслойных стен с гибкими связями следует выполнять с учетом следующих требований. Для лицевого слоя толщиной до 120 мм включительно следует преимущественно применять клинкерный или полнотельный кирпич (в том числе пустотностью до 13%), а также пустотелый кирпич с несквозными пустотами. Допускается расшивка швов с заглублением до 1 см при применении в лицевом слое клинкерного или полнотелого кирпича (в том числе пустотностью до 13%), а также пустотелого кирпича с несквозными пустотами и пустотелого с вертикальными пустотами с толщиной наружной стенки не менее 20 мм».

ГОСТ 530–2012 «Кирпич и камень керамические. Общие технические условия» по поводу применения клинкерного кирпича дает общие направления использования, что для такого нормативного документа закономерно: «п. 3.8: кирпич клинкерный: Изделие, имеющее высокую прочность и низкое водопоглощение, обеспечивающее эксплуатационные характеристики кладки в сильно агрессивной среде и выполняющее функции декоративного материала»;

«п. 9.3: клинкерный кирпич применяют преимущественно для кладки и облицовки в сильно агрессивной среде. В соответствии с требованиями нормативных документов по проектированию, клинкерный кирпич может применяться в фундаментах и цоколях стен зданий, подвалах, для возведения подпорных стен, колонн, парапетов, для наружных стен помещений с влажным режимом, для использования в системе канализации, дымовых трубах, вентиляционных каналах и т. п.».

В текущем состоянии нормативно-технической базы производители керамического и клинкерного кирпича вынуждены самостоятельно решать вопросы по регламентированию свойств изделий и предложению решений по устройству кладок. Как итог, на изделия разрабатываются технические условия, наблюдается тесное сотрудничество производителей кирпича и производителей кладочных смесей – под конкретный кирпич – конкретная кладочная смесь, совместно с архитекторами и проектировщиками создаются каталоги типовых кладок как лицевого кирпича, так и пирога стены в целом. Тратятся средства на получение данных не только о качестве кирпича, но и о свойствах кладок из него, при этом обмен данными между производителями минимальный; в основном информационный обмен происходит в рамках симпозиумов, научных семинаров, международных конференций. В рамках программ по повышению продаж заводами и ведущими торговыми площадками проводятся семинары и обучение дилеров, проектировщиков, архитекторов, каменщиков. Для частных потребителей проводятся презентации, разрабатываются каталоги, активно принимается участие в выставках и форумах для продвижения продукции. Данные мероприятия позволяют не только оценить внешний вид изделий, но и узнать их технические характеристики, особенности кладки и процесса эксплуатации.

Накопление и анализ технических свойств российского клинкерного кирпича, актуальная и гармонизированная нормативно-техническая база, регламентирующая свойства клинкерной керамики, требования к ее применению и расчету параметров конструкций и сооружений на ее основе позволят клинкерной керамике занять свою достойную нишу в строительных материалах настоящего и будущего.

Список литературы

1. Езерский В.А. Клинкер. Технология и свойства // *Строительные материалы*. 2011. № 4. С. 79–81.
2. Котляр В.Д., Терехина Ю.В., Котляр А.В. Особенности свойств, применение и требования к клинкерному кирпичу // *Строительные материалы*. 2015. № 4. С. 72–74. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2015-724-4-72-74>.
3. Корепанова В.Ф. Производство клинкерного кирпича на Никольском кирпичном заводе

References

1. Ezerskii V.A. Clinker. Technology and properties. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2011. No. 4, pp. 79–81. (In Russian).
2. Kotlyar V.D., Terekhina Yu.V., Kotlyar A.V. Features, application and requirements for clinker bricks. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2015. No. 4, pp. 72–74. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2015-724-4-72-74>.

- Группы ЛСР // *Строительные материалы*. 2014. № 4. С. 10–13.
4. Саенко Э.Г., Корепанова В.Ф., Гринфельд Г.И. Возможности фасадного клинкерного кирпича марки «ЛСР» в замещении импорта // *Строительные материалы*. 2016. № 4. С. 60–63.
 5. 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>
 6. Котляр А.В. Технологические свойства аргиллитоподобных глин при производстве клинкерного кирпича // *Вестник ТГАСУ*. 2016. № 2 (55). С. 164–175.
 7. Ужахов К.М., Котляр А.В. Сырьевая база Республики Ингушетия для производства клинкерного кирпича // *Труды III Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Актуальные вопросы современного строительства промышленных регионов России»*. Новокузнецк, СГИУ-АСИ. 2022. С. 225–228.
 8. Кайракбаев А.К., Абдрахимов В.З., Абдрахимова Е.С. Структура пористости и технические свойства клинкерных материалов на основе отходов цветной металлургии восточного Казахстана // *Стекло и керамика*. 2020. № 2. С. 44–50.
 9. Кайракбаев А.К., Абдрахимов В.З., Абдрахимова Е.С. Влияние золы легкой фракции на пористость, морозостойкость и водопоглощение фасадных плиток // *Уголь*. 2020. № 12 (1137). С. 44–48.
 10. Хоменко Е.С., Пурдик А. В. Особенности формирования микроструктуры клинкерной керамики // *Стекло и керамика*. 2017. № 2. С. 15–19.
 11. Августиник А.И. Керамика. Л.: Стройиздат, 1975. 592 с.
 12. Subashi De Silva G.H.M.J., Mallwattha M.P.D.P Strength, durability, thermal and run-off properties of fired clay roof tiles incorporated with ceramic sludge // *Construction and Building Materials*. 2018. Vol. 179, pp. 390–399. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.187>
 13. Ходаковська Т.В., Огородник І.В., Дмитренко Н.Д. Керамічний клінкер для облицювання фасадів і брукування доріг з використанням польвошпатівмісної сировини // *Будівельні матеріали, виробі та санітарна техніка*. 2006. Вип. 22. С. 60–67.
 14. Коледа В.В., Михайлюта Е.С., Алексеев Е.В., Цыбулько Э.С. Технологические особенности производства клинкерного кирпича // *Стекло и керамика*. 2009. № 4. С. 17–20.
 15. Федосов С.В., Малбиев С.А. Нормирование возведения подземных конструкций зданий и сооружений из каменных материалов // *Строительные материалы*. 2018. № 4. С. 41–45. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2018-758-4-41-45>
 3. Korepanova V.F. Production of clinker bricks at the Nikolsky Brick Plant of LSR Group. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2014. No. 4, pp. 10–13. (In Russian).
 4. Saenko E.G., Korepanova V.F., Grinfel'd G.I. LSR facade clinker brick capabilities in import substitution. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2016. No. 4, pp. 60–63. (In Russian).
 5. 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>
 6. Kotlyar A.V. Technological properties of argillite-like clays in the production of clinker bricks. *Vestnik TGASU*. 2016. No. 2 (55), pp. 164–175. (In Russian).
 7. Uzhakhov K.M., Kotlyar A.V. Raw material base of the Republic of Ingushetia for the production of clinker bricks. *Proceedings of the III All-Russian Scientific and Practical Conference with international participation "Actual issues of modern construction of industrial regions of Russia"*. Novokuznetsk, SGIU-ASI. 2022, pp. 225–228. (In Russian).
 8. Kairakbaev A.K., Abdrakhimov V.Z., Abdrakhimova E.S. Porosity structure and technical properties of clinker materials based on non-ferrous metallurgy wastes of eastern Kazakhstan. *Steklo i keramika*. 2020. No. 2, pp. 44–50. (In Russian).
 9. Kairakbaev A.K., Abdrakhimov V.Z., Abdrakhimova E.S. Influence of light fraction ash on porosity, frost resistance and water absorption of facade tiles. *Ugol'*. 2020. No. 12 (1137), pp. 44–48. (In Russian).
 10. Khomenko E.S., Purdik A.V. Features of clinker ceramic microstructure formation. *Steklo i keramika*. 2017. No. 2, pp. 15–19. (In Russian).
 11. Avgustinik A.I. *Keramika* [Ceramics] Leningrad: Sroyizdat. 1975. 592 p.
 12. Subashi De Silva G.H.M.J., Mallwattha M.P.D.P Strength, durability, thermal and run-off properties of fired clay roof tiles incorporated with ceramic sludge. *Construction and Building Materials*. 2018. Vol. 179, pp. 390–399. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.187>
 13. Khodakovs'ka T.V., Ogorodnik I.V., Dmitrenko N.D. Ceramic clinker for facing facades and paving of roads with the use of field plastic-containing raw materials. *Budivel'ni materialy, virobi ta sanitarna tekhnika*. 2006. Vol. 22, pp. 60–67.
 14. Koleda V.V., Mikhailyuta E.S., Alekseev E.V., Tsybulko E.S. Technological features of the production of clinker bricks. *Steklo i keramika*. 2009. No. 4, pp. 17–20. (In Russian).
 15. Fedosov S.V., Malbiev S.A. Regulation of construction of underground structures of buildings and facilities from stone materials. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2018. No. 4, pp. 41–45. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2018-758-4-41-45>

УДК 691.42

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-813-5-9-13>

Т.В. САПЕЛКИНА¹, младший научный сотрудник (sapelkina_geotom@mail.ru);
 Г.И. СТОРОЖЕНКО², д-р техн. наук, профессор (baskey_ltd@mail.ru),
 Т.Е. ШОЕВА², канд. техн. наук (shoeva_geotom@mail.ru)

¹ Тувинский институт комплексного освоения природных ресурсов СО РАН (667007, Республика Тыва, г. Кызыл, ул. Интернациональная, д. 117 А

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

Композиционные керамические материалы из природных и техногенных пород Республики Тыва

Приведены результаты исследований глинистого сырья Сукпакского месторождения и аргиллитов Усть-Элегеста Республики Тыва как сырья для производства стеновой и строительной керамики. Вследствие того, что технологические свойства аргиллитов серьезно зависят от массоподготовки, для снижения себестоимости продукции, повышения ее качества и возможности получения различных видов изделий необходимо керамические массы формировать из механоактивированных аргиллитов и глинистого сырья сходного минерального состава, но отличающегося технологическими свойствами. Показана перспектива их использования для выполнения распоряжения Правительства РФ № 868-р в части развития территорий и промышленности строительных материалов региона.

Ключевые слова: аргиллиты Усть-Элегеста, сукпакская глина, механоактивация, керамические стеновые и строительные материалы.

Для цитирования: Сапелкина Т.В., Стороженко Г.И., Шоева Т.Е. Композиционные керамические материалы из природных и техногенных пород Республики Тыва // *Строительные материалы*. 2023. № 5. С. 9–13. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-813-5-9-13>

T.V. SAPELKINA¹, Junior researcher (sapelkina_geotom@mail.ru); G.I. STOROZHENKO², Doctor of Sciences (Engineering), Professor (baskey_ltd@mail.ru), T.E. SHOEVA², Candidate of Sciences (Engineering), (shoeva_geotom@mail.ru)

¹ Tuva Institute for the Integrated Development of Natural Resources of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (117 A, Internatsionalnaya Street, Kyzyl, 667007, Tyva Republic, Russian Federation)

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

Composite Ceramic Materials from Natural and Technogenic Rocks of the Republic of Tyva

The paper presents the results of studies of clay raw materials of the Sukpakskoye deposit and mudstones of Ust-Elegest of the Republic of Tyva, as raw materials for the production of wall and building ceramics. Due to the fact that the technological properties of argillites seriously depend on mass preparation, then in order to reduce the cost of production, improve its quality and the possibility of obtaining various types of products, it is necessary to form ceramic masses from mechanically activated argillites and clay raw materials of a similar mineral composition, but differing in technological properties. The prospect of their use for the implementation of the Order of the Government of the Russian Federation N 868-r in terms of the development of territories and the construction materials industry in the region is shown.

Keywords: mudstones of Ust-Elegest, Sukpak clay, mechanical activation, ceramic wall and building materials.

For citation: Sapelkina T.V., Storozhenko G.I., Shoeva T.E. Composite ceramic materials from natural and technogenic rocks of the Republic of Tyva. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2023. No. 5, pp. 9–13. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-813-5-9-13>

Республика Тыва обладает значительными запасами природного и техногенного сырья для производства керамических стеновых и строительных материалов, которые являются в настоящее время чрезвычайно востребованными строительной индустрией. При этом имеющиеся в регионе заводы перестают полноценно функционировать из-за изношенности оборудования и устаревшей технологии, что требует полной модернизации керамической отрасли. В республику керамический кирпич, камни керамические и керамическая плитка завозятся из близлежащих регионов, что приводит к росту цен на материалы и удорожанию строительства в целом. В то же время существует реальная возможность развития керамического производства на базе местного минерального сырья и техногенных отходов с использованием новых технологий и их аппаратного обеспечения для получения высококачественной продукции, что для Республики имеет особую актуальность.

В настоящее время развитие промышленности Республики Тыва основывается на ширококомасштабной добыче каменного угля на трех угольных месторождениях. Технология разработки угледобывающих месторождений ведется открытым способом: сначала удаляется верхний слой над угольным пластом, вскрыша при этом составляет от 10 до 40 м. Отвалы вскрыши, представленные различными видами горных пород, составляют более 300 млн т и занимают огромные территории. Утилизация промышленных отходов угледобывающей промышленности в производстве строительных материалов в качестве основного сырья или в составе керамических шихт, несомненно, будет способствовать развитию отрасли, рациональному использованию природных ресурсов и решению экологических проблем региона.

Вблизи столицы Республики Тыва располагаются разведанные месторождения глинистого сырья и многотонные отвалы вскрышных пород угледобы-

чи – аргиллиты Усть-Элегеста. Исследованиями технологических и керамических свойств указанных пород занимались сотрудники Тувинского государственного университета и Тувинского института комплексного освоения природных ресурсов СО РАН [1–4]. Результаты исследований доказали возможность использования техногенных пород для производства керамических материалов, однако не были разработаны технологические регламенты производства и аппаратного его обеспечения. Авторами проведена работа по исследованию пород и разработке стратегии их использования.

В нашей стране аргиллиты, аргиллитоподобные глины в производстве стеновой керамики практически не применяются, несмотря на их огромные запасы, разведанные месторождения и серьезные исследования их вещественного состава и керамических свойств [5–8].

В.Д. Котляром и его учениками показана практическая возможность получения на основе аргиллитов юга Российской Федерации не только керамического клинкерного кирпича, но и керамической черепицы [9]. Особенностью исследованных пород является то, что они не имеют принципиальных отличий от гидрослюдистых и гидрослюдисто-каолиновых глин и, несмотря на то что в составе всегда имеют некоторое количество углистых частиц, при относительно невысокой температуре дают спекшийся камень с низким водопоглощением [8, 9].

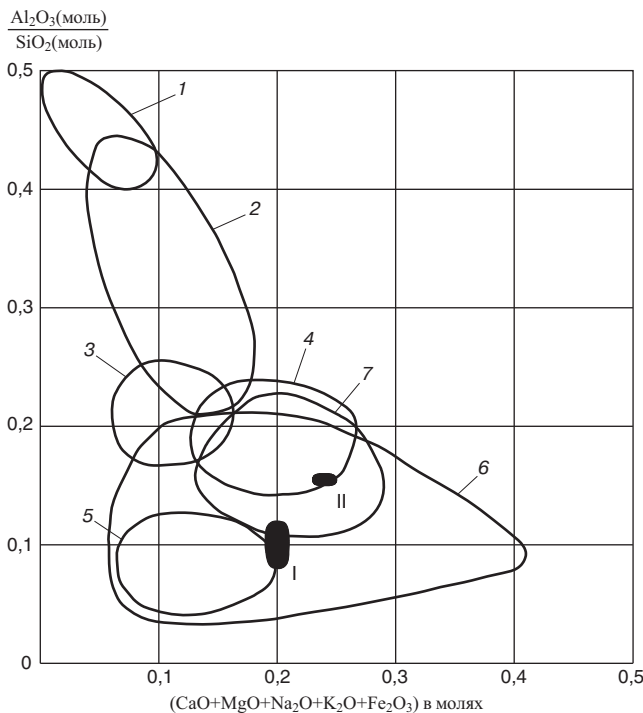


Рис. 1. Промышленное назначение глин в зависимости от их химического состава. Глины, пригодные для производства: 1 – огнеупорных шамотных изделий; 2 – плиток для пола, канализационных труб, кислотоупорных изделий; 3 – гончарных и терракотовых изделий; 4 – черепицы; 5 – мостового клинкера; 6 – кирпича; 7 – керамзита; I – область аргиллитов; II – область сукпакской глины
Fig. 1. Industrial purpose of clays depending on their chemical composition. Clays suitable for the production of: 1 – refractory fireclay products; 2 – floor tiles, sewer pipes, acid-resistant products; 3 – pottery and terracotta; 4 – tiles; 5 – bridge clinker; 6 – bricks; 7 – expanded clay; I – mudstone area; II – Sukpak clay area

Таблица 1
Table 1

Химический состав усть-элегестских аргиллитов на прокаленное вещество
Chemical composition of Ust-Elegest argillites for calcined matter

Источник информации	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅	SO ₃	MnO
ТУВИКОПР СО РАН	68,25	9,11	1,82	12,45	1,14	1,48	4,31	0,8	0,4	0,17	0,06
Кара-сал Б.К.	65,86	12,95	1,99	9,79	1,98	2,44	2,98	1,32	0,44	0,19	0,07

Таблица 2
Table 2

Химический состав сукпакской глины на прокаленное вещество
The chemical composition of Sukpak clay on a calcined substance

SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅	SO ₃	MnO
62,92	15,73	0,92	7,18	8,18	0,46	2,08	1,85	0,44	0,21	0,08

Таблица 3
Table 3

Физико-механические характеристики образцов
Physical and mechanical characteristics of the samples

Температура обжига, °С	№ шихты	Средняя плотность, г/см ³	Предел прочности (МПа) при		Водопоглощение, %	Морозостойкость, цикл
			сжатию	изгибе		
1000	1	2,253	33,6	6	10,5	50
	2	2,095	24,9	5,2	13,6	
1050	1	2,266	38,8	6,6	9,6	
	2	1,992	30,3	5,1	11,5	
1100	1	2,281	58,9	7,9	2,5	
	2	2,095	41	3,8	1,5	

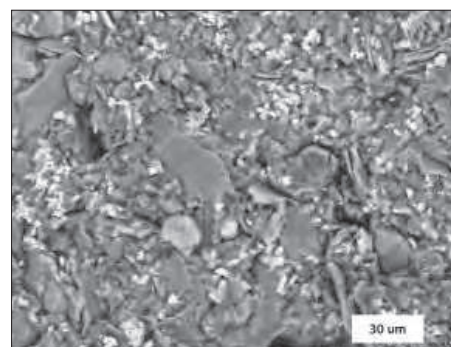


Рис. 2. Микрофотография аргиллита Усть-Элегеста
Fig. 2. Micrograph of Ust-Elegest argillite

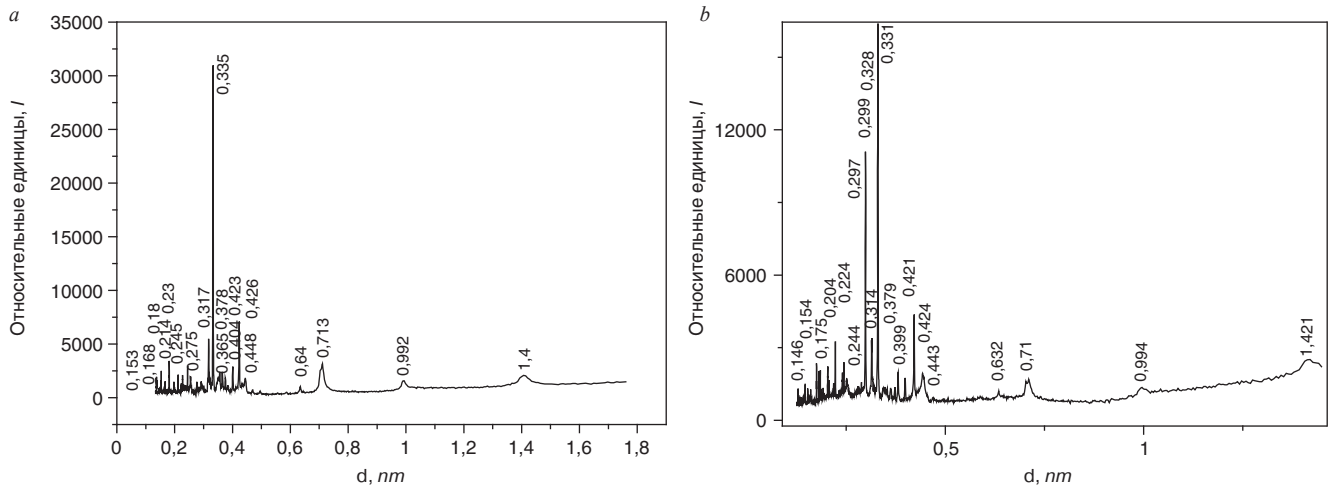


Рис. 3. Дифрактограмма: *a* – аргиллита Усть-Элегеста; *b* – сукпакской глины
 Fig. 3. X-ray diffraction pattern of: *a* – Ust-Elegest argillite; *b* – Sukpak clay

Учитывая благоприятное территориальное расположение аргиллитов Усть-Элегеста и природного глинистого сырья вблизи крупного промышленного центра, авторы провели работу по исследованию перспектив их комплексного освоения применительно к производству дефицитных в Республике Тыва керамических материалов.

Выполнены исследования вещественного состава и технологических свойств представительных проб природного и техногенного сырья, которые позволили установить химический и минеральный состав пород.

Согласно диаграмме А.И. Августиника (рис. 1) область, которую занимают аргиллиты Усть-Элегеста, находится на границе зон сырья для мостового клинкера и керамического кирпича, а сукпакская глина – на границе зон керамзитовых и кирпичных глин. В целом химический и минеральный составы аргиллитов соответствуют классу сырья для производства клинкерного кирпича, кремнеземистый модуль у них в среднем составляет от 3 до 4.

Минеральный состав аргиллитов (рис. 2, 3, *a*) представлен кварцем, смешанослойными глинистыми минералами (монтмориллонит, гидрослюда, каолинит), полевыми шпатами (ортоклаз), в небольшом количестве присутствуют карбонаты.

Аргиллитовая порода состоит из очень тонкозернистого (пелитового) обломочного материала (размером около 0,001 мм) кварц-полевошпатового состава, микрочешуйчатой буроватой гидрослюды и углистого

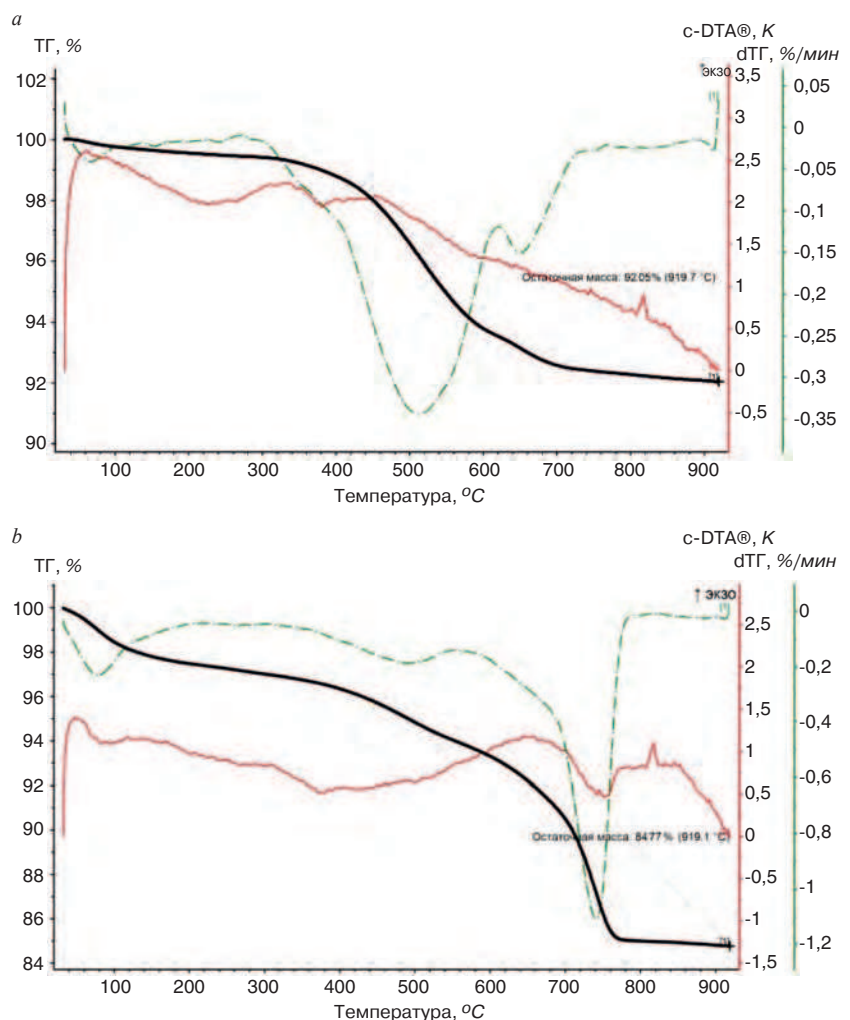


Рис. 4. Дериватограмма: *a* – аргиллитов Усть-Элегеста; *b* – сукпакской глины
 Fig. 4. Derivatogram: *a* – argillite of Ust-Elegest; *b* – Sukpak clay

детрита бурого цвета (рис. 2). Размер углистых обломков до 0,1 мм. Кроме того, в породе присутствуют хлопьевидные, комковатые образования органического вещества бурой окраски размером до 0,2–0,3 мм.

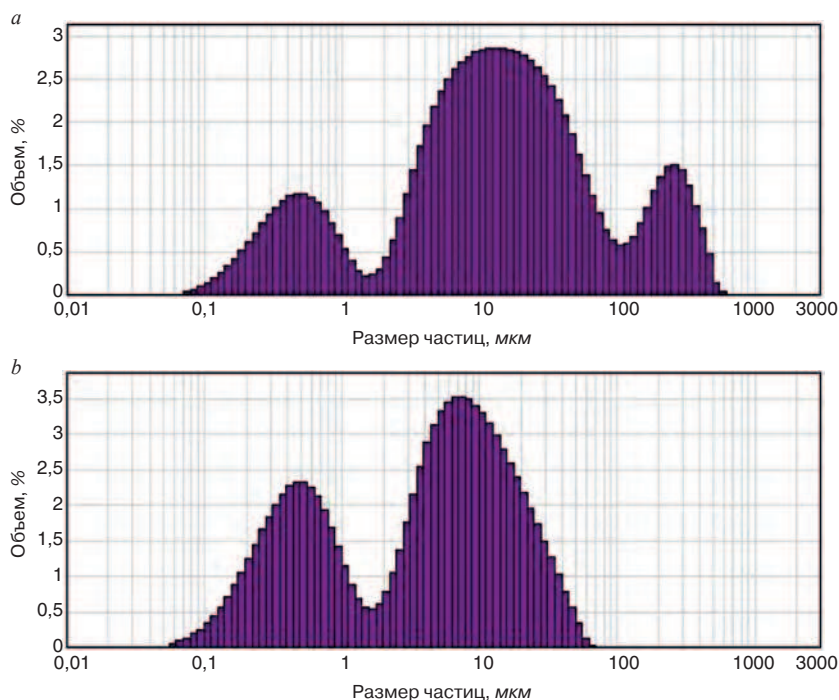


Рис. 5. Гранулометрический состав аргиллитов Усть-Элегеста: *a* – исходных; *b* – после механоактивации

Fig. 5. Granulometric composition of Ust-Elegest argillites: *a* – original; *b* – after mechanical activation

Если сравнить дифрактограммы аргиллитов и сукпакской глины (рис. 3), то можно обнаружить сходство их минерального состава, что объясняется территориальной общностью и тем, что формирование аргиллитов происходило при высоком давлении и температуре на глубинах в районе расположения сукпакской глины [10].

Дериватограммы аргиллитов и сукпакской глины (рис. 4), несмотря на близкий минеральный состав, менее сходны между собой, чем дифрактограммы, что некоторые авторы объясняют разницей в формировании контактов между частицами в глинах и аргиллитах [11].

На дериватограмме сукпакской глины двухступенчатое удаление химически связанной воды из глинистых минералов происходит не так, как у аргиллитов, у которых разрушение кристаллической решетки наступает раньше. Поэтому аргиллиты Усть-Элегеста относятся к сырью легкоплавкому (температура плавления 1200–1250°C) с узким интервалом спекания, что дополнительно обусловлено повышенным содержанием оксидов железа (до 10–12%).

Обнаруженные авторами особенности состава и термических свойств аргиллитов и сукпакской глины позволили сформулировать основную технологическую идею использования природного и техногенного сырья в производстве стеновой и строительной керамики. Вследствие того, что технологические свойства аргиллитов серьезно зависят от массоподготовки, для снижения себестоимости продукции, повышения ее качества и возможности

получения различных видов керамических изделий необходимо керамические массы формировать из механоактивированных аргиллитов и глинистого сырья сходного минерального состава, но отличающегося технологическими свойствами. Таким образом синергетический эффект позволит достичь требуемого результата.

Представительную технологическую пробу аргиллитов Усть-Элегеста предварительно дробили в щековой дробилке до фракции 1 мм, а затем активировали в шаровой мельнице в течение 2, 4 и 6 ч в режиме сухого помола. Наряду с увеличением дисперсности (рис. 5) выросла пластичность активированных аргиллитов с 8 до 13 и прочность образцов полусухого прессования на их основе по сравнению с исходными – на 57%.

По технологии полусухого прессования были приготовлены две шихты с разным соотношением механоактивированных аргиллитов и сукпакской глины соответственно:

шихта 1 – 70:30; шихта 2 – 30:70%. Образцы прессовали на лабораторном гидравлическом прессе при стандартном для полусухого прессования давлении 20 МПа. Сформованные образцы обжигали в муфельной печи при 1000, 1050 и 1100°C. Результаты испытаний керамических образцов приведены в табл. 3.

Выводы

Результаты исследований керамических образцов полусухого прессования на основе механоактивированного аргиллита Усть-Элегеста и сукпакской глины показали, что состав шихты влияет на обжиговые свойства спекаемых керамических изделий, которые характеризуются изменением плотности, водопоглощения и прочности (табл. 3).

Узкий интервал спекания, несмотря на то что признаков пережога на образцах, обожженных при температуре 1100°C, не наблюдалось, не позволяет их отнести к изделиям строительной керамики. Оптимальной температурой обжига можно считать 1000–1050°C.

Установлено, что использование механоактивированных аргиллитов Усть-Элегеста в комбинации с глинистым сырьем Сукпакского месторождения позволяет получить изделия как стеновой, так и строительной керамики на одном заводе, построенном вблизи этих месторождений, что обеспечит гибкость производства в части ассортимента выпускаемых изделий. Разработан технологический регламент производства керамического кирпича и черепицы мощностью 100 тыс. т/г.

Список литературы

1. Кара-Сал Б.К., Чюдюк С.А., Иргит Б.Б. Особенности применения аргиллитовых вскрышных пород угледобычи для производства керамических стеновых материалов // *Вестник Тувинского государственного университета. Вып. 3. Технические и физико-математические науки*. 2020. № 2 (62). С. 6–18.
2. Кара-Сал Б.К., Чюдюк С.А., Сапелкина Т.В. Разработка состава шихты на основе вскрышных пород угледобычи для изготовления стеновых керамических материалов // *Естественные и технические науки*. 2019. № 9 (135). С. 165–169.
3. Кара-Сал Б.К., Стрельников А.А., Сапелкина Т.В. Технологические свойства керамических масс на основе аргиллитовых вскрышных пород угледобычи, измельченных на различных помоловых установках // *Естественные и технические науки*. 2020. № 5 (143). С. 122–127.
4. Кара-Сал Б.К., Чюдюк С.А., Сапелкина Т.В. Технологические свойства глинистых вскрышных пород угледобычи при производстве керамических стеновых материалов // *Естественные и технические науки*. 2018. № 1. С. 165–169.
5. Котляр А.В. Характеристика камнеподобных глинистых пород как сырья для производства керамики // *Строительные материалы*. 2022. № 4. С. 31–37. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-801-4-31-37>
6. Котляр А.В. Клинкерный кирпич низкотемпературного спекания на основе аргиллитоподобных глин и аргиллитов: Дис. ... канд. техн. наук. Ростов н/Д, 2018. 199 с.
7. Лазарева Я.В., Лапунова К.А., Орлова М.Е. Керамическая черепица из аргиллитов как элемент рурф-дизайна в облике современных мегаполисов // *Строительные материалы*. 2021. № 4. С. 42–46. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-790-4-42-46>
8. Лазарева Я.В., Котляр А.В., Терехина Ю.В. Структурно-механические особенности керамической черепицы на основе аргиллитов и кремнистых глин. *Материалы национальной научно-практической конференции «Актуальные проблемы науки и техники»*. Ростов н/Д. 2020. С. 1649–1651.
9. Kotlyar A.V., Lapunova K.A., Lazareva Y.V., Orlova M.E. Effect of argillites reduction ratio on ceramic tile and paving clinker of low-temperature sintering. *Materials and Technologies in Construction and Architecture. Material Science Forum Submitted*. 2018. Vol. 931, pp. 526–531. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.931.526>
10. Осипов В.И., Соколов В.Н. Глины и их свойства. Состав, строение и формирование свойств. М.: ГЕОС, 2013. 576 с.
11. Котляр А.В., Талпа Б.В., Лазарева Я.В. Особенности химического состава аргиллитоподобных глин и аргиллитов // *Строительные материалы*. 2016. № 4. С. 10–14.

References

1. Kara-Sal B.K., Chudyuk S.A., Irgit B.B. Features of the use of argillite overburden rocks of coal mining for the production of ceramic wall materials. *Vestnik of the Tuva State University. Issue 3. Technical and physical and mathematical sciences*. 2020. No. 2 (62), pp. 6–18. (In Russian).
2. Kara-Sal B.K., Chudyuk S.A., Sapelkina T.V. Development of charge composition based on overburden rocks of coal mining for the manufacture of wall ceramic materials. *Estestvennye i tekhnicheskie nauki*. 2019. No. 9 (135), pp. 165–169. (In Russian).
3. Kara-Sal B.K., Strelnikov A.A., Sapelkina T.V. Technological properties of ceramic masses based on argillite overburden coal mined at various grinding plants. *Estestvennye i tekhnicheskie nauki*. 2020. No. 5 (143), pp. 122–127. (In Russian).
4. Kara-Sal B.K., Chudyuk S.A., Sapelkina T.V. Technological properties of clayey overburden rocks of coal mining in the production of ceramic wall materials. *Estestvennye i tekhnicheskie nauki*. 2018. No. 1, pp. 165–169. (In Russian).
5. Kotlyar A.V. Characteristics of stone-like clay rocks as raw materials for the production of building ceramics. *Stroitel'nye Materialy [Construction Materials]*. 2022. No. 4, pp. 31–37. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-801-4-31-37>
6. Kotlyar A.V. Clinker brick of low-temperature sintering based on argillite-like clays and argillites: Dis. ... Candidate of Sciences (Engineering). Rostov-on-Don. 2018. 199 p.
7. Lazareva Ya.V., Lapunova K.A., Orlova M.E. Ceramic tiles made of mudstones as an element of roof-design in the appearance of modern megacities. *Stroitel'nye Materialy [Construction Materials]*. 2021. No. 4, pp. 42–46. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-790-4-42-46>
8. Lazareva Ya.V., Kotlyar A.V., Terekhina Yu.V. Structural and mechanical features of ceramic tiles based on argillites and siliceous clays. *Materials of the national scientific-practical conference "Actual problems of science and technology"*. Rostov-on-Don. 2020, pp. 1649–1651.
9. Kotlyar A.V., Lapunova K.A., Lazareva Y.V., Orlova M.E. Effect of argillites reduction ratio on ceramic tile and paving clinker of low-temperature sintering. *Materials and Technologies in Construction and Architecture. Material Science Forum Submitted*. 2018. Vol. 931, pp. 526–531. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.931.526>
10. Osipov V.I., Sokolov V.N. Gliny i ikh svoistva. Sostav, stroenie i formirovanie svoistv [Clays and their properties. Composition, structure and formation of properties]. Moscow: GEOS. 2013. 576 p.
11. Kotlyar A.V., Talpa B.V., Lazareva Ya.V. Peculiarities of the chemical composition of argillite-like clays and argillites. *Stroitel'nye Materialy [Construction Materials]*. 2016. No. 4, pp. 10–14. (In Russian).

А.Ю. СТОЛБОВУШКИН¹, д-р техн. наук (stanyr@list.ru);
А.О. ПОРТНОВ², генеральный директор (aportnov@list.ru);
Д.В. АКСТ³, канд. техн. наук (daniel_axt@mail.ru);
Д.А. ЩЕТИНИН², главный технолог (denis.techn@yandex.ru);
О.А. ФОМИНА⁴, канд. техн. наук (soa2@mail.ru);
И.В. СПИРИДОНОВА¹, канд. техн. наук (sp1ridonova-iv@yandex.ru)

¹ Сибирский государственный индустриальный университет (654007, г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

² ООО Кирпичный завод «Ликолор» (630088, г. Новосибирск, ул. Петухова, 6/1)

³ ООО «СКС» (115446, г. Москва, ул. Академика Миллионщикова, 20А)

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

Объемное окрашивание стеновой керамики добавками попутной продукции производства ферросиликомарганца

Представлены результаты исследований по объемному окрашиванию стеновых керамических материалов добавками марганцевого концентрата (попутной продукции производства ферросиликомарганца). Приведены химический, гранулометрический, минеральный составы глинистого сырья, представляющего заводскую шихту для производства керамического кирпича, и марганцевого концентрата. Рассмотрены составы керамических шихт с различным содержанием техногенного красящего компонента и техника приготовления образцов способом мягкой формовки из пластических масс. Установлены зависимости влияния количества добавки марганцевого концентрата на формовочные, сушильные и обжиговые свойства глиномассы. Увеличение содержания красящей техногенной добавки приводит к снижению средней плотности и прочности при сжатии образцов, при этом происходит значительное увеличение их водопоглощения, что свидетельствует о негативном влиянии добавки в количестве более 10% на процессы спекания при обжиге керамики. Установлено, что введение марганцевого концентрата в заводскую шихту приводит к окрашиванию обожженных образцов в различные оттенки коричневого цвета. Определен оптимальный состав шихты на основе глинистого сырья и попутной продукции производства ферросиликомарганца для получения объемно-окрашенных керамических образцов прочностью 17–18 МПа обжигом при 1030°C. Сформулированы основные направления дальнейших исследований.

Ключевые слова: объемное окрашивание стеновой керамики, техногенная красящая добавка, марганцевый концентрат, мягкая формовка глиномассы, сушка и обжиг керамических образцов.

Для цитирования: Столбовушкин А.Ю., Портнов А.О., Акст Д.В., Щетинин Д.А., Фомина О.А., Спиридонова И.В. Объемное окрашивание стеновой керамики добавками попутной продукции производства ферросиликомарганца // *Строительные материалы*. 2023. № 5. С. 14–21. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-813-5-14-21>

A.Yu. STOLBOUSHKIN¹, Doctor of Sciences (Engineering) (stanyr@list.ru); A.O. PORTNOV², General Director (aportnov@list.ru);

D.V. AKST³, Candidate of Sciences (Engineering) (daniel_axt@mail.ru); D.A. SHCHETININ², Chief Technologist (denis.techn@yandex.ru);

O.A. FOMINA⁴, Candidate of Sciences (Engineering) (soa2@mail.ru); I.V. SPIRIDONOVA¹, Candidate of Sciences (Engineering) (sp1ridonova-iv@yandex.ru)

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

² LLC Brick plant "Likolor" (6/1, Petukhova Street, Novosibirsk, 630088, Russian Federation)

³ LLC "SKS" (20A, Akademika Millionshchikova Street, Moscow, 115446, Russian Federation)

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

Volume Coloring of Wall Ceramics with Additives of Associated Products from Ferrosilicomanganese Production

It has been presented the results of studies on the volumetric coloring of wall ceramic materials with the addition of manganese concentrate (a by-product of the production of ferrosilicomanganese). The chemical, granulometric, mineral compositions of clay raw materials, representing the factory charge for the production of ceramic bricks, and manganese concentrate are given. The compositions of ceramic mixtures with different content of the technogenic coloring component and the technique for preparing samples by soft molding from plastics are considered. The dependences of the influence of the amount of manganese concentrate additive on the molding, drying and firing properties of clay mass have been established. An increase in the content of the coloring technogenic additive leads to a decrease in the average density and compressive strength of the samples, while there is a significant increase in their water absorption, which indicates a negative effect of the additive in an amount of more than 10% on the sintering processes during ceramic firing. It has been established that the introduction of manganese concentrate into the factory charge leads to the coloration of fired samples in various shades of brown. The optimal composition of the charge based on clay raw materials and by-products of the production of ferrosilicomanganese was determined to obtain volume-colored ceramic samples with a strength of 17–18 MPa by firing at 1030°C. The main directions for further research are formulated.

Keywords: three-dimensional coloring of wall ceramics, technogenic coloring additive, manganese concentrate, soft molding of clay mass, drying and firing of ceramic samples.

For citation: Stolboushkin A.Yu., Portnov A.O., Akst D.V., Shchetinin D.A., Fomina O.A., Spiridonova I.V. Volume coloring of wall ceramics with additives of associated products from ferrosilicomanganese production. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2023. No. 5, pp. 14–21. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-813-5-14-21>

Расширение ассортимента и улучшение качества лицевого и декоративного керамического кирпича безусловно являются одним из перспективных направлений развития производства керамических ма-

териалов. Строительство и эксплуатация зданий со стенами, облицованными такими материалами различной окраски, предопределили высокий спрос на цветные керамические изделия [1, 2]. Большинство

российских кирпичных заводов расширяет ассортимент своей продукции за счет использования именно объемного окрашивания керамического кирпича, что обусловлено простотой и эффективностью технологии, а также большей долговечностью изделий в сравнении с некоторыми способами обработки поверхности кирпича.

В заводской практике одним из распространенных способов получения стеновой керамики по технологии объемного окрашивания является комбинирование глин и суглинков различного вещественного состава. Другие способы основаны на введении в шихту различных минеральных добавок в виде металлических, рудных ископаемых и продуктов их переработки, карбонатных пород, высокоэффективных оксидов и солей металлов [3–11]. Однако в действующих технологиях применяются в основном дорогие и дефицитные пигменты [12].

С точки зрения физико-химической природы цвета полиминеральных силикатных систем принято считать, что окраска керамики напрямую зависит от наличия в ней ионов-хромофоров, их электронной структуры, валентного состояния, размера и окружения. В случае если у ионов переходных (V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu) или редкоземельных элементов, входящих в фазовый состав керамического материала, имеется незаполненный верхний энергетический уровень, то кристаллы из этих элементов выглядят окрашенными. При появлении вакансий в *d*- или *f*-оболочках имеющих атомов изменяется способность кристаллов интенсивно поглощать и преобразовывать световую энергию в видимой части электромагнитного спектра, что обуславливает субъективное восприятие цвета зрением человека [13].

Среди минеральных красителей для строительной керамики выделяют простые и сложные соединения. К первым относят оксиды, гидроксиды и соли тяжелых металлов, таких, как железо, хром, марганец и др. Вторая группа хромофорных веществ включает алюминаты и силикаты типа шпинелей, гранатов, виллемитов, твердых растворов корундов, силлиманитов или устойчивых соединений фосфатов, ванадатов и т. д. [14–16].

Как правило, производство керамических пигментов связано с высокотемпературным синтезом (1300–1400°C) и с необходимостью использовать дорогое, высокосортное сырье, в основном химреактивы [17].

Несмотря на высокий спрос на объемно-окрашенный кирпич со стороны потребителей, его производство осложняется рядом неблагоприятных факторов.

Во-первых, это значительное повышение затрат, связанное с приобретением и транспортировкой дорогих неорганических красителей, часто привозимых из-за рубежа, поскольку отечественные хромофорные добавки нередко имеют низкое качество и не обеспечивают эффективное окрашивание керамики [18]. При этом следует учесть беспрецедентное санкционное давление коллективного Запада, бук-

вально обрушившее поставку технологий и материалов в нашу страну.

Во-вторых, применение дорогостоящих керамических пигментов не гарантирует получения требуемой окраски и стабильного цвета керамического кирпича после обжига [19]. Возникают проблемы с получением однородной окраски керамического камня, связанные с неравномерным распределением красителя в объеме пластичной массы, на что непосредственно влияют способы введения добавки и ее перемешивания с глиной [20].

В-третьих, добавление неорганических красителей в пластичную массу может негативно сказаться на физико-механических свойствах изделий. Снижение марочной прочности и увеличение водопоглощения происходят вследствие нарушения процессов спекания при обжиге керамики с корректирующими добавками [21].

В настоящее время актуальным является проведение исследований по разработке составов керамических шихт, позволяющих уйти от использования рафинированных хромофорных добавок в сторону альтернативных сырьевых материалов.

Цель настоящей работы заключается в проведении научных исследований по объемному окрашиванию стеновых керамических материалов добавками минеральных хромофорных веществ, содержащих оксиды тяжелых металлов. В соответствии с поставленной целью исследования проводились в два этапа и включали разработку оптимальных состава шихты, параметров и режимов обжига объемно-окрашенного керамического кирпича пластического формования на основе глины с использованием попутной продукции производства ферросиликомарганца (марганцевый концентрат МК-30).

Объекты исследований

По согласованию с заказчиком ООО Кирпичный завод «Ликолор» (г. Новосибирск) разработка состава пресс-масс проводилась для двухкомпонентной шихты, состоящей из базового компонента – глинистого сырья, используемого в заводской технологии, и техногенной корректирующей добавки для окрашивания керамического кирпича в коричневый цвет.

Выбор красящего компонента был обусловлен наличием в его химическом составе соединений, способных при обжиге керамики образовывать сложные минералы с характерными оптическими свойствами, отмеченными выше. С учетом организованной добычи и переработки марганцевой руды на юге Кемеровской области в качестве корректирующей добавки в керамическую шихту был выбран попутный продукт производства ферросиликомарганца – марганцевый концентрат МК-30 производства ООО «Западно-Сибирский электрометаллургический завод» (г. Новокузнецк).

Глинистое сырье представляет собой смесь красножгущегося суглинка Верх-Тулинского месторождения Новосибирской обл. (СВТМ) и тугоплавкой

**Таблица 1
Table 1**

**Химический состав сырьевых материалов
Chemical composition of raw materials**

Вид сырья	№ пробы	Массовая доля компонентов, %												
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	SO ₃	P ₂ O ₅	MnO _{общ}	PbO	ППП
СВТМ	1.1	59,27	14,02	4,81	5,91	2,32	1,45	1,99	0,70	<0,1	0,09	0,08	н/д	9,26
	3.1	60,81	14,5	5,14	4,28	1,9	1,44	2,05	0,73	<0,1	0,1	0,09	н/д	8,86
ГКМ	320	59,9	29,46	0,15	0,4	0,36	н/д	н/д	н/д	0,41	н/д	н/д	н/д	7,47
	Средн.	62,48	23,86	1,69	0,51	0,35	<0,1	0,69	1,53	0,13	0,06	<0,03	н/д	7,95
МК-30	2-я печь	16,42	2,8	0,84	4,19	7,5	3	13,9	н/д	0,73	0,03	17,2	16,2	12,82
	3-я печь	32	4,2	1,74	10,5	9,7	1,8	4,9	н/д	0,25	0,04	24,4	2,7	7,32

Примечание: н/д – нет данных.

**Таблица 2
Table 2**

**Гранулометрический состав сырьевых материалов
Grain size distribution of raw materials**

Вид сырья	№ пробы	Полный остаток на сите № 0063, %	Частные остатки в % на ситах, мм			
		>0,063	0,063–0,01	0,01–0,005	0,005–0,001	<0,001
ГКМ	320	1,55	0,88	14,5	43,47	39,6
	Средн.	2,79	2,97	14,99	37,4	42,41
МК-30	2-я печь	4,71	39,93	34,07	15	6,29

**Таблица 3
Table 3**

**Минеральный состав сырьевых материалов
Mineral composition of raw materials**

Вид сырья, № пробы	Преобладающие минералы	Межплоскостные расстояния, Å
СВТМ, проба 3.1	Глинистые	
	Иллит (гидрослюда)	10,1412; 5,0582; 4,5105; 3,310; 2,9529; 2,5605; 2,3719; 1,9774
	Каолинит	7,0679; 3,5360; 2,8084; 2,5605; 2,3719
	Нонтронит	14,5093; 6,0671; 4,5105; 2,5949; 1,6692; 1,5410
	Монтмориллонит	11,2440; 6,0671; 5,4336; 4,47; 2,5949; 1,6692
	Непластичные	
	Кварц	4,2478; 3,3487; 2,4525; 2,2837; 2,2402; 2,1287; 1,9774; 1,8182; 1,6692; 1,5410; 1,3821; 1,3753
	Ортоклаз	6,4433; 4,2478; 4,0393; 3,7786; 3,4847; 3,331; 3,1994; 2,9529; 2,6456; 2,5605; 2,3984; 2,2837
Кальцит	3,8680; 3,0296; 2,4525; 2,2837	
МК-30, 2-я печь	Браунит	0,272; 0,166
	Гаусманит	0,249; 0,277; 0,154
	Кварц	0,334; 0,228; 0,181; 0,154
	Франклинит	0,493; 0,299; 0,256; 0,211; 0,173; 0,163; 0,149
	Авгит	0,298; 0,212; 0,142; 0,132; 0,127; 0,107
	Анортит	0,405; 0,318; 0,213
	Альбит	0,321; 0,296; 0,188; 0,182

светложгущейся глины Кайлинского месторождения Кемеровской обл. (ГКМ).

Марганцевый концентрат МК-30 является попутным продуктом электрометаллургического завода от производства ферросиликомарганца и представляет собой улавливаемую эффективными рукавными фильтрами газоочистных сооружений дисперсную систему.

Химический, гранулометрический и минеральный составы сырьевых материалов приведены в табл. 1–3.

Характеристика глинистого сырья

В соответствии с ГОСТ 9169–2021 «Сырье глинистое для керамической промышленности. Классификация» суглинок СВТМ и глина ГКМ относятся

к полуокислому глинистому сырью (табл. 1) по сумме $Fe_2O_3+TiO_2$ соответственно с высоким и средним содержанием красящих оксидов.

По гранулометрическому составу проб СВТМ относится к низко- и грубодисперсному сырью (количество частиц размером менее 0,01 мм не превышает 30%) с низким и средним содержанием крупнозернистых включений. ГKM (табл. 2) содержит незначительное количество песчаных частиц (фракции крупнее 0,25 мм). Преобладающими фракциями являются 0,01 мм и менее, т. е. тугоплавкая глина характеризуется тонким равномерным гранулометрическим составом.

По минеральному составу СВТМ относится к группе полиминерального глинистого сырья с преобладанием гидрослюда (табл. 3). Суглинок содержит глинистые минералы групп иллита, каолинита и монтмориллонита. Из примесей наблюдаются кварц, ортоклаз и кальцит. ГKM в естественном состоянии представлен почти полностью каолинизированным полевым шпатом (30–70%), кварцем (10–30%), гидромусковитом (10–30%) и хлоритом (менее 5%).

Характеристика марганцевого концентрата

По количеству глинозема МК-30 относится к группе кислого сырья (табл. 1). В соответствии с особенностями заводской технологии производимый попутный продукт в виде марганцевого концентрата условно можно подразделить на три разновидности по содержанию $MnO_{общ}$: I – 5–10%; II – 15–20%; III – 25–30%.

По гранулометрическому составу МК-30 (табл. 2) можно классифицировать как пылеватую супесь, а по ГОСТ 9169–2021 отнести к группе низкодисперсного сырья. Исходные дисперсный состав и влажность (2–4%) техногенной добавки позволяют использовать ее в технологии объемного окрашивания керамического кирпича без необходимости дополнительной сушки и измельчения.

МК-30 имеет полиминеральный состав (табл. 3) и при отсутствии глинистых минералов содержит браунит, гаусманит, кварц, франклинит, авгит, анортит, альбит и примеси.

Результаты и обсуждение

Для исследования формовочных, сушильных и обжиговых свойств глиномассы на основе заводской шихты с добавкой марганцевого концентрата и его влияния на объемное окрашивание керамики при обжиге были приготовлены четыре серии образцов. Составы керамических шихт приведены в табл. 4. Концентрация добавки МК-30 в глиномассе последовательно изменялась от 5 до 15 мас. %. Сравнение проводилось по контрольной серии образцов без добавки (I состав).

Исследование пластичности по ГОСТ 21216–2014 «Сырье глинистое. Методы испытаний» показало, что введение добавки МК-30 приводит к сокращению интервала между значениями влажности на

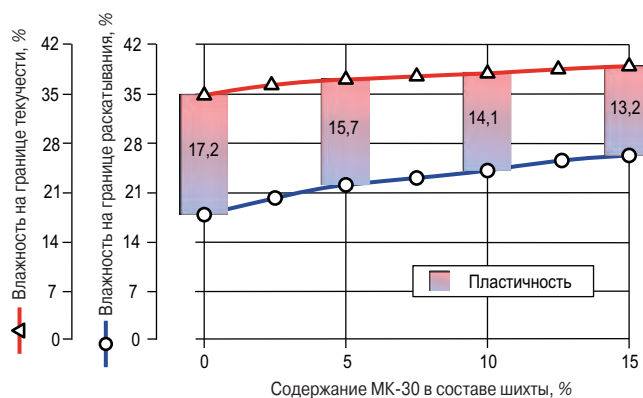


Рис. 1. Зависимость пластичности глиномассы от количества МК-30 в составе шихты

Fig. 1. Dependence of plasticity of clay mass on the amount of MK-30 in the composition of the charge

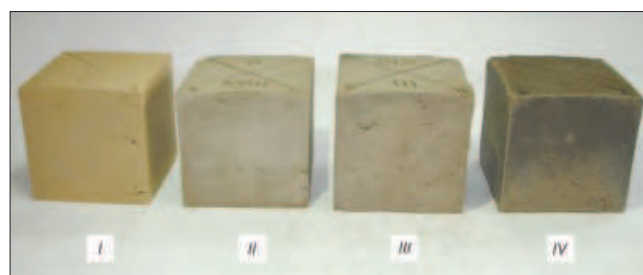


Рис. 2. Внешний вид лабораторных образцов после сушки в электрошкафу: I – без добавки; II, III, IV – с добавкой МК-30 в количестве 5, 10, 15 мас. %

Fig. 2. Appearance of laboratory samples after drying in an electrical cabinet: I – without additive; II, III, IV – with the addition of MK-30 in the amount of 5, 10, 15 wt. %

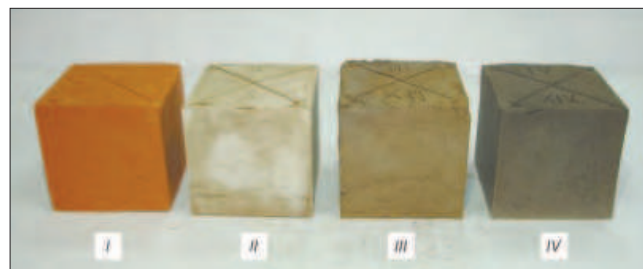


Рис. 3. Внешний вид керамических образцов после обжига: I – без добавки; II, III, IV – с добавкой МК-30 в количестве 5, 10, 15 мас. %

Fig. 3. Appearance of ceramic samples after firing: I – without additive; II, III, IV – with the addition of MK-30 in the amount of 5, 10, 15 wt. %

Таблица 4
Table 4

Составы керамических шихт
Compositions of ceramic batches

№ шихты	Состав шихты, мас. %		Влажность глиномассы, %	Примечание
	Заводская шихта	МК-30		
I	100	0	26	Контрольный состав
II	95	5	28,2	
III	90	10	27	
IV	85	15	29	

границе текучести и на границе раскатывания, что свидетельствует об отошающем влиянии добавки на свойства глиномассы (рис. 1).

Образцы-кубики размером 45×45×45 мм изготавливались методом мягкой формовки [22] из пластичной глиномассы влажностью 26–29% (табл. 4) при помощи двухсоставных форм.

После формования образцы последовательно сушились в течение 2,5–3 сут в эксикаторе, на воздухе и до постоянной массы в сушильном шкафу при конечной температуре 105±5°С. В процессе сушки образования сушильных трещин и деформаций не наблюдалось. Внешний вид высушенных образцов показан на рис. 2.

Обжиг керамических образцов проводился в муфельной печи по ступенчатому режиму с выдержкой при температуре 1030°С в течение 2 ч. Параметры обжига при проведении эксперимента принимались с учетом температурного режима, используемого в заводских условиях.

Внешний вид обожженных образцов представлен на рис. 3. Их визуальная оценка показала, что введение добавки МК-30 (рис. 3, II–IV) во всех случаях приводит к изменению окраски по сравнению с контрольными образцами (рис. 3, I). Очевидно, что при обжиге оксид марганца переменной валентности (17,2 мас. % в химическом составе добавки) существенно влияет на окрашивание образцов в различные оттенки коричневого цвета.

Следует отметить, что насыщенный коричневый цвет и практически однотонную поверхность имеют образцы с добавкой МК-30 в количестве 10 и 15%. При этом ее 15%-е содержание в составе шихты (рис. 3, IV) обеспечивает окраску керамических образцов, сопоставимую с коричневым цветом темных оттенков объемно-окрашенного кирпича, выпускаемого в заводских условиях.

Образцы с 5%-й добавкой МК-30 имеют после обжига неравномерную светло-коричневую окраску. Пятнистая поверхность у образцов возникает за счет образования стойкого налета в приповерхностном слое с различной толщиной от 20 до 100 мкм. Причины его появления, вероятно, связаны с особенностями исходного химического состава добавки, физико-химических процессов и реакций тепло-массопереноса, протекающих при обжиге керамической массы. Для их объяснения потребуется проведение дополнительных исследований.

На следующем этапе исследовалось влияние добавки МК-30 на физико-механические свойства керамических образцов.

Определение усадочных деформаций проводилось в соответствии с ГОСТ 21216–2014 по изменению линейных размеров и объема лабораторных образцов. Результаты исследований представлены в табл. 5 и на рис. 4.

Увеличение добавки МК-30 в составе шихты приводит к снижению общей усадки образцов. Для контрольного состава без добавки линейная и объемная

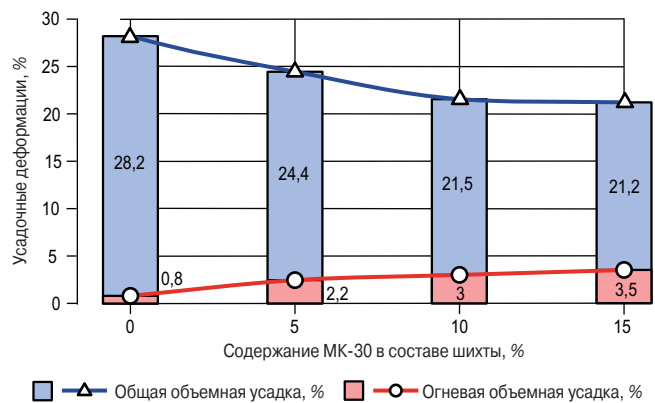


Рис. 4. Зависимость общей и огневой объемных усадок керамических образцов от количества МК-30 в составе шихты
Fig. 4. Dependence of the total and fire volumetric shrinkage of ceramic samples on the amount of MK-30 in the charge

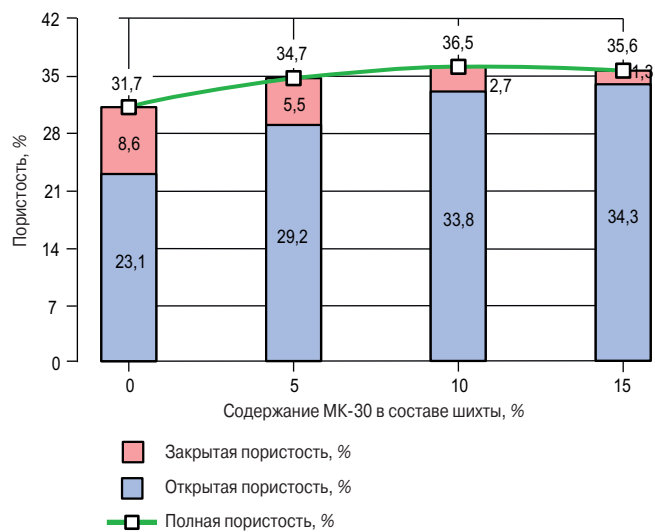


Рис. 5. Зависимость пористости керамических образцов от количества МК-30 в составе шихты
Fig. 5. Dependence of the porosity of ceramic samples on the amount of MK-30 in the charge

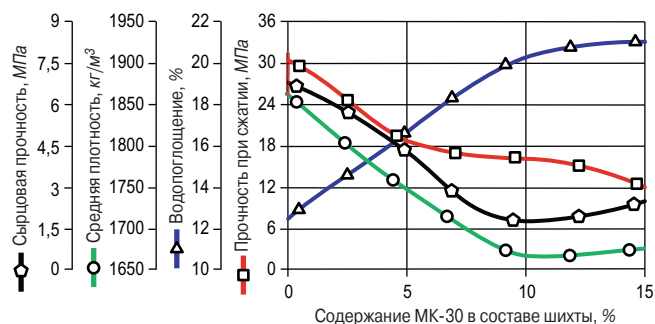


Рис. 6. Зависимость физико-механических свойств керамических образцов от количества МК-30 в составе шихты
Fig. 6. Dependence of the physical and mechanical properties of ceramic samples on the amount of MK-30 in the charge

воздушные усадки более чем в 1,5 раза превышают усадку образцов IV состава шихты (табл. 5), что подтверждает отошающее действие добавки на глиномассу и согласуется с изменением ее пластичности (рис. 1). Обратная зависимость наблюдается при определении огневой усадки образцов (рис. 4), что свидетельствует об активном участии красящей тех-

Таблица 5
Table 5Воздушная, огневая и общая усадки керамических образцов
Air shrinkage, fire shrinkage and general shrinkage of ceramic samples

№ шихты	Воздушная усадка, %		Огневая усадка, %		Общая усадка, %	
	линейная	объемная	линейная	объемная	линейная	объемная
I	9,3	27,4	0,4	0,8	9,7	28,2
II	7,5	22,2	0,8	2,2	8,3	24,4
III	7,3	18,5	1	3	8,3	21,5
IV	6	17,7	1,5	3,5	7,5	21,2

Таблица 6
Table 6Физико-механические свойства керамических образцов
Physical and mechanical properties of ceramic samples

№ шихты	Средняя плотность, кг/м ³	Истинная плотность, кг/м ³	Водопоглощение, %	Предел прочности при сжатии, МПа	Марка по морозостойкости (ГОСТ 530–2012)
I	1870	2740	12,4	30,4	F35
II	1750	2680	16,7	18,7	F50
III	1670	2630	20,2	16,5	F50
IV	1680	2610	21	12,1	F50

ногенной добавки в протекании высокотемпературных реакций при обжиге керамики.

При исследовании пористости керамических образцов (рис. 5) можно отметить ее общее увеличение с ростом концентрации МК-30 в шихте. Причем открытая пористость пропорционально увеличивается, а закрытая, наоборот, снижается. Например, в образцах без добавки полная пористость составляет 31,7%, из которой почти 75% приходится на открытые поры. Введение 15 мас. % марганцевого концентрата в заводскую шихту приводит к незначительному увеличению общей пористости (в 1,1 раза), однако количество открытых пор при этом достигает 96,3%. Выявленные зависимости косвенно свидетельствуют о негативном влиянии добавки МК-30 на спекание керамики из заводской шихты, что согласуется с результатами исследований водопоглощения обожженных образцов (рис. 6).

Результаты исследования физико-механических свойств керамических образцов приведены в табл. 6.

Введение МК-30 в шихту приводит к снижению средней и истинной плотности образцов, причем если 10% техногенного красителя уменьшают ее более чем в 1,1 раза, то при дальнейшем увеличении добавки средняя плотность керамики практически не изменяется и составляет около 1650 кг/м³ (рис. 6). Одновременно с изменением средней плотности образцов происходит значительное увеличение их водопоглощения, особенно при добавлении в шихту МК-30 в количествах, превышающих 10 мас. % (соответственно в 1,6–1,7 раза).

Исследование зависимости прочностных характеристик керамических образцов от содержания добавки МК-30 показало, что предел их прочности при сжатии уменьшается более чем в 2,5 раза по сравнению с контрольным составом шихты (рис. 6). Причем

выраженное снижение физико-механических свойств керамического материала наблюдается при введении 10 мас. % и более добавки в глиномассу. Учитывая, что при использовании 5–15% красителя (рис. 1) уменьшается пластичность, а соответственно и связность глиномассы, происходит также и снижение сырцовопрочности образцов (соответственно в 1,5–4 раза).

Добавка МК-30 оказывает положительное влияние на морозостойкость образцов. Их испытания по ГОСТ 7025–91 «Кирпич и камни керамические и силикатные. Методы определения водопоглощения, плотности и контроля морозостойкости» показали, что техногенный краситель увеличивает стойкость керамического материала к попеременному замораживанию и оттаиванию (табл. 6).

Заключение

В результате научных исследований по объемному окрашиванию стеновых керамических материалов с целью возможного использования попутной продукции производства ферросиликомарганца (марганцевый концентрат МК-30) в качестве техногенной красящей добавки установлено следующее:

- зависимости физико-механических свойств образцов на основе керамической шихты кирпичного завода «Ликолор» свидетельствуют, в целом, о негативном влиянии добавки МК-30 в количестве 10–15% на процессы спекания при обжиге керамики;

- анализ внешнего вида керамических образцов показал, что введение МК-30 в заводскую шихту приводит к окрашиванию обожженных образцов в различные оттенки коричневого цвета. При этом добавка в количестве 5 мас. % не обеспечивает равномерной окраски по сравнению с 10–15%-м ее содержанием, при котором образцы окрашиваются в коричневый и темно-коричневый цвета;

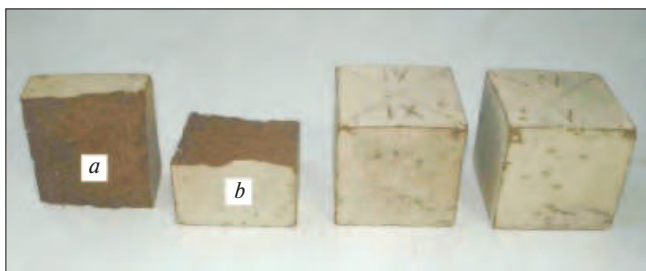


Рис. 7. Серия керамических образцов после обжига с добавкой МК-30 в количестве 5 мас. %: *a* – внутренний излом образца; *b* – внешняя поверхность

Fig. 7. A series of ceramic samples after firing with the addition of MK-30 in an amount of 5 wt. %: *a* – internal fracture of the sample; *b* – outer surface

– для получения объемно-окрашенных керамических образцов прочностью 17–18 МПа обжигом при 1030°C определен оптимальный состав шихты на основе глинистого сырья и попутной продукции производства ферросиликомарганца:

заводская шихта – 92–93 мас. %;
МК-30 – 7–8 мас. %.

Перспективы дальнейших исследований

Основываясь на законе единства и борьбы противоположностей, принимаем за правило, что увели-

чение количества марганцевого концентрата МК-30 в шихте, с одной стороны, усиливает окрашивающий эффект при обжиге керамики, а с другой – ухудшает их эксплуатационные свойства. Поэтому в перспективе количество добавки в шихте не должно превышать 4–5 мас. %. Для его достижения необходимо:

- выяснить природу образования налета на поверхности образцов с 5%-м содержанием МК-30. Предварительные исследования показали, что внутри образцов после обжига формируется равномерная окраска шоколадно-коричневого цвета (рис. 7), а в их поверхностном слое содержится большое количество свинцовых соединений (по химическому составу в пробе массовая доля PbO превышает 50%);
- исследовать действие добавки марганцевого концентрата с содержанием $MnO_{общ}$ в количестве 25–30% (табл. 1);
- исследовать физико-химические и фазовые превращения при обжиге, формирование макро- и микроструктуры керамики с добавкой МК-30 для целенаправленного регулирования процессов спекания материала.

Решение поставленных вопросов обуславливает перспективы дальнейших научных исследований.

Список литературы

1. Король С.П., Гончаров В.С. Разработка технологии керамического кирпича объемного окрашивания // *Строительные материалы*. 1994. № 2. С. 12–14.
2. Альперович И.А., Смирнов А.В. Лицевой керамический кирпич объемного окрашивания в современной архитектуре // *Строительные материалы*. 1990. № 12. С. 4–6.
3. Пищ И.В., Масленникова Г.Н., Гвоздева Н.А., Климош Ю.А., Барановская Е.И. Методы окрашивания керамического кирпича // *Стекло и керамика*. 2007. № 8. С. 15–18.
4. Василевич М.С., Кудревич С.К., Урбанович В.С., Бондаренко С.А. Лицевой объемно-окрашенный кирпич на основе смеси глин различного минералогического состава. *Научно-технические проблемы производства и повышения потребительских свойств строительных материалов и изделий: Сборник докладов международного семинара*. Минск, 2004. С. 50–53.
5. Езерский В.А., Панферов А.И. Каолинитовая глина Новоорского месторождения – эффективная добавка в производстве лицевого кирпича и клинкера // *Строительные материалы*. 2012. № 5. С. 19–21.
6. Петелин А.Д., Сапрыкин В.И., Клевакин В.А., Клевакина Е.В. Особенности применения глин Нижнеуельского месторождения в производстве керамического кирпича // *Строительные материалы*. 2015. № 4. С. 28–30.
7. Богдановский А.Л., Пищик А.В. Применение глин месторождения Большая Карповка в произ-

References

1. Korol' S.P., Goncharov V.S. Development of ceramic brick technology for volumetric coloring. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 1994. No. 2, pp. 12–14. (In Russian).
2. Al'perovich I.A., Smirnov A.V. Facial ceramic brick of volumetric coloring in modern architecture. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 1990. No. 12, pp. 4–6. (In Russian).
3. Pishch I.V., Maslennikova G.N., Gvozdeva N.A., Klimosh Yu.A., Baranovskaya E.I. Methods for ceramic bricks staining. *Steklo i keramika*. 2007. No. 8, pp. 15–18. (In Russian).
4. Vasilevich M.S., Kudrevich S.K., Urbanovich V.S., Bondarenko S.A. Facial volumetrically colored brick based on a mixture of clays of different mineralogical composition. *Scientific and technical problems of production and improvement of consumer properties of building materials and products: Collection of reports of the international seminar*. Minsk. 2004, pp. 50–53. (In Russian).
5. Ezerskiy V.A., Panferov A.I. The kaolinite clay of the Novoor deposit is an effective additive in the production of face brick and clinker. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2012. No. 5, pp. 19–21. (In Russian).
6. Petelin A.D., Saprykin V.I., Klevakin V.A., Klevakina E.V. Features of the use of clays from the Nizhneuvelskoye deposit in the production of ceramic bricks. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2015. No. 4, pp. 28–30. (In Russian).
7. Bogdanovskiy A.L., Pishchik A.V. The use of clays from the Bolshaya Karpovka deposit in the production of

- водстве строительной керамики // *Строительные материалы*. 2012. № 5. С. 22–25.
8. Резник В.И. Возможности получения кирпича облицовочного и клинкерного светлых тонов на базе глин ПГ «Кислотоупор» // *Строительные материалы*. 2011. № 4. С. 54–55.
 9. Талпа Б.В. Перспективы развития минерально-сырьевой базы для производства светложгущейся стеновой керамики на Юге России // *Строительные материалы*. 2014. № 4. С. 20–23.
 10. Альперович И.А. Производство лицевого кирпича. М.: ВНИИЭСМ. 1978. 154 с.
 11. Альперович И.А., Варламов В.П., Лебедева Е.П. Получение лицевого глиняного кирпича методом объемного окрашивания массы марганцевой рудой // *Сборник трудов ВНИИСтрома*. 1975. № 33 (61). С. 39–44.
 12. Galindo R., Gargori C., Fas N., Llusar M., Monrós G. New chromium doped powellite (Cr–CaMoO₄) yellow ceramic pigment // *Ceramics International*. 2015. Vol. 41. Iss. 5. Part A. pp. 6364–6372. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2015.01.071>
 13. Кингери У.Д. Введение в керамику. М.: Стройиздат, 1967. 499 с.
 14. Масленникова Г.Н., Пищ И.В. Керамические пигменты. М.: Стройматериалы, 2009. 224 с.
 15. Ewans W.D. Ceramic pigments: a structural approach // *Trans. Brit. Ceram.* 1968. No. 9. pp. 397–419.
 16. Туманов С.Г. Новые пути синтеза и классификация керамических пигментов // *Стекло и керамика*. 1967. № 6. С. 36–38.
 17. Седельникова М.Б., Погребенков В.М., Кауцман Е.Я., Горбатенко В.В. Керамические пигменты для строительной керамики // *Стекло и керамика*. 2009. № 9. С. 3–6.
 18. Езерский В.А. Количественная оценка цвета керамических лицевых изделий // *Строительные материалы*. 2015. № 8. С. 76–80.
 19. Мойсов Г.Л. Разработка эффективных хромофорных добавок для выпуска цветного керамического кирпича на предприятиях Краснодарского края // *Строительные материалы*. 2001. № 10. С. 16–18.
 20. Costa A.L., Matteucci F., Dondi M., Zama I., Albonetti S., Baldi G. Heterocoagulation-spray drying process for the inclusion of ceramic pigments // *Journal of the European Ceramic Society*. 2008. No. 28. pp. 169–176. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2007.06.014>
 21. Столбоушкин А.Ю. Улучшение декоративных свойств стеновых керамических материалов на основе техногенного и природного сырья // *Строительные материалы*. 2013. № 8. С. 24–29.
 22. Котляр В.Д., Явруян Х.С., Божко Ю.А., Небезко Н.И. Особенности производства лицевого керамического кирпича мягкой формовки на основе опоковидных пород // *Строительные материалы*. 2019. № 12. С. 18–22. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-777-12-18-22>
- building ceramics. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2012. No. 5, pp. 22–25. (In Russian).
 8. Reznik V.I. Possibilities of obtaining light-colored facing and clinker bricks based on clays from PG Kislotoupor. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2011. No. 4, pp. 54–55. (In Russian).
 9. Talpa B.V. Prospects for the development of the mineral resource base for the production of light-burning wall ceramics in the South of Russia. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2014. No. 4, pp. 20–23. (In Russian).
 10. Al'perovich I.A. Proizvodstvo litsevogo kirpicha [Face brick production]. Moscow: VNIIESM. 1978. 154 p.
 11. Al'perovich I.A., Varlamov V.P., Lebedeva E.P. Obtaining a front clay brick by the method of volumetric coloring of the mass with manganese ore. *Sbornik trudov VNIISTroma*. 1975. No. 33 (61), pp. 39–44. (In Russian).
 12. Galindo R., Gargori C., Fas N., Llusar M., Monrós G. New chromium doped powellite (Cr–CaMoO₄) yellow ceramic pigment. *Ceramics International*. 2015. Vol. 41. Iss. 5. Part A, pp. 6364–6372. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2015.01.071>
 13. Kingeri U.D. Vvedenie v keramiku [Introduction to ceramics]. Moscow: Stroyizdat. 1967. 499 p.
 14. Maslennikova G.N., Pishh I.V. Keramicheskie pigmenty [Ceramic pigments]. Moscow: Stroymaterialy. 2009. 224 p.
 15. Ewans W.D. Ceramic pigments: a structural approach. *Trans. Brit. Ceram.* 1968. No. 9, pp. 397–419.
 16. Tumanov S.G. New ways of synthesis and classification of ceramic pigments. *Steklo i keramika*. 1967. No. 6, pp. 36–38. (In Russian).
 17. Sedel'nikova M.B., Pogrebenkov V.M., Kautsman E.Ya., Gorbatenko V.V. Ceramic pigments for building ceramics. *Steklo i keramika*. 2009. No. 9, pp. 3–6. (In Russian).
 18. Ezerskii V.A. Quantitative color assessment of ceramic facial products. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2015. No. 8, pp. 76–80. (In Russian).
 19. Mojsov G.L. The development of effective chromophore additives for the production of colored ceramic bricks at the enterprises of the Krasnodar Territory. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2001. No. 10, pp. 16–18. (In Russian).
 20. Costa A.L., Matteucci F., Dondi M., Zama I., Albonetti S., Baldi G. Heterocoagulation-spray drying process for the inclusion of ceramic pigments. *Journal of the European Ceramic Society*. 2008. No. 28, pp. 169–176. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2007.06.014>
 21. Stolboushkin A.Yu. Improving decorative properties of ceramic wall materials produced of technogenic and natural resources. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2013. No. 8, pp. 24–29.
 22. Kotlyar V.D., Yavruyan Kh.S., Bozhko Y.A., Nebezko N.I. Features of the production of ceramic facing brick soft molding on the basis of opoka-like rocks. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2019. No. 12, pp. 18–22. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-777-12-18-22>

Новая серия валцов супертонкого помола TERRA от компании **Verdés**

Как было отмечено в предыдущей публикации (статья «Процесс тонкого помола глины через призму теории», журнал «Строительные материалы» № 4-2022, с. 14), валковая мельница представляет собой машину для вторичного измельчения и/или финишного помола, обычно используемую при пластическом способе подготовке керамического сырья. Машина состоит из двух валков с параллельными осями, вращающихся навстречу друг другу.

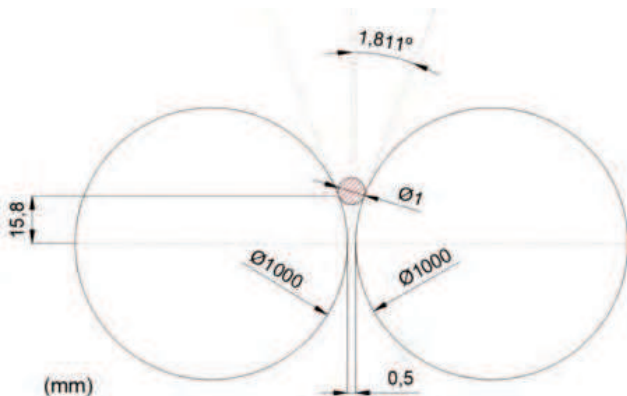
В настоящей статье компания Verdés, опираясь на изложенный в предыдущей публикации математический аппарат, намерена применить его к новейшей серии валцов тонкого и супертонкого помола под названием TERRA.

Расчеты

$$D = 1 \text{ м} \quad d = 0,001 \text{ м} \quad S = 0,0005 \text{ м}$$

$$FA = 100000 \text{ кгс} \quad \alpha = 1,811^\circ$$

Подставим значения, определяемые конструкцией валцов супертонкого помола модели TERRA от компании Verdés. Получившаяся в итоге картина представлена на рисунке ниже.



Статическое состояние

Если внимательно проанализируем статические условия, то скорость не является фактором влияния, следовательно, наибольшая допустимая крупность исходного материала:

$$d = \frac{D+S}{\cos \alpha} - D = \frac{1+0,0005}{\cos 1,811^\circ} - 1 = 0,001 \text{ м} = 1,0 \text{ мм.}$$

А точка контакта размалываемой частицы с поверхностью валка будет находиться на следующей высоте:

$$h = \frac{D}{2 \sin \alpha} = \frac{1}{2 \sin 1,811^\circ} = 15,8 \text{ мм.}$$

Динамическое состояние

Анализируя возникающие при динамических условиях силы, получаем следующее уравнение, определяющее, исходя из размера частицы и размера валков, с какой наибольшей частотой вращения валки должны вращаться навстречу друг другу, чтобы захватить и затянуть размалываемую частицу.

$$V = \sqrt{\frac{q}{4} \cdot (D+d) \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{D+S}{D+d}\right)^2}} + \frac{\mu \cdot (D+d)}{D+S} \right)}.$$

Зададимся коэффициентом трения 0,3, поскольку эмпирическим путем установлено, что коэффициент трения между чугунной поверхностью и частицами большинства рудных минералов лежит в пределах от 0,2 до 0,3.

Значение коэффициента трения уменьшается с увеличением частоты вращения валка.

Значение коэффициента трения между частицей и движущимися валками можно рассчитать по следующей формуле:

$$\mu_k = \left(\frac{1+1,12v}{1+6v} \right) \cdot \mu.$$

Рассматриваем диаметр размалываемых частиц как величину, зависящую от соотношения между крупностью исходного материала и диаметром валков.

Следовательно, справедливо следующее выражение:

$$R + e = (R + r) \cdot \cos \alpha.$$

Анализируя предыдущее уравнение, приходим к следующему выводу о зависимости между размером частиц и окружной скорости валков наших валцов, которая изображена в виде соответствующего графика на рисунке ниже. Для проведения сравнения взяты валцы с диаметром валков 1000 мм и межвалковым зазором 1,0 мм, причем производится размол материала с коэффициентом трения между поверхностью валков и материала, равным 0,38.

Будем сравнивать при таких окружных скоростях: 0; 1; 3; 6; 10; 14; 18; 22; 25 м/с. При этом результаты получены следующие:

Окружная скорость валков, м/с	Коэффициент трения μ_k	Наибольшая крупность d_{\max} , мм
0	0,38	77,89
1	0,115	6,659
3	0,087	4,195
6	0,079	3,267
10	0,076	3,273
14	0,075	2,868
18	0,074	2,803
22	0,073	2,764
25	0,073	2,743



Тезис, изложенный выше, хорошо соотносится с известным практическим наблюдением, состоящим в том, что, будучи слишком крупными, комья размалываемого материала не затягиваются между валками до тех пор, пока частота вращения валков машины не упадет до какого-то минимального значения или пока машина практически полностью не остановится.

Из графика также видно, что связь, которая существует между уменьшением коэффициента трения размалываемых частиц и поверхностью бандажей валцев, а также окружной скоростью поверхности валков, является гиперболической функцией, асимптотически приближающейся к оси ординат.

Принцип действия

На изображении, демонстрирующем принцип действия, стрелками обозначено давление, оказываемое гидроцилиндрами. Расчетное давление между цилиндрами эквивалентно 100 т.

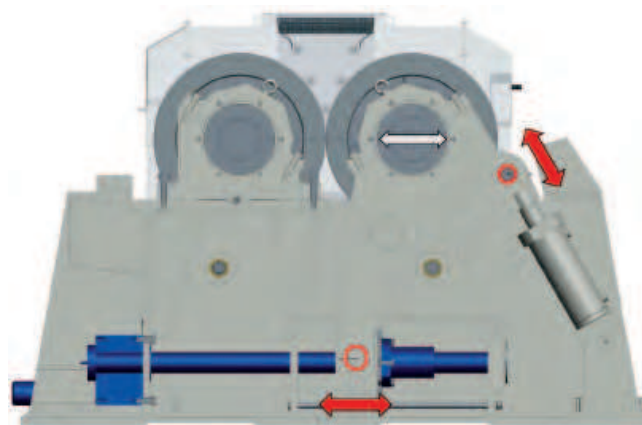
Вальцы супертонкого помола TERRA сконструированы с целью обеспечения минимальной тонины помола керамического сырья при высокой производительности. Широкий модельный ряд позволяет закрыть весь спектр существующих на рынке потребностей касательно как требований к зазору, так и к производительности.

Конструкция валцев обеспечивает повышенную надежность благодаря своей высокой прочности и жесткости. Также конструкцией предусмотрен легкий доступ для быстрой замены скребков.

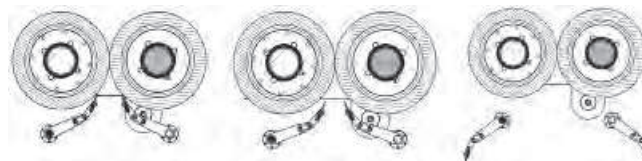
Высокое усилие прижима валков можно регулировать либо поддерживать постоянным посредством двух гидравлических цилиндров. С помощью специальной механической системы обеспечивается требуемый зазор между валками.

Посредством двух синхронизированных гидроцилиндров подвижный валок приближается к неподвижному. С помощью прецизионной системы поддерживается требуемый минимальный зазор между валками.

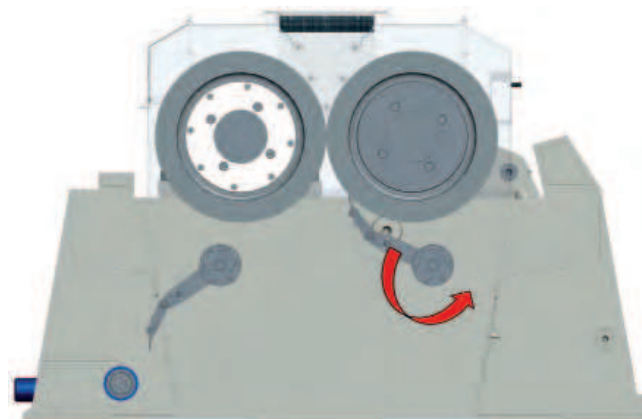
При необходимости гидравлическая система позволяет развести валки на расстояние, достаточное для прохождения между ними недробимого тела, оказавшегося в валцах.



Регулировка зазора между валками



Различные положения скребков



Работа скребков

Модель ¹	Производительность ² , м ³ /ч (19, 21, 24 м/с)				Мощность двигателей	Рабочая ширина	Диаметр валков
	Зазор = 0,8	Зазор = 0,7	Зазор = 0,6	Зазор = 0,5			
TERRA							
600	20 – 22 – 25 м ³ /ч	16 – 17 – 20 м ³ /ч	11 – 12 – 14 м ³ /ч	8 – 9 – 10 м ³ /ч	45 – 55 – 75 кВт	600 мм	1000
800	26 – 29 – 32	21 – 23 – 26 м ³ /ч	14 – 16 – 18 м ³ /ч	11 – 12 – 14 м ³ /ч	60 – 75 – 90 кВт	800 мм	
1000	33 – 36 – 41 м ³ /ч	26 – 29 – 33 м ³ /ч	12 – 20 – 23 м ³ /ч	14 – 15 – 17 м ³ /ч	75 – 90 – 110 кВт	1000 мм	
1200	40 – 43 – 49 м ³ /ч	32 – 35 – 39 м ³ /ч	22 – 24 – 27 м ³ /ч	17 – 18 – 20 м ³ /ч	90 – 110 – 132 кВт	1200 мм	
1400	46 – 50 – 57 м ³ /ч	37 – 40 – 46 м ³ /ч	26 – 28 – 32 м ³ /ч	19 – 21 – 24 м ³ /ч	110 – 132 – 160 кВт	1400 мм	

¹ Вальцы с усилием прижима между валками 100 кг на погонный мм длины бандажа. Наружный диаметр валков 1000 мм.
² В зависимости от величины межвалкового зазора и частоты вращения валков.

По вопросам внедрения на вашем производстве технических решений с использованием финишных валцев TERRA производства компании Verdes (работа на зазорах 0,5–0,6 мм) обращайтесь в

Представительство АО «Тальерес Фелипе Вердес, С. А.» (Испания) г. Москва

Российская Федерация, 119021, г. Москва,
ул. Льва Толстого, д. 5/1, офис В-710 (7-й этаж)

Контактные телефоны:

+7 495 544 77 92

+7 916 554 64 88

+7 926 084 67 84

russia@verdes.com

www.verdes.ru

TALLERES FELIPE VERDÉS, S. A.

C/ Metalurgia, 2

08788 Vilanova del Camí (Barcelona) — Spain

T. +34 93 806 06 06 — F. +34 93 806 04 11

www.verdes.com

Запчасти для европейского оборудования







РМЗ «Нихард-сервис»
456208, Челябинская область,
г. Златоуст, ул. Садовая, 10Б



+7(351) 777-62-09
8(800) 444-14-01
(звонки бесплатны)



rmz.nihard@mail.ru
nihard-servis@mail.ru



www.nihard.anosov74.ru

Реклама



Общество с ограниченной ответственностью «ВЭЛТ»

Общество с ограниченной ответственностью «ВЭЛТ» успешно работает на рынке с 1992 г., является одним из первых не государственных предприятий, занимающихся техническим надзором и контролем при строительстве, реконструкции и капитальном ремонте автодорог и аэродромов.

Основные объекты и проекты, реализованные ООО «ВЭЛТ» в качестве независимой инженерной организации, осуществляющей технический надзор, строительный и лабораторный контроль за строительством, реконструкцией и капитальным ремонтом: М-4 «Дон», А-104, М-7 «Волга», А-134, А-108 «Московское большое кольцо», М-5 «Урал», 1Р-119 «Орел-Тамбов», «Восточный обход промышленной зоны г. Липецка», искусственные сооружения через железнодорожные пути в г. Воронеж.

В собственности ООО «ВЭЛТ» находится лаборатория, оснащенная самым современным испытательным оборудованием, позволяющая проводить испытания широкого спектра строительных материалов и конструкций. Лаборатория аккредитована в Федеральной службе по аккредитации (Росаккредитация), аттестат аккредитации № RA.RU.21H073. Все лабораторное оборудование организации сертифицировано и проходит ежегодную аттестацию и поверку.

ООО «ВЭЛТ» выполняет диагностику и паспортизацию автодорог. Современная передвижная дорожная лаборатория КП-514 МП оснащена профилометром для определения международного показателя ровности IRI, гироскопической системой, системами панорамной видеосъемки автодорог и глобального позиционирования, что позволяет определять параметры существующей, реконструированной или отремонтированной дороги.





394026, г. Воронеж, Московский пр-т, д. 11 «И»
E-mail: velt@mail.ru Тел.: 8 (473) 221-07-30; 8 (473) 261-06-90

Реклама

УДК 691.421

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-813-5-25-29>

Ю.А. БОЖКО¹, инженер (ассистент) (ovdun_ys@mail.ru),
 Д.А. ОВДУН¹, магистрант (ovdun.dima@mail.ru); М.Ю. ПАРТЫШЕВ² (rapir22@yandex.ru)

¹ Донской государственный технический университет (344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1)

² Индивидуальный предприниматель (г. Новочеркасск)

Синтетический волластонит — перспективная добавка при производстве лицевого керамического кирпича светлых оттенков

Одной из острых проблем в керамической отрасли является дефицит светложгущихся глин, используемых при выпуске кирпича белого цвета. Поэтому одним из актуальных направлений является поиск технологических решений по осветлению имеющегося сырья. Известным и проверенным вариантом является ввод в состав шихты волластонита, который представляет собой силикат кальция CaSiO_3 , где оксид кальция содержится в количестве около 48%, а диоксид кремния – около 52%. Минерал имеет игольчатый или таблитчатый габитус частиц. Данное сырье обладает рядом уникальных свойств и высоким уровнем белизны. В статье рассмотрена тема распространения волластонита и его применения в условиях современной промышленности. Отмечено, что массовое применение природный волластонит имеет в США и Китае, где он внесен в список стратегического сырья. На территории России на данный момент нет действующих месторождений. Одним из перспективных является Слюдянское, однако оно более 10 лет не функционирует. Введение волластонита в керамическую массу снижает температуру обжига, минимизирует усадку, что приводит к пониженному проценту брака на производстве. Синтез искусственного волластонита на сегодняшний день реализуем на основе нескольких технологий. Воспользовавшись одной из них, в качестве основного сырья выбрав опал-карбонатную породу Партышевского месторождения Ростовской области, авторы получили пробную партию синтетического волластонита. Проведенные лабораторные испытания показали эффективность его применения в качестве осветлителя как на тугоплавких светлых глинах, так и на темножгущихся легкоплавких. В дальнейшем предстоит большая работа по оптимизации технологии синтеза волластонита и изучению его влияния на свойства керамических изделий.

Ключевые слова: керамическая промышленность, волластонит, синтез, опал-карбонатная порода, мергель, лицевой кирпич светлых оттенков.

Для цитирования: Божко Ю.А., Овдун Д.А., Партышев М.Ю. Синтетический волластонит – перспективная добавка при производстве лицевого керамического кирпича светлых оттенков // *Строительные материалы*. 2023. № 5. С. 25–29.

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-813-5-25-29>

Yu.A. BOZHKO¹, Engineer, Assistant (ovdun_ys@mail.ru); D.A. OVDUN¹, Undergraduate (ovdun.dima@mail.ru); M.Yu. PARTYSHEV² (rapir22@yandex.ru)

¹ Don State Technical University (1, Gagarina Square, Rostov-on-Don, 344010, Russian Federation)

² Individual entrepreneur (Novocherkassk, Russian Federation)

Synthetic Wollastonite is a Promising Additive in the Production of Light-Colored Facing Ceramic Bricks

One of the acute problems in the ceramic industry is the shortage of light-melting clays used in the production of white bricks. Therefore, one of the relevant directions is the search for technological solutions for the clarification of existing raw materials. A well-known and proven option is the introduction of wollastonite into the charge, which is a calcium silicate CaSiO_3 , where calcium oxide is contained in an amount of about 48%, and silicon dioxide – about 52%. The mineral has a needle-like or tabular habit of particles. This raw material has a number of unique properties and a high level of whiteness. The article deals with the topic of distribution of wollastonite and its application in modern industry. Natural wollastonite is widely distributed in the USA and China, where it is listed as a strategic raw material. There are currently no active deposits on the territory of Russia. One of the most promising is the Slyudyanskoye, however, it has not been functioning for more than 10 years. The introduction of wollastonite into the ceramic mass reduces the firing temperature, minimizes shrinkage, which leads to a reduced percentage of defects in production. The synthesis of artificial wollastonite is currently being implemented on the basis of several technologies. Using one of them, and choosing the opal-carbonate rock of the Partyshevsky deposit of the Rostov region as the main raw material, the authors obtained a trial batch of synthetic wollastonite. Laboratory tests conducted have shown the effectiveness of its use as a clarifier on both refractory light clays and dark-burning low-melting ones. Next, a lot of work is to be done to optimize the technology of wollastonite synthesis and study its effect on the properties of ceramic products.

Keywords: ceramic industry, wollastonite, synthesis, opal-carbonate rock, marl, face brick of light shades.

For citation: Bozhko Yu.A., Ovdun D.A., Partyshev M.Yu. Synthetic wollastonite is a promising additive in the production of light-colored facing ceramic bricks. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2023. No. 5, pp. 25–29. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-813-5-25-29>

Современный рынок стеновой керамики является весьма динамичным и старается отвечать запросам потребителей. На данный момент лидирующие позиции сохраняют темные цвета лицевого кирпича: серого, графитового, фиолетового, черного, бордового и темно-коричневого оттенков. Данный эффект получается либо способом объемного окрашивания, либо путем нанесения декорирующих составов на

поверхность. Базой для таких изделий может являться керамический камень красного цвета, сырьевые ресурсы для получения которого широко распространены [1, 2].

Классическим ассортиментом практически каждого завода является однотонный кирпич более привычных и свойственных керамике цветов: красного, желтого, белого, коричневого и их оттенков.

Производство светлого кирпича возможно лишь на основе беложгущихся глин, запасы которых весьма ограничены [3–5]. Нехватка качественного сырья приводит к отказу некоторых заводов от выпуска части базового ассортимента – кирпича белого, серого, бежевого и кремового цветов.

Уход с рынка украинских светлых глин последние два года существенно обострил ситуацию. Месторождения светлых тугоплавких глин в европейской части страны немногочисленны и не способны закрывать потребности кирпичных заводов. Поэтому актуальным и перспективным исследованием на данный момент является поиск альтернативных источников и путей осветления керамической массы.

Одним из известных способов осветления массы является ввод волластонита. Он представляет собой силикат кальция CaSiO_3 , где содержание оксида кальция составляет около 48%, а диоксида кремния – оставшиеся 52%. Образованию природного волластонита способствует контактный метаморфизм, при котором магматические породы попадают в толщи известняков, образуя волластонитовые скарны [6]. Минерал имеет игольчатый или таблитчатый габитус частиц. Волластонитовое сырье обладает рядом уникальных химических и физико-механических свойств, положительным образом влияющих на

характеристики изделий. Среди них высокая химическая стойкость в агрессивных средах, диэлектрические свойства, низкая теплопроводность, высокая белизна и игольчатость. Помимо этого, продукт безопасен в применении и экологически чист [7].

Основными потребителями природного волластонита являются производства керамических изделий, композиционных полимеров, красок, резинотехнических и фрикционных изделий, металлургия. К примеру, в США и Китае он внесен в список стратегического сырья. В нашей стране, согласно распоряжению Правительства РФ от 30 августа 2022 г. № 2473-р «Об утверждении перечня основных видов стратегического минерального сырья», он в такой перечень не входит [8].

На мировом рынке волластонитовая руда стоит около 60–80 \$ США за тонну, а после обогащения цена на волластонитовый концентрат поднимается до 200–600 \$ США за тонну. Компания АО «Геоком» (Калужская обл.) позиционирует себя как единственного производителя микроволластонита в России. На базе их производства природный материал проходит модификацию и очистку, поступая в продажу под брендом «Миволл». Средняя цена за 1 т составляет порядка 62 тыс. р. Другие же компании, имеющие в своем ассортименте волластонит, импортируют его преимущественно из

Китая, а его цена имеет широкий диапазон от 65 до 212 тыс. р. за тонну.

Введение волластонита в керамическую массу снижает температуру обжига, минимизирует усадку, что приводит к уменьшенному проценту брака на производстве. Проведенные ранее исследования и практический опыт применения показали, что ввод в состав шихты до 40% волластонита дает возможность организации скоростного обжига без потери потребительских свойств, одновременно снижая энергетические затраты. Особенно это актуально при технологии производства керамической глазурованной плитки [9].

В настоящее время минерально-сырьевая база природного волластонита не способна закрывать все потребности рынка. Единственное перспективное российское месторождение – Слюдянское уже более 10 лет не функционирует. Это связано с содержанием большого количества примесей и высоких затрат на обогащение волластонита. Все поставки на территорию страны осуществляются из других стран: Китая, США, Индии, Финляндии и стран СНГ. Как следствие, высокая стоимость продукции делает его применение в керамической отрасли нерентабельным, хотя именно эта производственная сфера нуждается в нем больше всего. Спрос на

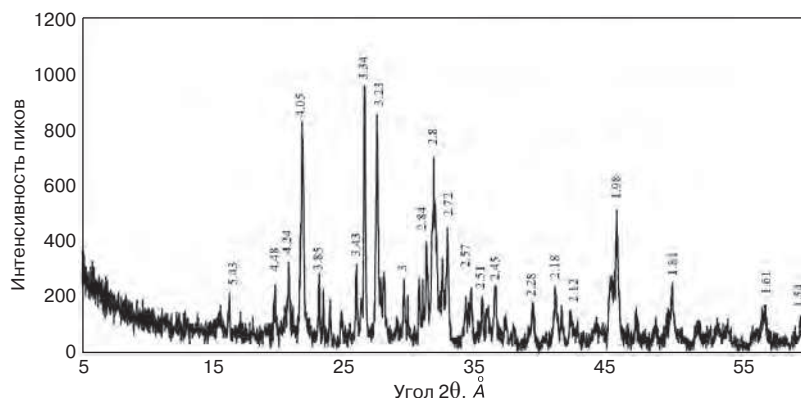


Рис. 1. Рентгенограмма синтетически полученного волластонита на основе мела и кварцевого песка

Fig. 1. Radiograph of synthetically obtained wollastonite based on chalk and quartz sand

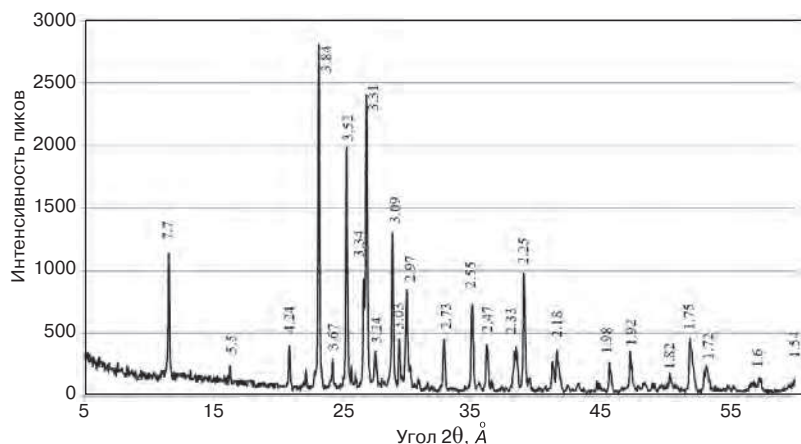


Рис. 2. Рентгенограмма микроволластонита «Миволл»

Fig. 2. Radiograph of microvullastonite «Mivoll»

клинкерную строительную продукцию растет с каждым днем, а запасы качественного тугоплавкого сырья ограничены. Минерал волластонит снижает температуру спекания, что позволяет получить изделие с низким водопоглощением и высокой прочностью. Важной и бесценной особенностью волластонита является его способность осветлять массу за счет высокой степени белизны мелкодисперсного порошка. Также он является альтернативой дорогостоящего диоксида титана и заменителем асбеста [10].

Учитывая логистические и таможенные расходы на импорт природного волластонита в Россию, можно назвать нерентабельным его применение во многих отраслях промышленности, в том числе и керамической. Перспективным же направлением является использование искусственно синтезированного волластонита, который может быть получен на основе опал-кристобалитовых известняков. Это позволит применять его в такой высокомаржинальной продукции, как кирпич мягкого формования (ручной формовки), стеновой клинкер и брусчатка, ригельный кирпич и фасадные керамические плиты, а также террасные керамогранитные плиты и аксессуары: подоконники, накрывочные шляпы на столбы и профильный кирпич для забора.

Производство искусственно синтезированного волластонита на сегодняшний день реализуемо на основе нескольких технологий. Наиболее распространенным является обжиг тонкодисперсной смеси кварцевого песка и чистого известняка с последующим расплавом при температуре выше 1400–1500°C. Важно, чтобы данный расплав охлаждался медленно, ведь на первом этапе образуется так называемый псевдоволластонит, а затем при последующем охлаждении и сам волластонит. Следующим является способ гидротермального получения материала, где задействована температура в диапазоне 300–700°C, а также давление до 200 атм [11, 12]. Такие способы производства являются энергозатратными, что сказывается на себестоимости материала. Процесс полиморфного превращения волластонита в псевдоволластонит происходит при 1115–1135°C, а скорость самой инверсии прямо пропорциональна температуре. Например, при 1140–1160°C процесс занимает 40–60 ч, а при 1125–1135°C – до нескольких суток [13]. На рис. 1 приведена рентгенограмма синтетического волластонита, полученного авторами в лабораторных условиях из смеси кварцевого песка и мелоподобного известняка при температуре свыше 1350°C.

В качестве эталонного образца в работе использовался микроволластонит «Миволл». Визуально это тонкодисперсный порошок белого цвета, без приме-



Рис. 3. Выходы опал-карбонатных пород Партышевского месторождения мергеля, пригодного для получения волластонита

Fig. 3. Outcrops of opal-carbonate rocks of the Partyshevsky marl deposit suitable for the production of wollastonite

сей различных оттенков. Размер частиц колеблется от 0,2 до 50 мкм, а большая часть находится в диапазоне 9,54–28,8 мкм, что подтверждается результатами исследований на приборе Micro Sizer 201. На рис. 2 приведена рентгенограмма микроволластонита «Миволл».

Как видно из приведенных рентгенограмм (рис. 1, 2), основные пики волластонита (2,96; 3,3; 1,7; 2,16; 1,59; 3,88; 2,32; 1,82 Å) проявлены слабо, что говорит о невысоком его содержании в продукте. Однако замечены пики высокотемпературного псевдоволластонита, который имеет кольцевое строение. Данный тип не является эффективным при вводе в керамические массы. Наноигольчатую и нанотаблитчатую форму частиц считают пригодной для применения с целью снижения усадки и осветления массы. Также стоит отметить, что наличие других минералов, помимо волластонита, не является отрицательным моментом в технологии керамики и других отраслях промышленности.

Имея достаточный объем исследований кремнистых опалкристобалитовых пород Юга России, можно сказать, что на данной территории широко распространены образования мелового и палеогенового периодов [10, 12, 13]. Для них характерно посто-

Химический состав отобранных проб Партышевского месторождения мергеля
Chemical composition of the selected samples of the Partyshevsky marl deposit

Проба	ППП	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃ + FeO	CaO	MgO	SO ₃ общ.	TiO ₂	P ₂ O ₅	K ₂ O	Na ₂ O
1	18,48	48,22	4,37	1,92	22,32	1,47	0,03	0,43	0,09	1,19	0,78
2	20,44	43,05	4,32	1,86	25,31	0,6	0,05	0,42	0,1	1,16	0,44
3	21,75	39,4	4,67	1,76	28,9	0,42	0,1	0,49	0,12	0,97	0,39
4	25,71	34,58	4,1	1,66	31,39	0,88	0,03	0,33	0,08	1,02	0,47

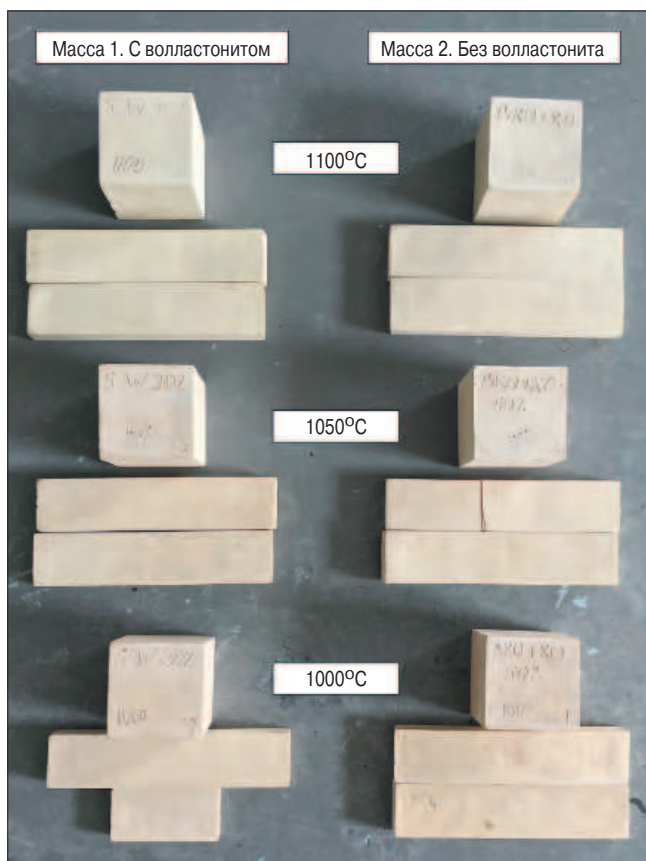


Рис. 4. Примеры лабораторных образцов на основе масс с wollastonитом и без него, обожженные при различной температуре
Fig. 4. Examples of laboratory samples based on masses with and without wollastonite, fired at different temperatures

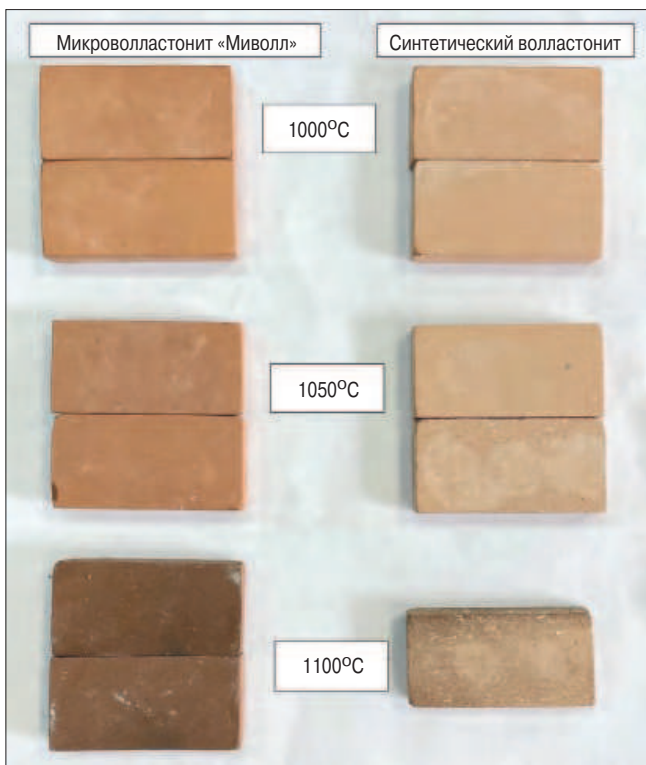


Рис. 5. Образцы на основе темножгущихся легкоплавких глин и двух видов wollastonита, обожженные при различной температуре
Fig. 5. Samples based on dark-melting low-melting clays and two types of wollastonite, fired at different temperatures

янное изменение накопления осадков, что привело к симбиозу жизненного цикла организмов с карбонатной и кремнистой функцией. У таких пород наблюдается плавный переход от карбонатной породы до кремнистых опок.

Проанализировав все вышеперечисленные данные, авторы выделили наиболее перспективное месторождение мергеля – Партышевское, находящееся в Ростовской области (рис. 3). Основным и приоритетным фактором являлось пониженное содержание оксида железа – до 2%, что прямым образом отражается на белизне материала.

Особенностью данного месторождения является большая мощность отложений карбонатно-опаловых пород и постепенное изменение соотношений карбонатной и кремнистой составляющих, а также практически равные отношения оксида кремния и оксида кальция в нижних горизонтах (таблица).

Как видно из таблицы, наиболее подходящей по химическому составу является проба № 4. На ее основе была изготовлена пробная партия синтетического wollastonита. Цвет тонкодисперсного порошка получился светлым с оттенком бежевого. Даже низкое содержание оксида железа влияет на конечный цвет материала.

В лабораторных условиях авторами были получены пробные образцы на основе двух масс: первая содержала тугоплавкую глину и саму карбонатно-кремнистую породу в соотношении 50:50%, а во вторую массу было введено 20% синтетического wollastonита. Таким образом, получили массу следующего состава: 50% тугоплавкой глины, 30% мергеля и 20% wollastonита. Основной целью было определить, насколько введение в состав массы wollastonита способно осветлить цвет керамического камня. На рис. 4 приведены фото полученных лабораторных образцов, обожженных при температуре 1000, 1050 и 1100°C.

Наиболее близкий результат к искомому получился у образцов с 20%-м содержанием wollastonита при температуре обжига 1100°C. Материал получился холодного светлого цвета без оттенков розового, чего ранее не удавалось добиться. Также следует отметить, что при всех температурах обжига камень с добавлением wollastonита оказывался на тон светлее обычной массы.

Также были проведены сравнительные испытания между wollastonитом, полученным в лабораторных исследованиях, и промышленным «Миволлом». В качестве базового сырья были выбраны темножгущиеся легкоплавкие глины, где высокое содержание оксида железа при обжиге дает коричневый цвет. В состав массы было введено 30% wollastonитового сырья. Полученные результаты оказались весьма интересными. Несмотря на то что микроwollastonит «Миволл» обладает высокой степенью белизны и даже визуально белее, его осветляющая способность оказалась хуже. На рис. 5 приведены фотографии полученных образцов.

Как видно, камень на основе темножгущихся легкоплавких глин и синтетического волластонита визуально выглядит существенно светлее. С повышением температуры обжига материал приобретает более насыщенный коричневый оттенок и появляются следы пережога, что говорит об интенсификации спекания при вводе волластонита. Низкую осветляющую способность «Миволла» можно объяснить не недостаточной концентрацией волластонита игольчатой структуры, а преобладанием псевдоволластонита.

Процесс изучения синтетического волластонита является перспективным и особенно актуальным в ситуации с дефицитом светлых глин. Однако его сферы применения гораздо шире: лакокрасочные производства, пластмассы и резинотехнические изделия, фрикционные изделия, металлургия, огнеупоры и т. д.

Исследования по разработке наиболее оптимальной технологии синтеза волластонита, а также изучение его влияния на свойства керамических изделий будут продолжаться. Необходимо подобрать составы шихты для получения изделий с заданной цветовой гаммой и техническими характеристиками.

Список литературы

- Абрахимов В.З. Волластонит в керамических материалах // *Огнеупоры и техническая керамика*. 2006. № 7. С. 41–47.
- Будников П.П., Полубояринов Д.Н. Химическая технология керамики и огнеупоров. М.: Стройиздат, 1972. 551 с.
- Чистяков Б.З. Волластонит. М.: Наука, 1982. 212 с.
- Ильичева Е.С., Готлиб Е.М., Пашин Д.М., Буданова Т.В. Волластонит как эффективный наполнитель полимерных материалов // *Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева*. 2013. № 2. Вып. 1. С. 49–53.
- Гусев А.И. Минерально-сырьевая база волластонита Горного Алтая // *Современные наукоемкие технологии*. 2011. № 2. С. 11–16.
- Корнеев В.И. Еще раз о волластоните // *Стройпрофиль*. 2002. № 2. С. 38–40.
- Быков Е.А., Самсонова Т.Е. Использование современных материалов ЗАО «Геоком» для производства керамических изделий // *Стеклокерамика*. 2006. № 9. С. 36–39.
- Гладун В.Д., Холькин А.И., Акатьева Л.В. Перспектива создания производства синтетического волластонита // *Химическая технология*. 2007. Т. 2. № 7. С. 27–31.
- Тюльнин В.А. Волластонит – уникальное минеральное сырье многоцелевого назначения. М.: Руда и металлы, 2003. 144 с.
- Котляр В.Д. Классификация кремнистых опоквидных пород как сырья для производства стеновой керамики // *Строительные материалы*. 2009. № 3. С. 36–39.
- Афанасьева Н.И., Самигуллин Р.Р., Николаев К.Г., Исламова Г.Г., Пермяков Е.Н., Корнилов А.В. Известково-кремнеземистое сырье для получения синтетического волластонита // *Вестник Казанского технологического университета*. 2010. № 5. С. 22–26.
- Котляр В.Д. Стеновая керамика на основе кремнистых опал-кristобалитовых пород – опок. Ростов н/Д: РИЦ РГСУ, 2011. 278 с.
- Котляр В.Д., Талпа Б.В. Опoki – перспективное сырье для стеновой керамики // *Строительные материалы*. 2007. № 2. С. 31–33.

References

- Abdrakhimov V.Z. Wollastonite in ceramic materials. *Ogneupory i tekhnicheskaya keramika*. 2006. No. 7, pp. 41–47. (In Russian).
- Budnikov P.P., Poluboyarinov D.N. Khimicheskaya tekhnologiya keramiki i ogneuporov [Chemical technology of ceramics and refractories]. Moscow: Stroyizdat. 1972. 551 p.
- Chistyakov B.Z. Vollastonit [Wollastonite]. Moscow: Nauka. 1982. 212 p.
- Il'icheva E.S., Gotlib E.M., Pashin D.M., Budanova T.V. Wollastonite as an effective filler for polymeric materials. *Vestnik of KSTU named arter A.N. Tupolev*. 2013. No. 2. Vol. 1, pp. 49–53. (In Russian).
- Gusev A.I. Mineral resource base of wollastonite of Gorny Altai. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii*. 2011. No. 2, pp. 11–16. (In Russian).
- Korneev V.I. More about wollastonite. *Stroyprofil*. 2002. No. 2, pp. 38–40. (In Russian).
- Bykov E.A., Samsonova T.E. The use of modern materials CJSC “Geocom” for the production of ceramic products. *Steklokeramika*. 2006. No. 9, pp. 36–39. (In Russian).
- Gladun V.D., Khol'kin A.I., Akat'eva L.V. The prospect of creating the production of synthetic wollastonite. *Khimicheskaya tekhnologiya*. 2007. Vol. 2. No. 7, pp. 27–31. (In Russian).
- Tyul'nin V.A. Vollastonit – unikal'noe mineral'noe syr'e mnogotselovogo naznacheniya [Wollastonite is a unique multi-purpose mineral raw material]. Moscow: Ruda i metally. 2003. 144 p.
- Kotlyar V.D. Classification of siliceous opoka-like rocks as raw materials for the production of wall ceramics. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2009. No. 3, pp. 36–39. (In Russian).
- Afanas'eva N.I., Samigullin R.R., Nikolaev K.G., Islamova G.G., Permyakov E.N., Kornilov A.V. Lime-silica raw material for obtaining synthetic wollastonite. *Vestnik of the Kazan Technological University*. 2010. No. 5, pp. 22–26. (In Russian).
- Kotlyar V.D. Stenovaya keramika na osnove kremnistykh opal-kristobalitovykh porod – opok [Wall ceramics based on siliceous opal-cristobalite rocks – opoks]. Rostov n/D.: RITs RGSU. 2011. 278 p.
- Kotlyar V.D., Talpa B.V. Opoks are a promising raw material for wall ceramics. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2007. No. 2, pp. 31–33. (In Russian).

В.А. ГУРЬЕВА, д-р техн. наук (victoria-gurieva@rambler.ru), А.В. ДОРОШИН, аспирант

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

Низкокачественные кирпичные глины и золошлаковые отходы в производстве керамического кирпича

Проанализирована география заводов по производству керамического кирпича на 2023 г., показана их привязка к сырьевой базе. Рассмотрен опыт работы кирпичного завода, где в качестве основного сырья использовались золошлаковые отходы ТЭЦ Оренбургской области. В заводских условиях подтверждена возможность получения рядового керамического кирпича компрессионного формования из низкокачественного сырья и промышленных отходов с оптимальной структурой и физико-механическими свойствами, удовлетворяющими требованиям ГОСТ 530–2012. Представлены результаты исследований изменения химического, минералогического состава и технологических свойств сырья. Предложена технология производства керамического кирпича, прошедшая полузаводские испытания, включающая комплексную переработку золошлаковых отходов. Физико-технические показатели опытных образцов кирпича подтверждают, что ЗШО в композиции с силикагелем могут быть вовлечены в промышленное производство, это повысит эффективность использования природных ресурсов Оренбургской области.

Ключевые слова: рынок строительных материалов, глинистое сырье, физико-механические свойства, золошлаковые отходы, силикагель.

Для цитирования: Гурьева В.А., Дорошин А.В. Низкокачественные кирпичные глины и золошлаковые отходы в производстве керамического кирпича // *Строительные материалы*. 2023. № 5. С. 30–34. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-813-5-30-34>

V.A. GURYEVA, Doctor of Sciences (Engineering) (Victoria-gurieva@rambler.ru), A.V. DOROSHIN, graduate student
Orenburg State University (13, Pobedy Avenue, Orenburg, 460018, Russian Federation)

Low-Quality Brick Clays and Ash and Slag Waste in the Production of Ceramic Bricks

The geography of plants for the production of ceramic bricks for 2023 is analyzed. The experience of a brick factory, where ash and slag waste of the Orenburg region CHP was used as the main raw material, is considered. In factory conditions, the possibility of obtaining ordinary compression-molded ceramic bricks from low-quality raw materials and industrial waste with optimal structure and physico-mechanical properties meeting the requirements of GOST 530–2012 has been confirmed. The results of studies of changes in the chemical, mineralogical composition and technological properties of raw materials are presented. The technology of ceramic brick production, which has passed semi-factory tests, including complex processing of ash and slag waste, is proposed. The physical and technical indicators of the brick prototypes confirm that ASW in a composition with silica gel can be involved in industrial production, which will increase the efficiency of using the natural resources of the Orenburg region.

Keywords: the market of building materials, clay raw materials, physical and mechanical properties, ASW and slag waste, silica gel.

For citation: Guryeva V.A., Doroshin A.V. Low-quality brick clays and ash and slag waste in the production of ceramic bricks. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2023. No. 5, pp. 30–34. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-813-5-30-34>

Современные темпы развития промышленного и гражданского строительства сопровождаются увеличением объемов производства строительных материалов и изделий различного назначения. Одним из наиболее востребованных на рынке строительных материалов остается керамический кирпич. Однако требования к качеству кирпича постоянно возрастают, а разведанные природные запасы высококачественного сырья невосполнимо истощаются. Это является одной из главных проблем развития керамической промышленности России.

До настоящего времени основным сырьевым материалом для производства керамического кирпича остаются кирпичные глины, характеризующиеся определенными свойствами, которые оказывают существенное влияние на качество продукции. До перестроечного периода в качестве базового сырья и для корректировки технологических свойств местных низкокачественных глин использовалось высокопластичное глинистое сырье, доставляемое из регионов Украины и Прибалтики [1, 2]. Это один из важных факторов, определивших формирование основного

кластера крупных заводов в Европейской части России, так как транспортировка сырья на дальние расстояния для производства кирпича экономически нецелесообразна. В связи с нарушением интеграции на постсоветском пространстве и упадком машиностроительной отрасли основное производство кирпича на Урале, в Сибири, на Дальнем Востоке сосредоточено на заводах с небольшими мощностями или практически отсутствует. Данная ситуация усугубляется ограниченностью в данных регионах разрабатываемых месторождений высокотехнологичного алюмосиликатного сырья и широким распространением месторождений запесоченных, легкоплавких, средне-, умеренно- и малопластичных супесей и суглинков, которые не позволяют производить на их основе высококачественный кирпич. Карта расположения кирпичных заводов по федеральным округам Российской Федерации представлена на рис. 1.

Общее количество действующих керамических заводов в России составляет 265 предприятий, на которых производится ежегодно 3,4 млрд усл. кирпича. Большая часть заводов располагается в Централь-



Рис. 1. Карта расположения кирпичных заводов по федеральным округам Российской Федерации

Fig. 1. Map of the location of brick factories in the federal districts of the Russian Federation

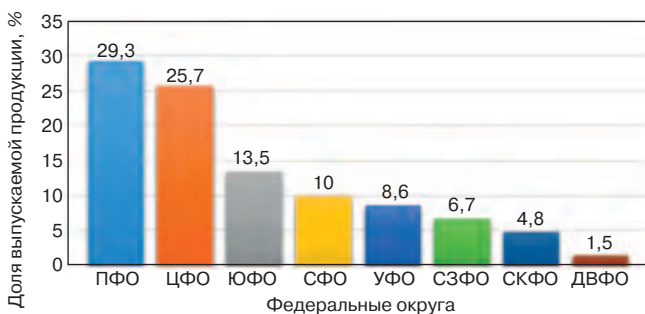


Рис. 2. Количество выпускаемого керамического кирпича по федеральным округам РФ в 2022 г.

Fig. 2. The number of ceramic bricks produced by the federal districts of the Russian Federation in 2022

ном и Приволжском федеральных округах, соответственно 25,3 и 22,6% [3, 4]. Количество выпускаемой продукции федеральных округов в общем объеме производства керамического кирпича в РФ в 2022 г. представлено на рис. 2.

Наименьшая совокупная мощность по выпуску кирпича наблюдается в Дальневосточном федеральном округе и составляет 45,2 млн шт. усл. кирпича по сравнению с общими показателями по России – 3,64 млрд шт. усл. кирпича.

Динамично развивающийся строительный комплекс Оренбуржья является потребителем разнообразных строительных материалов, в том числе керамических стеновых материалов, которые на 90% являются привозными из Самарской области, республик Башкирия, Татарстан, Чувашия и других регионов РФ. Отдельные маломощные заводы, расположенные в районах области, производят кирпич низкого качества, и его внешний вид не удовлетворяет требованиям нормативных документов. Одной из причин низкого качества продукции является применение для производства кирпича некондиционных легкоплавких местных глин.

На территории Оренбургской области разведано 56 месторождений кирпичных глин, по два месторождения гончарных и каолиновых глин, одно –



Рис. 3. Схема размещения запасов глинистого сырья Оренбургской области на 01.01.2023 г.

Fig. 3. Scheme of placement of reserves of clay raw materials of the Orenburg region on 01.01.2023



Рис. 4. Кирпичные заводы Оренбургской области

Fig. 4. Brick factories of the Orenburg region

огнеупорных, четыре месторождения керамзитового сырья – из них 13 лицензированных карьеров (рис. 3). Балансовый запас данных месторождений региона позволяет выпускать качественный кирпич целиком на основе местного сырья или с вводом в состав шихты корректирующих добавок в виде местных более качественных глин, техногенных отходов производств, расположенных на территории области.

В начале 1990-х гг. на территории Оренбургской области насчитывалось десять кирпичных заводов малой и средней мощности. В настоящее время остались два действующих завода: ООО «Кирпичный завод «Брик» в Оренбурге и ООО «Бузулукский кирпичный завод» в г. Бузулуке (рис. 4).

Одним из старейших действующих заводов региона является Бузулукский кирпичный завод (рис. 5), основанный в 1913 г. В настоящее время завод работает на карьере кирпичных глин со светло-коричневыми, коричневыми, алевритистыми, песчанистыми, пористыми, с неясно-слоистой текстурой с редкими мелкими гнездообразными включениями мелкокристаллического гипса и известково-глинистых образований, маломощных прослоев тонкозернистого песка. Мощность полезной толщи в пределах лицензионного участка изменяется от 5 до 10,5 м, в среднем 8,25 м. Средний объемный коэффициент вскрыши



Рис. 5. Бузулукский кирпичный завод: а – производственный корпус завода; б – технологическая линия прессования и резки кирпича; с – готовая продукция
 Fig. 5. Buzuluk brick factory: a – the production building of the plant; b – the technological line of pressing and cutting bricks; c – finished products

Таблица 1
 Table 1

Химический анализ глинистого сырья в 1968 и 2023 гг.
 Chemical analysis of clay raw materials for 1968 and 2023

Год анализа	Содержание оксидов, %									
	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	MgO	CaO	SO ₃	ППП
1968	61,66	0,63	12,09	4,62	1,84	1,89	2,1	6,51	<0,1	8,26
2023	42,52	0,23	4	2,14	0,18	0,96	0,38	26,1	<0,1	23,5

по месторождению составляет 0,036. Запасы кирпичных глин оцениваются по категории А – 124 тыс. м³, что позволяет производить 300 тыс. шт. усл. кирпича в месяц в течение 25 лет.

В ходе изучения архивных данных и проведения исследований по определению области применения кирпичных глин, согласно [5], разрабатываемых участков Бузулукского месторождения (рис. 6) выявлена динамика изменения химического состава глинистого сырья за период эксплуатации карьера с 1968 по 2023 г. (табл. 1).

Данные табл. 1 показывают, что за время эксплуатации месторождения в период с 1968 г. по настоящее время в выработку попало сырье со сниженным содержанием в алюмосиликатной горной породе следующих оксидов: Al₂O₃ на 66,9%, SiO₂ на 31%. Уменьшение количества глинозема указывает на снижение пластичности глины со среднепластичной до умеренно пластичной, а также на уменьшение огнеупорности глины. Понижение суммарного количества Na₂O, K₂O, Fe₂O₃, TiO₂ указывает на сокращение количества жидкой фазы при обжиге, что ухудшает спекаемость изделий. Одновременно отмечается рост количественного содержания в глине CaO в составе известняка на 75%. Разрушение структуры карбонатной породы вызывает газообразование и поризацию керамического камня в процессе обжига в интервале температуры 850–880°C. Таким образом, за период разработки месторождения изменился химический состав глины Бузулукского месторождения, что неизбежно определяет модификацию технологических свойств глинистого сырья. Этот вывод подтверждают результаты лабораторных испытаний, приведенные в табл. 2.

Анализ результатов табл. 2 указывает на снижение основных показателей по мере продвижения карьера за период эксплуатации карьера. Марка по прочности снижается с М125 до М72. По мнению авторов, улучшению технологических свойств глины и гото-

Таблица 2
 Table 2

Динамика изменения основных технологических показателей кирпичных глин Бузулукского месторождения, полученных по результатам ГРП в 1968 и 2023 гг.
 Dynamics of changes in the main technological indicators of brick clays of the Buzuluk deposit obtained from the results of exploration in the period from 1968 to 2023

Показатели	Детальная разведка 1968 г.			Переоценка 2023 г.		
	Значение			Значение		
	min	max	среднее	min	max	среднее
Число пластичности	6,5	16,3	11,5	6,53	9,36	8,13
Чувствительность к сушке	0,56	1,92	1,36	1,02	1,5	1,4
Усадка после сушки (воздушная), %	4	9,8	7,1	8,6	11,6	10,4
Общая усадка (полная), %	3,6	10,2	9,5	8,9	11,8	10,6
Водопоглощение, %	10,7	16,8		11,7	15,75	14,6
Предел прочности, МПа						
– при сжатии	6,95	23,9	10	8,5	13,2	10,2
– при изгибе	3,34	13,3	7,5	6,8	10,1	9,7
Коэффициент морозостойкости, циклы	F15	F15	F15	F20	F30	F25
Марка по прочности	M50	M200	M125	M30	M120	M75
Температура обжига, °C	950	950	950	950	950	950

вого изделия способствуют различные приемы: ввод добавок, дополнительная механоактивация сырьевой шихты на этапе подготовки, изменение способа формования изделий с пластического на полусухое прессование. До 2009 г. глина из карьера с природной влажностью 15–18% поступала непосредственно в глиноприемник. После модернизации технологиче-

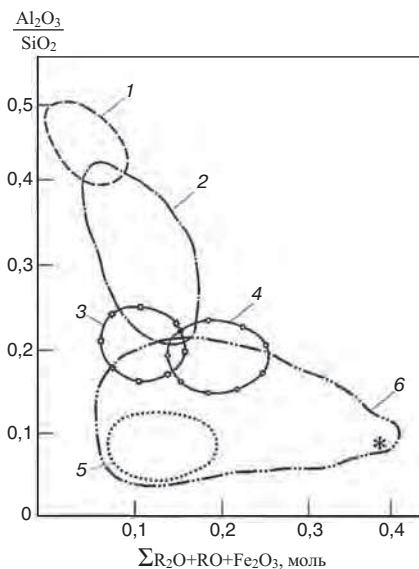


Рис. 6. Группировка глин в зависимости от их химического состава: 1 – каолины и глины, пригодные для производства огнеупорных (шамотных) изделий; 2 – глины, пригодные для производства плиток для пола, канализационных труб, кислотоупора, каменного товара; 3 – гончарные и терракотовые глины; 4 – черепичные глины; 5 – клинкерные, идущие для производства мостового клинкера; 6 – кирпичные глины; * – область применения бузулукской глины

Fig. 6. Grouping of clays depending on their chemical composition: 1 – kaolins and clays suitable for the production of refractory (fireclay) products; 2 – clays suitable for the production of floor tiles, sewer pipes, acid-resistant, stone goods; 3 – pottery and terracotta clays; 4 – tile clays; 5 – clinker clays used for the production of bridge clinker; 6 – brick clays; * – the scope of application of Buzuluk clay

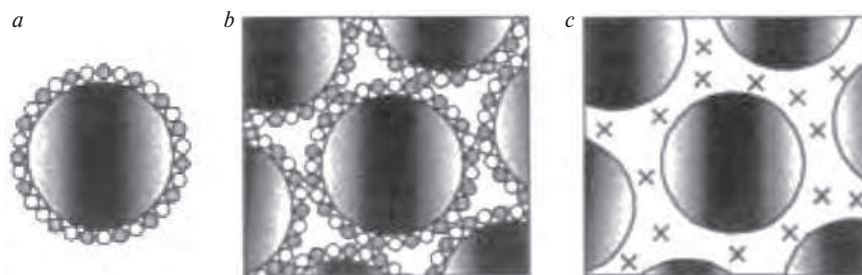


Рис. 7. Модель структуры по типу «ядро-оболочка» зола + глина + силикагель: а – модель гранулы пресс-порошка; б – модель структуры прессовки; с – модель структуры после обжига

Fig. 7. Core-shell structure model ash + clay + cullet: a – model of a pellet of a press powder; b – the model of the pressing structure; c – the model of the structure after firing

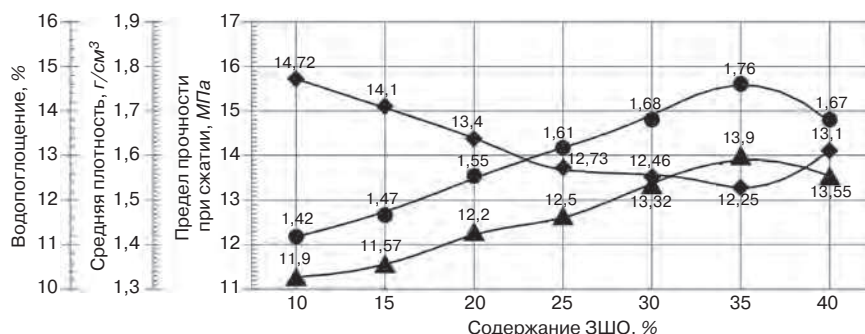


Рис. 8. Физико-механические свойства изделий состава: глина – 54% + ЗШО – 35% + силикагель – 11%, обожженных при температуре 950°C. 1 – средняя плотность, г/см³; 2 – предел прочности при сжатии, МПа; 3 – водопоглощение, %

Fig. 8. Physical and mechanical properties of products of the composition: clay – 54% + ASW – 35% + silica gel – 11%, fired at a temperature of 950°C. 1 – average density, g/cm³; 2 – compressive strength, MPa; 3 – water absorption, %

Таблица 3
Table 3

Химический состав трехкомпонентной шихты
Chemical composition of the 3-component charge

Состав шихты	Содержание оксидов, %									
	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	MgO	CaO	SO ₃	Σ
ГЛ ₅₄ +ЗШО ₃₅ +СГ ₁₁	70,55	0,58	7,1	2	5,04	1,12	4,22	9,33	0,04	100

ской линии и установки дозаторов воды глина вылеживалась в течение 25 сут в глинозапаснике, а затем на этапе формования доувлажнялась до оптимальной влажности 24%. Однако после обжига марка по морозостойкости кирпича оставалась ниже минимальной марки кирпича F25 согласно ГОСТ 530–2012. Поэтому полученный кирпич применяется в основном для забутовки и кладки внутренней версты ограждающих конструкций.

С целью улучшения качества продукции на заводе:

- исследована эффективность замены технологии пластического формования на метод полусухого прессования;

- применение моделирующих добавок в виде золашлаковых отходов (далее ЗШО) ТЭЦ и силикагеля натриевого силикат-глыбы.

Методом математического планирования эксперимента установлен оптимальный состав трехкомпонентной шихты и выполнен расчет ее химического состава, приведенный в табл. 3 [6, 7].

По полученному химическому составу композиционной шихты аналитическим способом рассчитан

теоретический состав глины в следующем минералогическом соотношении, %: каолинит – 14,9; альбит – 3,4; ортоклаз – 12,6; свободный кварц – 69,1.

Полузаводские испытания кирпича включали подготовку шихты и изготовление сырца методом полусухого прессования в лабораторных условиях с давлением прессования 20 МПа. Изделие-сырец высушивалось в условиях заводской туннельной сушильной камеры до влажности 2,5–4% и обжигалось при температуре 950°C в заводской кольцевой печи.

По результатам изучения микроструктуры опытных изделий разработана модель структуры кирпича-сырца, полученного формованием из пресс-порошка (рис. 7).

Согласно полученной модели (рис. 7) наблюдается уплотнение структуры матрицы кирпича разработанного состава. Ввод в состав формовочной шихты мелкодисперсных частиц ЗШО диаметром 0,005–0,05 мм и силикагеля в количестве соответственно до 35 и 11% обеспечивает увеличение средней плотности кирпича при полусухом прессовании на 6% по сравнению с кирпичом пластического формования. Это

объясняется образованием конденсационных структур, где согласно [9] возникает контакт непосредственно между частицами исходных компонентов, что определяет в условиях обжига даже при небольшом количестве жидкой фазы активизацию процессов образования новых кристаллических соединений и увеличение прочности изделий (рис. 8). Отмечается, что ввод мелкодисперсных частиц ЗШО обеспечивает в результате прессования получение более плотной упаковки частиц пресс-порошка в структуре изделия [8, 9].

Из результатов, приведенных на рис. 8, видно, что изменение технологии подготовки формовочной массы, способа формования изделия-сырца, содержание силикагеля в количестве 11% позволяют увеличить оптимальное количество вводимого ЗШО до 35%. Максимальные по значению физико-механические показатели составляют: предел прочности при сжатии – 13,9 МПа (увеличение показателя на 22%); средняя плотность – 1,76 кг/см³ (увеличение показателя на 6%), водопоглощение – 12,25% (снижение показателя на 22%).

Таким образом, проведенные лабораторные исследования и полужавовские испытания показали перспективу применения метода полусухого прессования стеновых керамических изделий из поликомпонентных масс на основе низкокачественных кирпичных глин.

Список литературы

1. Котляр А.В., Небежко Ю.И., Божко Ю.А. и др. Клинкерный кирпич на основе отсеков дробления песчаников Ростовской области // *Строительные материалы*. 2020. № 8. С. 9–15. DOI: 10.31659/0585-430X-2020-783-8-9-15
2. Апанская Д.Е., Сухих П.Н., Карпюк Л.Ю. и др. Расширение сырьевой базы производства эффективных керамических строительных материалов // *Фундаментальные исследования*. 2018. № 12–2. С. 197–202.
3. Семенов А.А. Российский рынок керамического кирпича. Тенденции и перспективы развития // *Строительные материалы*. 2020. № 12. С. 4–5. DOI: 10.31659/0585-430X-2020-787-12-4-5
4. Семенов А.А. Итоги развития российского рынка стеновых материалов в 2021 г. // *Строительные материалы*. 2022. № 3. С. 44–45. DOI: 10.31659/0585-430X-2022-800-3-44-45
5. Августиник А.И. Керамика. Л.: Стройиздат, 1975. 592 с.
6. Сыромясов В.А., Вакалова Т.В., Стороженко Г.И. Практика принятия решений при выборе способа производства керамического кирпича // *Строительные материалы*. 2020. № 8. С. 4–8. DOI: 10.31659/0585-430X-2020-783-8-4-8
7. Стороженко Г.И., Шоева Т.Е. Технология жесткого формования керамического кирпича на основе суглинков Западной Сибири // *Строительные материалы*. 2021. № 12. С. 4–8. DOI: 10.31659/0585-430X-2021-798-12-4-8
8. Бескопильный А.Н., Явруян Х.С., Гайшун Е.С. и др. Высокоэффективные керамические камни из отсеков переработки террикоников Восточного Донбасса // *Строительные материалы*. 2020. № 8. С. 16–24. DOI: 10.31659/0585-430X-2020-783-8-16-21
9. Gurieva V.A., Ilyina A.A., Doroshin A.V. Prospects for the development of building ceramics based on clays and nickel slags of Orenburg region // *Materials Science Forum*. 2020. Vol. 992 MSF, pp. 54–58. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.992.54

References

1. Kotlyar A.V., Shebeko Yu.I., Bozhko Yu.A. [et al.] Clinker brick based on sandstone crushing screenings of the Rostov region. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2020. No. 8, pp. 9–15. (In Russian). DOI 10.31659/0585-430X-2020-783-8-9-15
2. Apanskaya D.E., Sukhoi P.N., Karpyuk L.Y. [et al.] Expansion of the raw material base for the production of effective ceramic building materials. *Fundamenta'nye issledovaniya*. 2018. No. 12–2, pp. 197–202. (In Russian).
3. Semenov A.A. The Russian market of ceramic bricks. Trends and prospects of development. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2020. No. 12, pp. 4–5. (In Russian). DOI: 10.31659/0585-430X-2020-787-12-4-5
4. Semenov A.A. The results of the development of the Russian market of wall materials in 2021. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2022. No. 3, pp. 44–45. (In Russian). DOI: 10.31659/0585-430X-2022-800-3-44-45
5. Avgustinik A.I. Kерамика. Leningrad: Strojizdat, 1975. 592 p.
6. Syromyasov V.A., Vakalova T.V., Storozhenko G.I. The practice of decision-making when choosing a method of production of ceramic bricks. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2020. No. 8, pp. 4–8. (In Russian). DOI: 10.31659/0585-430X-2020-783-8-4-8
7. Storozhenko G.I. Shoeva T.E. Technology of residential molding of ceramic hedgehog based on loams of working Siberia. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2021. No. 12, pp. 4–8. (In Russian). DOI: 10.31659/0585-430X-2021-798-12-4-8
8. Besyazny A.N., Yavruyan H.S., Gaishun E.S. Highly effective ceramic stones from the screening of the processing of the Eastern Donbass terrikonikov *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2020. No. 8, pp. 16–24. (In Russian). DOI: 10.31659/0585-430X-2020-783-8-16-21
9. Gurieva V.A., Ilyina A.A., Doroshin A.V. Prospects for the development of building ceramics based on clays and nickel slags of Orenburg region. *Materials Science Forum*. 2020. Vol. 992 MSF, pp. 54–58. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.992.54

УДК 625.7

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-813-5-35-39>

Б.А. БОНДАРЕВ¹, д-р техн. наук (Lnsp-48@mail.ru);
 А.Н. КАНИЩЕВ², д-р техн. наук (22ank@mail.ru),
 А.Е. БОРИСОВ², канд. техн. наук (A.borisov1990@yandex.ru)

¹ Липецкий государственный технический университет (398042, г. Липецк, ул. Московская, 30)

² Воронежский государственный технический университет (394006, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84)

Способы модификации свойств глинистых грунтов с включением органических веществ

Одной из реализуемых задач национального проекта «Безопасные и качественные дороги» является использование технологий, основанных на повторном применении материалов. Данная работа посвящена анализу существующих способов укрепления и стабилизации глинистых грунтов с уделением внимания грунтам, содержащим в своем составе органические вещества. Ставится задача по оценке воздействия вяжущих веществ и/или наиболее известных стабилизирующих добавок на глинистый грунт, в том числе с высоким содержанием органических веществ. Выполнено сравнение физико-механических характеристик укрепленных глинистых грунтов, при этом приведены наиболее известные добавки различных производителей. Указан расход минеральных вяжущих и добавок при укреплении глинистых грунтов. Показаны преимущества комплексного укрепления грунтов с использованием минерального вяжущего (цемента) и полимерных добавок. Доказана возможность применения грунтов с высоким содержанием органических веществ в конструктивных слоях дорожных одежд. При модификации грунтов необходимо учитывать их генетический тип, так как он достаточно сильно влияет на прочностные характеристики.

Ключевые слова: укрепленные грунты, вяжущие материалы, органо-минеральные грунты, комплексные вяжущие, модификатор.

Для цитирования: Бондарев Б.А., Канищев А.Н., Борисов А.Е. Способы модификации свойств глинистых грунтов с включением органических веществ // *Строительные материалы*. 2023. № 5. С. 35–39. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-813-5-35-39>

B.A. BONDAREV¹, Doctor of Sciences (Engineering) (Lnsp-48@mail.ru);
 A.N. KANISHCHEV², Doctor of Sciences (Engineering) (22ank@mail.ru),
 A.E. BORISOV², Candidate of Sciences (Engineering) (A.borisov1990@yandex.ru)

¹ Lipetsk State Technical University (30, Moskovskaya Street, Lipetsk, 398042, Russian Federation)

² Voronezh State Technical University (84, 20th Anniversary of October str., Voronezh, 394006, Russian Federation)

Methods for Modifying the Properties of Clay Soils with the Inclusion of Organic Substances

One of the tasks of the national project "Safe and High-Quality Roads" being implemented is the use of technologies based on the reuse of materials. This work is devoted to the analysis of existing methods of strengthening and stabilizing clay soils, with special attention to soils containing organic substances in their composition. The task is to assess the impact of binders and/or the most well-known stabilizing additives on clay soil, including those with a high content of organic substances. A comparison of the physical and mechanical characteristics of reinforced clay soils was made, while the most famous additives from various manufacturers are given. The consumption of mineral binders and additives when strengthening clay soils is indicated. The advantages of complex soil strengthening with the use of mineral binder (cement) and polymer additives are shown. The possibility of using soils with a high content of organic substances in the structural layers of road pavements has been proved. When modifying soils, it is necessary to take into account their genetic type, since it strongly affects the strength characteristics.

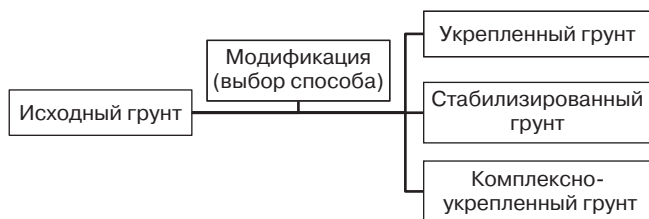
Keywords: strengthened soils, binders, organo-mineral soils, complex binders, modifier.

For citation: Bondarev B.A., Kanishchev A.N., Borisov A.E. Methods for modifying the properties of clay soils with the inclusion of organic substances. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2023. No. 5, pp. 35–39. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-813-5-35-39>

В настоящее время в Российской Федерации реализуется национальный проект «Безопасные и качественные автомобильные дороги» (БКД). В структуре данного проекта существует федеральный проект «Региональная и местная дорожная сеть», в рамках которого необходимо добиться увеличения качества и доступности автомобильных дорог, увеличения доли дорожной сети в городских агломерациях, находящихся в нормативном состоянии и др. Для достижения данных целей решаются задачи по внедрению современных и эффективных технологий строительства, реконструкции и капитального ремонта автомобильных дорог.

Одной из таких технологий является технология укрепления и стабилизации грунтов основания до-

рожных одежд нежесткого типа и верха земляного полотна автомобильной дороги [1–9]. Ее применение позволит сократить затраты на транспортные расходы и стоимость инертных материалов. Особенно это важно для отдельных регионов РФ, где наблюдается нехватка инертного материала (песка, щебня) [5]. Данная технология становится все более актуальной и востребованной после введения в действие новых нормативных документов ПНСТ 542–2021 «Нежесткие дорожные одежды. Правила проектирования» и СП 34.13330.2021 «Автомобильные дороги», в которых определены необходимые случаи стабилизации, указаны требования к грунтам основания и земляного полотна автодороги [1].



Классификация модифицированных грунтов
Classification of modified soils

Необходимо отметить, что в распоряжении Федерального дорожного агентства (Росавтодор) № 771-р от 03.03.2021 г. «Об утверждении стратегии развития инновационной деятельности в области дорожного хозяйства на период 2021–2025 гг.» в качестве одного из приоритетных научных исследований указано исследование различных типов вяжущих с целью повышения эффективности укрепления грунтов и рыхлых каменных материалов, а также различных методов повышения морозостойкости материалов [2].

В связи с этим необходимо повысить использование в процессе устройства слоев основания автомобильных дорог местных грунтов, в том числе с высоким содержанием органических веществ. Это актуальная задача для Центрально-Черноземного региона Российской Федерации, где совместно с другими регионами реализуется национальный проект «Безопасные и качественные автомобильные дороги» (БКД).

Следует различать два понятия: укрепление грунтов (повышение физико-механических свойств грунтов путем их обработки органическими или минеральными вяжущими) и стабилизация грунтов (улучшение водно-физических свойств грунта путем его обработки стабилизаторами и (или) поверхностно-активными веществами) согласно СП 78.13330.2012 «Автомобильные дороги. Актуализированная редакция СНиП 3.06.03–85». Возможно одновременное использование двух методов (комплексное укрепление).

Комплексное укрепление – это способ улучшения исходного грунта, при котором используются как вяжущие вещества, так и различные стабилизаторы (ТУ 23.64.10-001-28538178–2019 «Комплексное вяжущее «БелДорЦем». Технические условия». Белгород, 2019. 10 с.) [10–23].

Выбор метода модифицирования грунтов зависит от используемых вяжущих веществ и добавок (см. рисунок).

Укрепление грунтов выполняют с использованием различных как неорганических вяжущих материалов (минеральных), так и органических веществ. К минеральным (неорганическим) вяжущим материалам относят: цемент (портландцемент, шлакопортландцемент, цемент для строительных растворов не ниже марки М300, цемент сульфатостойкий); известь; зола-уноса (с содержанием сернистых соединений не больше 6% и содержанием свободного СаО не более 20 мас. %);

шлаки (фосфорные, активные, высокоактивные молотые цветной и черной металлургии); шламы (нефелиновые, белитовые и бокситовые); гипс; силикат натрия (жидкое стекло).

В настоящее время из представленных минеральных вяжущих в основном в качестве вяжущего используют цемент и известь. Остальные добавки используются как вспомогательные при необходимости улучшения технических и экологических свойств исходного грунта [1].

К органическим вяжущим материалам относят: битумы нефтяные дорожные жидкие; битумные эмульсии классов ЭБК-3, ЭБА-3 и ЭБДК М (возможно применение битумных эмульсий классов ЭБК-2, ЭБА-2 и ЭБДК С); битумные пасты; вспененный битум; карбаминоформальдегидные смолы; нефтесодержащие шламы. Представленные органические вяжущие редко используются в качестве основного или единственного вяжущего по причине повышенной деформативности и недостаточной водостойкости [1].

Стабилизацию грунтов выполняют с использованием многокомпонентных систем, включающих поверхностно-активные вещества как ионогенного типа, так и неионогенного; наночастицы, обладающие свойствами гидрофобизаторов, суперпластификаторов, полимеров, применяемых в строительстве для обработки грунтов с целью изменения их свойств. Стоит отметить, что стабилизаторы сами по себе не являются вяжущими, они влияют на поверхностные свойства частиц грунта [5]. Их классификация производится по следующим основным признакам: тип, класс, подкласс, вид [1, 4].

В Российской Федерации известны стабилизаторы как российского, так и зарубежного производства [15, 17]. Основное действие данных добавок состоит в изменении водно-физических свойств исходного грунта, что приводит к формированию плотной морозостойкой структуры получаемого материала. Причем требования к грунтам, подверженным стабилизации, довольно сходны. Анализируя исследования [1, 3, 5, 12–14] по воздействию добавок на грунт, можно отметить недостаточность данных, учитывающих влияние одной и той же добавки на различные виды связного грунта. Особенно это касается грунтов с высоким содержанием органических веществ.

Применение различных видов добавок совместно с вяжущими материалами позволяет получить грунт со значительно улучшенными физико-механическими характеристиками за счет комплексного укрепления. При этом необходимо оценивать минералогический состав грунта [17], который играет исключительную роль при формировании укрепленной структуры материала.

В табл. 1 приведено сравнение используемых стабилизирующих добавок различных производителей и вяжущих веществ. Дозировка указана с учетом работ [4, 5, 14]. В качестве вяжущего вещества исполь-

зовался цемент. Исходный грунт в данных работах относится к суглинистым грунтам.

Расход других представленных добавок составляет: «ANT» – 0,0075% стабилизатора, 1–5% вяжущего; «NOVOCRETE» – 0,1–0,5% стабилизатора, 1–7% вяжущего; «Чимстон» – 0,007% стабилизатора, 1–7% вяжущего; «Статус-3» – 0,0012% стабилизатора, 5–7% вяжущего [15].

В работах [2, 10, 11] исследованы суглинистые грунты с высоким содержанием органических веществ (до 11%). Данные грунты укреплялись с использованием как минерального вяжущего, так и комплексного. Основные результаты с учетом содержания органического вещества приведены в табл. 2. Средний расход вяжущих материалов составляет: минерального вяжущего от 6 до 9%, полимерной добавки от 0,5 до 0,9%.

Как видно из рассматриваемых данных табл. 1 и 2, содержание органических веществ способствует ухудшению физико-механических характеристик почти на 50%. Это связано с генезисом органоминеральных грунтов. При этом грунт без органических веществ успешно поддается укреплению при использовании цемента и стабилизирующих добавок разных производителей. Так, в соответствии с ГОСТ 23558–94 для марки по прочности М20 минимальный предел прочности при сжатии составляет 2 МПа, для марки М40 – 4 МПа; марка по морозостойкости при этом должна соответствовать табл. 1 ГОСТ 23558–94 «Смеси щебеночно-гравийно-песчаные и грунты, обработанные неорганическими вяжущими материалами, для дорожного и аэродромно-строительства. Технические условия».

Проведенное исследование [2] подтверждает возможность использования глинистых грунтов с высоким содержанием органических веществ при применении комплексного вяжущего. Результаты показывают, что в возрасте 28 сут у модифицированных составов снизилось набухание, повысилась прочность и морозостойкость. При этом для снижения расхода вяжущих веществ и нейтрализации органических свойств необходимо применять песчаный грунт в различных пропорциях.

Выводы

Установлено, что при укреплении глинистых грунтов, в том числе с высоким содержанием органических веществ (в пределах от 4 до 11%), необходимо использовать комплексное укрепление с применением как минеральных вяжущих, так и стабилизирующих добавок, что способствует росту плотности, прочности и морозостойкости. Необходимую добавку нужно подбирать с учетом количественного содержания органических веществ, а также учитывая минеральный и гранулометрический состав грунта.

Использование стабилизаторов при укреплении грунтов с высоким содержанием органических веществ улучшает водостойкость и морозостойкость,

Таблица 1

Table 1

Сравнение используемых стабилизирующих добавок Comparison of used stabilizing additives

Применяемая добавка и (или) используемое вяжущее	Расход добавки / расход вяжущего, % от массы грунта	Вид укрепляемого грунта	Прочность при сжатии, МПа	Марка по морозостойкости
ДорЦем / Цемент	0,39 / 6,5	Суглинистый грунт	3,9	F 50
Дорзин / Цемент	0,0017 / 6	Суглинистый грунт	3,3	F 25
NanoStab/ Цемент	0,68 / 7	Суглинистый грунт	4,1	F 25
Акропол/ Цемент	0,13 / 7	Суглинистый грунт	5,2	F 50
Никофлок/ Цемент	1 / 10	Суглинистый грунт	5,5	F 25
Дорстаб/ Цемент	1 / 7	Суглинистый грунт	2,2	F 25

Таблица 2

Table 2

Основные результаты испытаний суглинистых грунтов с высоким содержанием гумуса Main test results of loamy soils with high humus content

Применяемая добавка и (или) используемое вяжущее	Расход добавки / расход вяжущего, % от массы грунта	Вид укрепляемого грунта	Предел прочности при сжатии, МПа	Марка по морозостойкости
Пол. доб.** / цемент	0,9 / 7–9	Суглинистый грунт*	1,24	F 10
Цемент/ добавление песчаного грунта	7–9 / 50	Суглинистый грунт*	2,2	F 5
Пол. доб.** / цемент / добавление песчаного грунта	0,9 / 7–9 / 50	Суглинистый грунт*	2,02	F 10
Цемент/ добавление песчаного грунта	7–9 / 70	Суглинистый грунт*	2,28	F 10
Пол. доб.** / цемент / добавление песчаного грунта	0,9 / 7–9 / 70	Суглинистый грунт*	2,84	F 10

* суглинистый грунт с содержанием органических веществ до 11%.
Пол. доб.** – стабилизирующая добавка в разработке.

что обеспечивает соответствие материала требованиям нормативных документов.

Заложенный в грунтах природный потенциал может способствовать значительному увеличению характеристик укрепленного грунта при правильном подборе вяжущего и стабилизатора к определенному виду грунта. Это позволит снизить расход вяжущих веществ и стабилизатора.

Необходимо продолжить исследования по модификации составов укрепленных органических грунтов с целью улучшения получаемых физико-механических характеристик.

Список литературы

1. Бехтерев Р.А., Юркин Ю.В., Авдонин В.В., Басалаев А.А. Обзор методов стабилизации пучинистых грунтов Кировской области // *Инженерный вестник Дона*. 2022. № 6. С. 356–374.
2. Борисов А.Е. Технология ремонта дорожной одежды облегченного и переходного типа с использованием грунтобетонной смеси: Дис. ... канд. техн. наук. Воронеж: ВГТУ, 2022. 147 с.
3. Акимов А.Е., Траутвайн А.И., Черногил В.Б. Повышение физико-механических характеристик укрепленных грунтов при применении стабилизирующих добавок серии. *Наука и образование в современных условиях: Материалы Международной научно-практической конференции*. Нефтекамск, 15 сентября 2017 г. С. 49–55.
4. Дмитриева Т.В., Куцына Н.П., Безродных А.А., Строкова В.В., Маркова И.Ю. Эффективность укрепления техногенного грунта минеральными модификаторами // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2019. № 7. С. 14–23. DOI: 10.34031/article_5d14bdcc8eca43.21244159
5. Дмитриева Т.В., Маркова И.Ю., Строкова В.В., Безродных А.А., Куцына Н.П. Эффективность стабилизаторов различного состава при укреплении грунтов минеральным вяжущим // *Строительные материалы и изделия*. 2020. Т. 3. № 1. С. 30–38.
6. Пономарев А.Д., Даляев Н.Ю. Инновационные методы стабилизации и укрепления грунтов. Глубинная стабилизация. *Актуальные вопросы в науке и практике: Сборник статей по материалам III Международной научно-практической конференции*. Казань, 2017. С. 112–116.
7. Загородных К.С., Кукина О.Б. Анализ проблемы укрепления глинистых грунтов // *Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Сер.: Студент и наука*. 2016. № 9. С. 55–63.
8. Дмитриева Т.В., Безродных А.А., Куцына Н.П. К вопросу о терминологии при разработке грунтобетонных оснований автомобильных дорог. *Сб. научных трудов Международной научно-практической конференции, посвященной 65-летию БГТУ им. В.Г. Шухова «Наукоемкие технологии и инновации» (XXIII научные чтения)*. Белгород: БГТУ, 2019.
9. Свириденко М.В., Федорова В.С. Способы регенерации дорожных одежд. *Материалы 57-й студенческой научно-технической конференции инженерно-строительного института ТОГУ (17–27 апреля 2017 г.)*. Хабаровск: Тихоокеанский государственный университет, 2017. С. 256–260.
10. Подольский Вл.П., Канищев А.Н., Борисов А.Е. Применение укрепленного органоминерального грунта в дорожном строительстве // *Наука и техника в дорожной отрасли*. 2016. № 2. С. 10–13.
11. Борисов А.Е., Канищев А.Н., Козлов В.А. Влияние минеральных добавок на физико-механические свойства укрепленных органоминеральных грунтов

References

1. Bekhterev R.A., Yurkin Yu.V., Avdonin V.V., Basalaev A.A. Review of methods of stabilization of heaving soils of the Kirov region. *Inzhenernyi vestnik Dona*. 2022. No. 6, pp. 356–374. (In Russian).
2. Borisov A.E. Technology of repair of lightweight and transitional type pavement using a ground concrete mixture. *Cand. diss.(Engineering)*. Voronezh. 2022. 147 p. (In Russian).
3. Akimov A.E., Trautvain A.I., Chernogil V.B. Increasing the physical and mechanical characteristics of reinforced soils when using stabilizing additives of the series. *Science and education in modern conditions. Materials of the International Scientific and Practical Conference*. Neftekamsk, September 15, 2017, pp. 49–55. (In Russian).
4. Dmitrieva T.V., Kutsyna N.P., Bezrodnykh A.A., Strokhova V.V., Markova I.Yu. The effectiveness of strengthening man-made soil with mineral modifiers. *Vestnik BGTU im. V.G. Shukhova*. 2019. No. 7, pp. 14–23. (In Russian). DOI: 10.34031/article_5d14bdcc8eca43.21244159
5. Dmitrieva T.V., Markova I.Yu., Strokhova V.V., Bezrodnykh A.A., Kutsyna N.P. The effectiveness of stabilizers of various compositions in strengthening soils with mineral binder. *Stroitel'nye materialy i izdeliya*. 2020. Vol. 3. No. 1, pp. 30–38. (In Russian).
6. Ponomarev A.D., Dalyaev N.Yu. Innovative methods of soil stabilization and strengthening. Deep stabilization. *Topical issues in science and practice: A collection of articles based on the materials of the III International Scientific and Practical Conference*. Kazan. 2017, pp. 112–116. (In Russian).
7. Zagorodnykh K.S., Kukina O.B. Analysis of the problem of strengthening clay soils. *Scientific Bulletin of the Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Student and Science*. 2016. No. 9, pp. 55–63. (In Russian).
8. Dmitrieva T.V., And Bezrodnykh.A., Kutsyna N.P. On the issue of terminology in the development of dirt–concrete foundations of highways. *Collection of proceedings of the scientific and practical scientific International Conference dedicated to the 65th anniversary of the V.G. Shukhov BSTU “Science-intensive technologies and innovations” (XXIII scientific readings)*. Belgorod: BSTU, 2019. (In Russian).
9. Sviridenko M.V., Fedorova V.S. Methods of regeneration of road clothes. *Materials of the 57th Student Scientific and Technical Conference of the Engineering and Construction Institute of TOGU (April 17–27, 2017)*. Khabarovsk: Pacific Ocean State University, 2017, pp. 256–260. (In Russian).
10. Podolsky V.I.P., Kanishchev A.N., Boisov A.E. Application of reinforced organomineral soil in road construction. *Nauka i tekhnika v dorozhnoi otrasli*. 2016. No. 2, pp. 10–13. (In Russian).
11. Borisov A.E., Kanishchev A.N., Kozlov V.A. The influence of mineral additives on the physico-mechanical properties of reinforced organomineral soils

- ральных грунтов // *Научный журнал строительства и архитектуры*. 2022. № 2 (66). С. 87–93.
12. Могилевцев Д.А., Траутвайн А.И. Теоретические основы укрепления и стабилизации грунтов. *Сборник докладов IX Международного молодежного форума «Образование. Наука. Производство»*. 6–13 октября 2017 г. Белгород, 2017.
 13. Скрыпников А.В., Козлов В.Г., Ломакин Д.В., Логойда В.С. Исследование отходов промышленности для укрепления грунтов // *Фундаментальные исследования*. 2016. № 12–1. С. 102–106.
 14. Глухов А.В., Остапчук Е.Е., Сарасеко В.В., Треушков И.В. Применение модификаторов свойств грунтов и минеральных вяжущих для строительства грунтовых аэродромов в арктической зоне российской федерации // *Современные проблемы гражданской защиты*. 2022. № 3 (44). С. 80–88.
 15. Шеломенцев С.В., Репринцев В.А. Улучшение свойств грунтов с помощью модификаторов // *Известия ТулГУ. Науки о Земле*. 2019. № 1. С. 315–326.
 16. Ядыкина В.В., Лукаш Е.А., Кондрашов Д.С. Влияние стабилизирующих добавок на свойства укрепленных портландцементом грунтов // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2017. № 11. С. 6–10.
 17. Чурилин В.С., Пушкарёва Г.В. О необходимости учета генетики грунтов при их комплексном укреплении // *Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета*. 2021. Т. 23. № 6. С. 190–200. DOI: 10.31675/1607-1859-2021-23-6-190-200
 18. Никонорова И.В., Соколов Н.С. Строительство и территориальное освоение оползнеопасных склонов Чебоксарского водохранилища // *Жилищное строительство*. 2017. № 9. С. 13–19.
 19. Sokolov N., Ezhov S., Ezhova S. Preserving the natural landscape on the construction site for sustainable ecosystem // *Journal of applied engineering science*. 2017. Vol. 15. No. 4, pp. 518–523.
 20. Du Ch., Yang G., Zhang T., Yang Q. Miltiskale study of the influence of promoters on low-plasticity clay stabilized with cement-based composites // *Construction and Building Materials*. 2019. July. Vol. 213, pp. 537–548.
 21. Kushwaha S.S., Kishan D., Dindorkar N. Stabilization of Expansive Soil Using Eko Soil Enzyme For Highway Embankment // *Materialstoday: proceedings*. 2018. Vol. 5. Iss. 9, pp. 19667–19679.
 22. ChenY., LiangW., LiY., WuY., ChenY., XiaoW., ZhaoLi, ZhangJ., HueLi. Modification, application and reaction mechanisms of nano-sized iron sulfide particles for pollutant removal from soil and water: A review // *Chemical Engineering Journal*. 2019. Vol. 362. April, pp. 144–159.
 23. Rimal S., Poudel R.K., Gautam D. Experimental study on properties of natural soils treated with cement kiln dust // *Case Studies in Construction Materials*. 2019. June. Vol. 10. e00223.
 - cal properties of reinforced organomineral. *Nauchnyi zhurnal stroitel'stva i arkhitektury*. 2022. No. 2 (66), pp. 87–93. (In Russian).
 12. Mogilevtsev D.A., Trautvain A.I. Theoretical foundations of soil strengthening and stabilization. *Collection of reports of the IX International Youth Forum "Education. The science. Production"*. October 6–13, 2017 Belgorod. 2017. (In Russian).
 13. Skrypnikov A.V., Kozlov V.G., Lomakin D.V., Logoida V.S. Investigation of industrial waste for soil strengthening. *Fundamental'nye issledovaniya*. 2016. No. 12–1, pp. 102–106. (In Russian).
 14. Glukhov A.V., Ostapchuk E.E., Saraseko V.V., Treushkov I.V. Application of soil properties modifiers and mineral binders for the construction of unpaved airfields in the Arctic zone of the Russian Federation. *Sovremennye problemy grazhdanskoi zashchity*. 2022. No. 3 (44), pp. 80–88. (In Russian).
 15. Shelomentsev S.V., Reprintsev V.A. Improvement of soil properties using modifiers. *Izvestiya TulGU. Nauki o Zemle*. 2019. No. 1, pp. 315–326. (In Russian).
 16. Yadykina V.V., Lukash E.A., Kondrashov D.S. The effect of stabilizing additives on the properties of Portland cement-reinforced soils. *Vestnik BGTU im. V.G. Shukhova*. 2017. No. 11, pp. 6–10. (In Russian).
 17. Churilin V.S., Pushkareva G.V. On the need to take into account the genetics of soils in their complex strengthening. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta*. 2021. Vol. 23. No. 6, pp. 190–200. (In Russian). DOI: 10.31675/1607-1859-2021-23-6-190-200
 18. Nikonorova I.V., Sokolov N.S. Construction and territorial development of landslide slopes of the Cheboksary water reservoir. *Zhilishchnoe Stroitel'stvo [Housing Construction]*. 2017. No. 9, pp. 13–19. (In Russian).
 19. Sokolov N., Ezhov S., Ezhova S. Preserving the natural landscape on the construction site for sustainable ecosystem. *Journal of applied engineering science*. 2017. Vol. 15. No. 4, pp. 518–523.
 20. Du Ch., Yang G., Zhang T., Yang K. Miltiskale study of the effect of promoters on clay with low plasticity stabilized by cement-based composites. *Construction and building materials*. 2019. July. Vol. 213, pp. 537–548.
 21. Kushvakha S.S., Kishan D., Dindorkar N. Stabilization of expanding soil using soil enzyme Eco for highway embankment. *Materialstoday: proceedings*. 2018. Vol. 5, Iss. 9, pp. 19667–19679.
 22. Chen., Liangv., Li., Wu., Chen., Xiaou., ZhaoLi, Zhangzh., HueLi. Modification, application and reaction mechanisms of nanoscale iron sulfide particles to remove pollutants from soil and water: review. *Journal of Chemical Engineering*. 2019. Vol. 362. April, pp. 144–159.
 23. Rimal S., Poudel R.K., Gautam D. Experimental study of the properties of natural soils treated with cement dust. *Case studies in the field of building materials*. 2019. June. Vol. 10. e00223.

И.Ф. ШЛЕГЕЛЬ¹, канд. техн. наук, директор,
С.Г. МАКАРОВ¹, инженер, начальник отдела,
С.С. ШУЛЬГА¹, инженер, начальник отдела,
С.Н. САПЕЛЬНИКОВ¹, инженер, заместитель начальника отдела;
Л.А. БАГАЕВА², директор

¹ Институт Новых Технологий и Автоматизации промышленности строительных материалов, ООО «ИНТА-СТРОЙ» (644113, г. Омск, ул. 1-я Путевая, 100)

² ООО «Торговый дом «Инта-Строй» (644113, г. Омск, ул. 1-я Путевая, 100)

Лопастной экструдер «Лопэкс» как альтернатива шнековым прессам

Проведен обзор известных шнековых прессов для керамической промышленности. Обозначена проблема расслоения (свилеобразования) формуемых изделий. Рассмотрена конструкция разработанного в 2021 г. фирмой «Инта-Строй» агрегата пластического формования ленточного бруса, состоящего из лопастного экструдера и смесителя типа «Каскад» в качестве узла перемешивания. Установлено высокое качество перемешивания на установках «Каскад» по сравнению с одновальными и двухвальными смесителями. Подтверждено устранение налипания сырья в вакуум-камере благодаря конструктивной доработке загрузочной горловины. Выявлено увеличение силы осевого давления за счет применения лопастей, имеющих меньший «угол атаки» по сравнению со шнеком. Устранено образование свилей в глиняном бруске за счет применения формующих дисков, предотвращающих закручивание материала. Отмечается получение более плотного кирпича-сырца, а также возможность формования сырца из менее пластичных глин и при меньшей влажности сырья.

Ключевые слова: лопастной экструдер, шнековый экструдер, ленточный пресс, «Каскад», «Лопэкс», вакуум-камера, загрузочная горловина, формующие диски, глиняный брус.

Для цитирования: Шлегель И.Ф., Макаров С.Г., Шулга С.С., Сапельников С.Н., Багаева Л.А. Лопастной экструдер «Лопэкс» как альтернатива шнековым прессам // *Строительные материалы*. 2023. № 5. С. 40–46.

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-813-5-40-46>

I.F. SHLEGEL¹, Candidate of Sciences (Engineering), director,
S.G. MAKAROV¹, engineer, head of department,
S.S. SHUL'GA¹, engineer, head of department,
S.N. SAPEL'NIKOV¹, engineer, deputy head of department;
L.A. BAGAEVA², director

¹ Institute of New Technologies and Automation of Building Materials Industry (OOO «INTA-STROY») (100, 1-ya Putevaya Street, 644113, Omsk, Russian Federation)

² Trading House "Inta-Stroy" (100, 1-ya Putevaya Street, 644113, Omsk, Russian Federation)

Vane Extruder "Lopex" as an Alternative to Screw Presses

A review of well-known screw presses for the ceramic industry has been carried out. The problem of delamination (stirring formation) of molded products is indicated. The design of the unit for plastic molding of a strip bar, developed in 2021 by Inta-Stroy, consisting of a vane extruder and a mixer of the Cascade type as a mixing unit, is considered. The high quality of mixing has been established at the Cascade installations in comparison with single-shaft and double-shaft mixers. The elimination of sticking of raw materials in the vacuum chamber was confirmed due to the design improvement of the loading neck. An increase in the force of axial pressure due to the use of blades with a smaller "angle of attack" compared to the screw was revealed. The formation of streaks in the clay beam was eliminated due to the use of forming discs that prevent twisting of the material. It is noted that a denser raw brick is obtained, as well as the possibility of molding a raw brick from less plastic clays and at a lower moisture content of the raw material.

Keywords: vane extruder, screw extruder, belt press, "Cascade", "Lopex", vacuum chamber, loading neck, molding discs, clay bar.

For citation: Shlegel I.F., Makarov S.G., Shul'ga S.S., Sapel'nikov S.N., Bagaeva L.A. Vane extruder "Lopex" as an alternative to screw presses. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2023. No. 5, pp. 40–46. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-813-5-40-46>

Идея формования изделия в виде непрерывного бруса с нужным поперечным сечением, который далее режется на кирпичи, известна с начала XVII в. Эта идея реализовывалась в трех различных способах обработки пластичных масс при помощи поршневого пресса, вальцового экструдера и шнекового экструдера.

Ранние сведения использования принципа Архимедова винта для формования пластичного бруса в производстве кирпича появляются около

1830 г. [1]. Известны конструкции Твидейла и Ханта (1840) и экструдер Рэндела и Саундера (1852) с двойным горизонтальным шнеком, изобретение лорда Берридейла (1852), однако ни одна из этих машин не получила дальнейшего развития.

В 1855 г. Карлу Шликейсену удалось совершить прорыв в деле внедрения новой технологии формовки со своим «универсальным устройством для изготовления кирпича», которое было продемонстрировано на выставках в Клеве и Кельне в

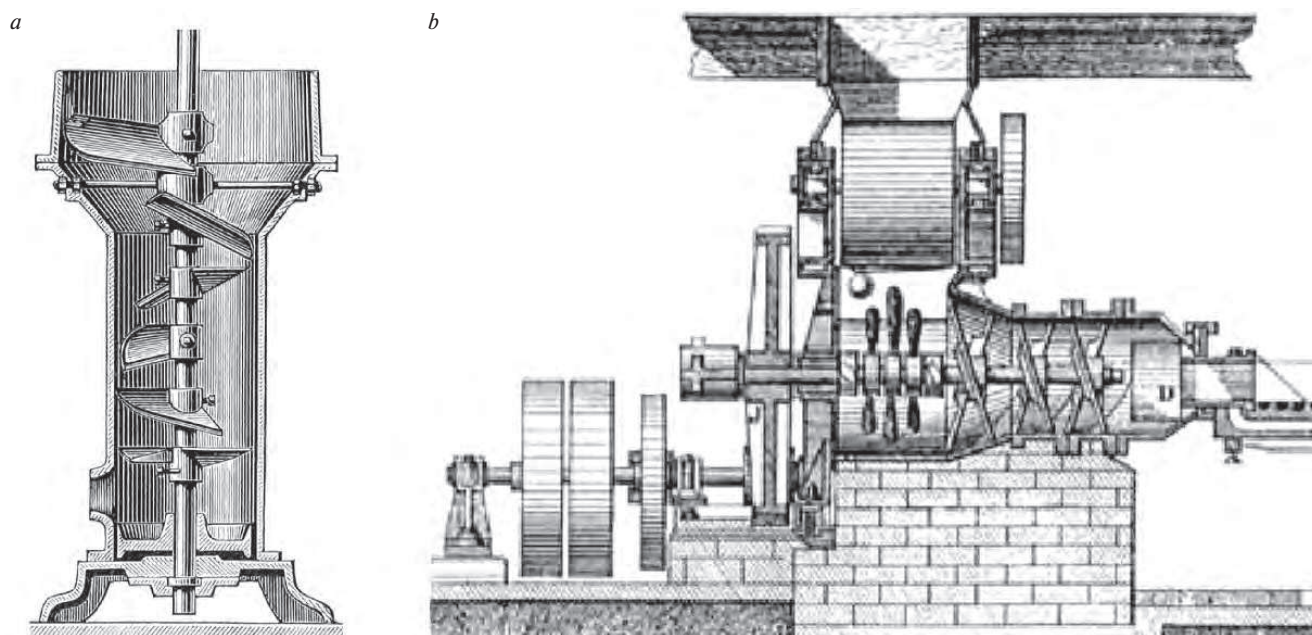


Рис. 1. Первые шнековые устройства для экструзии: *a* – вертикальное устройство К. Шликейсена; *b* – горизонтальный экструдер Хертеля
 Fig. 1. The first screw devices for extrusion: *a* – vertical device of K. Shlikeisen; *b* – Hertel's horizontal extruder

Изготовители экструдеров для пластического формования глиняного бруса [2–13]
 Manufacturers of extruders for plastic molding of clay beams [2–13]

Фирма	Страна	Количество исполнений	Диапазоны	
			производительности, т/ч	диаметров шнека (на выходе), м
Вердес (Verdes)	Испания	30	2–115	0,18–0,8
Морандо (Morando)	Италия	16	20–120	0,4–0,77
Стил (Steel & Sons)	США	15	23–99	–
Хэндле (Händle)	Германия	13	2–75	0,2–0,75
Бонджоанни (BONGIOANNI)	Италия	12	2–170	0,25–0,85
Плинка (Plinka)	Украина	11	10–40	0,35–0,55
Петерсен Сервис (Petersen Servic)	Германия	9	5–120	0,25–0,75
Авельд (Aweld)	Чехия	9	4–75	0,25–0,75
Строммашина, Могилев	Беларусь	5	30–100	–
Вичентини (Vicentini)	Италия	5	1–8	0,13–0,28
Капачколи (CAPACCIOLY)	Италия	4	25–90	0,45–0,65
Ипиак Нери (IPIAC NERY)	Португалия	3	20–50	0,4–0,6

Германии. Это было вертикальное устройство для экструзии (рис. 1, *a*).

В конструкции К. Шликейсена впервые использовался прерывистый винт и второе дно, установленное на вращающемся валу, что позволило получить равномерный поток экструдированной глины. Инженер Хертель, используя имеющийся вертикальный прототип, разработал горизонтальный шнековый экструдер, который успешно прошел испытания в 1860 г. (рис. 1, *b*).

Экструдер Хертеля был оборудован конической шнековой камерой и устройством подачи диаметром 75 см. Камера шнека была длиной 1,25 м, а

производительность составляла до 1300 кирпичей в час. Горизонтальный экструдер вызвал фурор на международной сельскохозяйственной выставке в Гамбурге в 1863 г., где был представлен вместе с английским поршневым прессом, устройством с прессующими вальцами и вертикальной глиномялкой, предоставляя экспертам возможность для сравнения.

Вертикальный экструдер проигрывал горизонтальному в удобстве загрузки глины и проблемном приводе сверху или снизу. На слоистую структуру формируемого на горизонтальном прессе глиняного бруса в то время не обратили особого внимания.

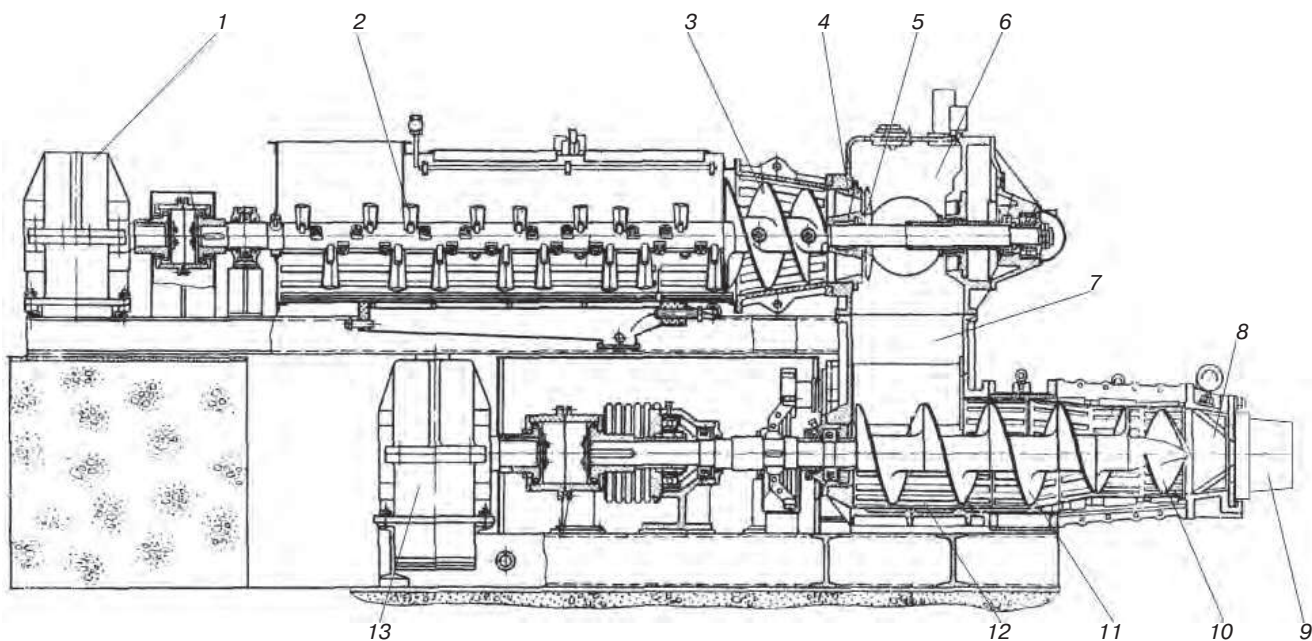


Рис. 2. Агрегат формования пластикового бруса: 1 – привод смесителя; 2 – смеситель; 3 – конический шнек; 4 – фильтрующая решетка; 5 – вращающийся нож; 6 – вакуум-камера; 7 – подающие валки; 8 – пресс-головка; 9 – мундштук; 10 – выпорная лопасть; 11 – шнек; 12 – шнековая камера; 13 – привод шнека

Fig. 2. Unit for molding plastic timber: 1 – mixer drive; 2 – mixer; 3 – conical screw; 4 – filtering grid; 5 – rotating knife; 6 – vacuum chamber; 7 – feed rolls; 8 – press head; 9 – mouthpiece; 10 – upstream blade; 11 – auger; 12 – screw chamber; 13 – screw drive

Мнения экспертов разделились, но в результате получила поддержку более удобная горизонтальная конструкция, выпуск шнековых экструдеров приобрел массовый характер, соответственно тиражировалась и проблема расслоения (свилеобразования) формируемых изделий, которая беспокоит специалистов кирпичного производства вот уже более 160 лет.

Однако шнековый экструдер продолжает оставаться самым популярным формовочным агрегатом до сих пор. За более чем полуторавековую историю была отработана теория экструзии, внедрено много усовершенствований.

Самым значительным из них явилось применение вакуума, которое началось в США в 1920 г., а в Европе появилось позже, только в 1960-х гг. Это изобретение позволило существенно повысить качество кирпича и сейчас применяется практически всеми изготовителями оборудования, за исключением некоторых машиностроительных заводов, которые продолжают делать шнековые прессы для старых предприятий, не желающих проводить техническое перевооружение.

В настоящее время нам известно о фирмах (см. таблицу), выпускающих шнековые экструдеры различных моделей и исполнений.

Большинство фирм, производящих шнековые экструдеры, имеют конструкторские отделы, постоянно работающие над совершенствованием выпускаемого оборудования. Однако изобретения, имеющие фирменную патентную защиту, по истечении срока этой защиты становятся достоянием всех производителей оборудования и в той или иной мере применяются во всех конструкциях.

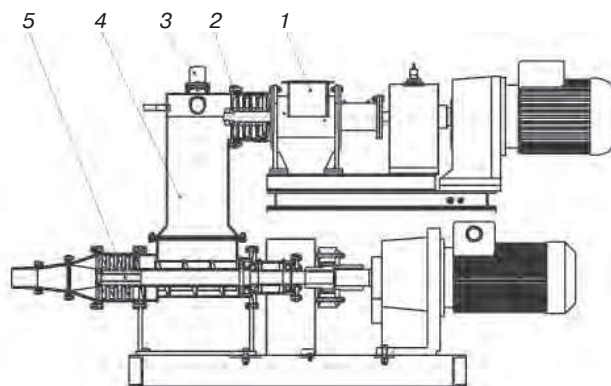


Рис. 3. Агрегат формовки «Лопэкс» в сборе: 1 – «Каскад»; 2 – фильтрующая решетка; 3 – гляделка; 4 – вакуумная камера; 5 – экструдер

Fig. 3. «Lopex» molding unit assembled: 1 – «Cascade»; 2 – filter grid; 3 – peeper; 4 – vacuum chamber; 5 – extruder

Поэтому шнековые экструдеры, выпускаемые различными фирмами, прошли за 160 лет значительное количество изменений и стали во многом походить друг на друга.

В России эти машины называют иногда ленточными прессами, иногда шнековыми и винтовыми, хотя во всем мире их называют шнековыми экструдерами, и это название больше соответствует их функции, так как прессование все-таки дискретный процесс и более подходит для прессов полусухого формования.

Современное устройство формования [14] в обобщенном виде (рис. 2) представляет агрегат, состоящий из смесителя 2 с приводом 1, вакуум-камеры 6 с подающими валками 7 и шнекового вала 11, установленного в шнековой камере 12 и получающего вращение от привода 13.

В 2021 г. фирмой «Инта-Строй» был разработан и испытан агрегат пластического формования ленточного бруса, содержащий лопастной экструдер [15] вместо шнекового и, кроме того, включающий смеситель типа «Каскад» в качестве узла перемешивания. Агрегат, содержащий лопастной экструдер, получил фирменное название «Лопэкс» (рис. 3).

Рассмотрим предложенную конструкцию в порядке стадийной обработки сырья.

1. Узел перемешивания

Для перемешивания и подачи сырья в современных агрегатах используются двухвальные и одно-вальные смесители (рис. 2, 2), оборудованные коническим шнеком для герметизации (рис. 2, 3) при подаче в вакуум-камеру.

В разработке «Инта-Строй» для этих целей использована установка «Каскад», которую мы неоднократно представляли в публикациях [16–20].

Были проведены исследования по оценке качества перемешивания на различных машинах [21] и установлено не только высокое качество перемешивания на установках «Каскад» по сравнению с одно-вальными и двухвальными смесителями, но и повышение качества сырья [22].

К настоящему времени «Каскады» прошли ряд модификаций и сейчас выпускается пятая модификация с индексом «Д».

2. Вакуум-камера

В современных агрегатах пластического формования бруса несомненным преимуществом является применение вакуумирования.

Однако конструкция вакуум-камеры усложняется необходимостью применения различных устройств, обеспечивающих непрерывную подачу сырья (рис. 4) и устранение его зависания в камере.

В конструкции лопастного экструдера «Лопэкс» задача устранения налипания решается благодаря тому, что в загрузочной горловине корпус в зоне загрузки со стороны, встречной вращению шнека, выполнен с радиусным расширением, равным $1,1–1,3$ радиуса шнека, и сопряжен с вертикальной боковой стенкой, смещенной от края шнека к его центру на $0,1–0,2$ радиуса шнека. Линия начала расположена ниже оси шнека и образует с горизонталью угол $40–50^\circ$. Для увеличения проходного сечения загрузочной горловины боковая стенка, обратная вращению шнека, выполнена с наклоном наружу на угол $20–40^\circ$ (рис. 5).

Загрузочная горловина работает следующим образом. Витки шнека захватывают материал и подают его в клиновидный зазор. За счет сужения зазора по направлению к шнеку материал продавливается в винтовое пространство. При этом вертикальная боковая стенка патрубка не препятствует подаче материала, что позволяет исключить возможность налипания на нее керамической массы [23].

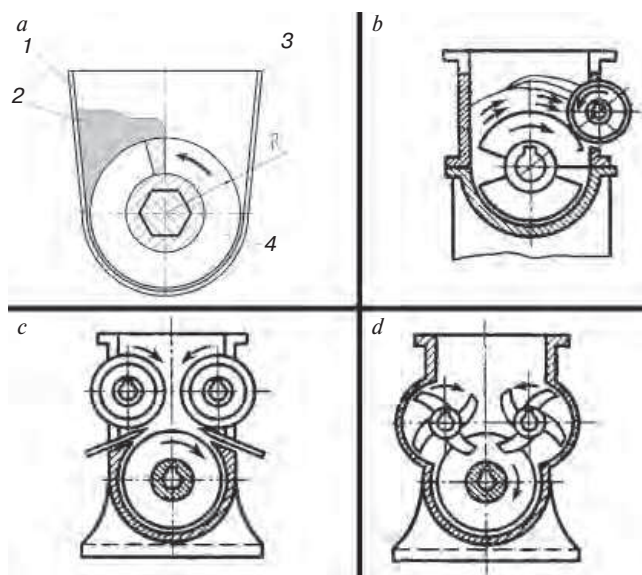


Рис. 4. Вакуум-камеры для различных конструкций (b, c, d) и схема образования козырька из глины, образуемого при вращении шнека: 1 – козырек; 2 – встречная стенка; 3 – обратная стенка; 4 – шнек; R – радиус шнека

Fig. 4. Vacuum chambers for various designs (b, c, d) and a scheme for the formation of a visor from clay formed during the rotation of the screw: 1 – visor; 2 – opposite wall; 3 – reverse wall; 4 – screw; R – screw radius

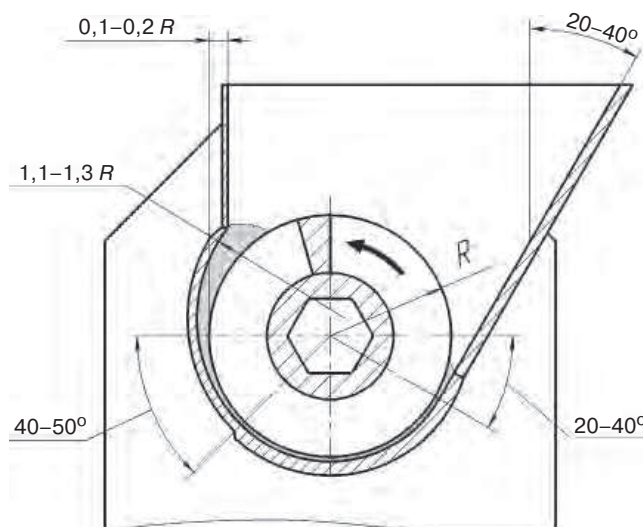


Рис. 5. Загрузочная горловина
Fig. 5. Loading mouth

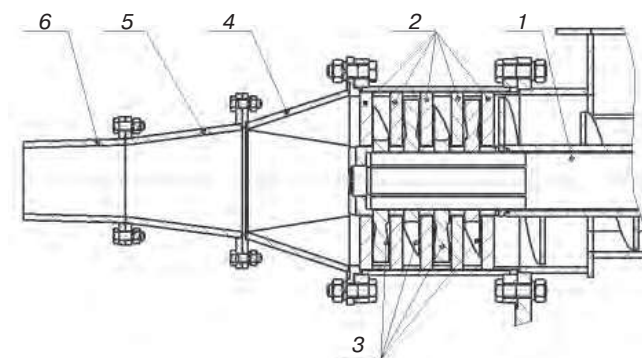


Рис. 6. Рабочая камера экструдера: 1 – вал; 2 – формирующие диски; 3 – ножи; 4 – головка; 5 – камера сжатия; 6 – мундштук
Fig. 6. Working chamber of the extruder: 1 – shaft; 2 – forming discs; 3 – knives; 4 – head; 5 – compression chamber; 6 – mouthpiece

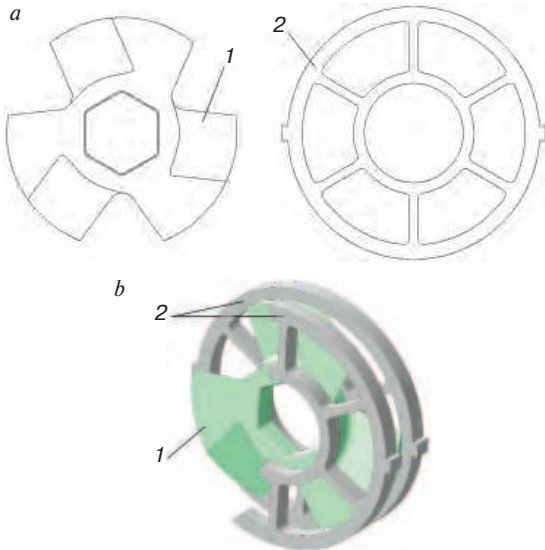


Рис. 7. Нож и формирующий диск: *a* – чертеж; *b* – вид в сборе; 1 – нож; 2 – формирующий диск

Fig. 7. Knife and forming disc: *a* – drawing; *b* – assembly view; 1 – knife; 2 – forming disc



Рис. 8. Экструзия керамической трубы
Fig. 8. Ceramic pipe extrusion



Рис. 9. Решетка с отверстиями диаметром до 2 мм
Fig. 9. Grid with holes up to 2 mm in diameter

В верхней части клиновидного зазора протекают два противоположных процесса – налипание и очищение. Материал стремится налипнуть на стенку, но постоянно сдирается новыми порциями материала, затягиваемыми в клиновидный зазор.

Проведенные испытания полностью подтвердили работоспособность этой конструкции и определили возможность ее применения в закрытой вакуум-камере.

3. Обеспечение подачи материала под давлением для формирования глиняного бруса

В традиционной конструкции для подачи материала под давлением для формирования глиняного бруса применяется шнек (рис. 2, 11, 12), имеющий различные варианты исполнения. Однако в брус не удастся избежать так называемой свили, обусловленной «зализыванием» глины шнеком. Это вызывает образование трещин при сушке сырца.

Идея лопастного экструдера основывалась на исключении поверхности длительного взаимодействия со шнеком путем разделения его на участки короткого взаимодействия и таким образом устранения «зализывания». Эти участки были разделены формирующими дисками (рис. 6) для предотвращения закручивания материала. Кроме того, эти участки были преобразованы в трехлопастные ножи с меньшим «углом атаки», чем у шнека, что дает увеличение силы осевого давления в несколько раз.

Лопастные ножи установлены на приводном валу со смещением каждого последующего ножа относительно предыдущего на угол, составляющий половину угла между лопастями предыдущего ножа.

Первым и последним по ходу движения материала установлены формирующие диски. Они имеют радиальные перегородки небольшой ширины, разделяющие поток на несколько секторов. Ширина ло-

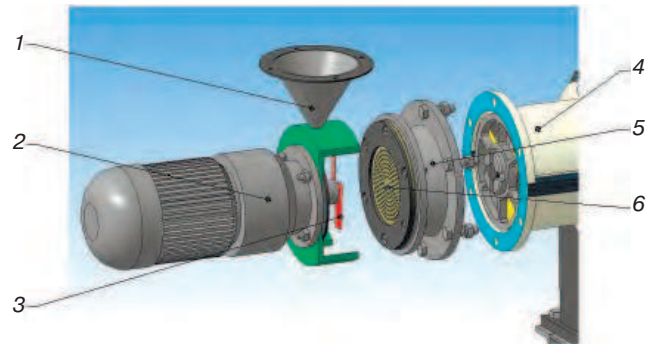


Рис. 10. Гранулятор: 1 – емкость опудривателя; 2 – привод гранулятора; 3 – срезные ножи; 4 – «Каскад»; 5 – конус отсечной; 6 – решетка концевая

Fig. 10. Granulator: 1 – powderer capacity; 2 – granulator drive; 3 – shear knives; 4 – Cascade; 5 – cut-off cone; 6 – end grate

пасти ножа больше ширины отверстия в формирующем диске.

Поскольку ножи установлены с угловым смещением вдоль оси приводного вала и угол этого смещения равен половине угла между лопастями ножа, лопасти соседних ножей находятся в противофазе. В то время как лопасть одного ножа скосом рабочей поверхности продавливают материал вперед в секторное отверстие формирующего диска, лопасть следующего ножа перекрывает отверстие диска с обратной стороны, не давая возможности материалу двигаться назад (рис. 7, *b*).

В лопастном экструдере уплотнение материала создается движением наклонной поверхности ножей, а радиальные перегородки формирующих дисков не позволяют массе вращаться. Обратным перетечкам препятствует малый зазор между лопастью пресующего ножа и формирующим диском, а также лопасть соседнего, «заднего» по ходу движения материала, ножа. Давление возрастает по мере продвижения

материала вдоль корпуса, подобно тому, как это происходит с увеличением давления воды в многоступенчатом секционном центробежном насосе. Благодаря конструкции лопастной экструдер позволяет развить большое давление. Во время испытаний мы путем косвенных измерений получили давление в мундштуке 6,2 МПа.

4. Дополнительные возможности лопастного экструдера

Повышенное давление в головке экструдера позволяет получить следующие преимущества:

- Формование пластичного бруса без орошения мундштука.
- Получение более плотного кирпича-сырца с удельным весом до 2,2 г/см³.
- Формование сырца из менее пластичных глин.
- Формование при меньшей влажности сырья.

При экспериментах проводили формовку с влажностью от 16,2 до 19%.

Список литературы

1. Willi Bender, Hans H. Boger. A Short History of the Extruder in Ceramics // Frank Handle. Extrusion in Ceramics. Leipzig, Germany. 2007. 468 p.
2. Материалы сайта фирмы «Вердес» (Verdes), Испания: <https://verdes.ru/machines.html> (дата обращения: 27.04.2023).
3. Материалы сайта фирмы «Морандо» (Morando), Италия: <https://www.rietermorando.com/product/18> (дата обращения: 25.04.2023).
4. Материалы сайта фирмы «Стил» (STEEL & Sons), США: <https://www.jcsteele.com/machinery/extruders-and-pug-sealers/> (дата обращения: 25.04.2023).
5. Материалы сайта фирмы «Хэндле» (Händle), Германия: <https://www.haendle.com/produkte/formgeben-extrudieren/vakuuaggregate-futura-ii> (дата обращения: 25.04.2023).
6. Материалы сайта фирмы «Бонджиоанни» (BONGIOANNI), Италия: https://www.bongioannimacchine.it/heavy_clay_technology/it/10-macchine (дата обращения: 19.04.2023).
7. Материалы сайта фирмы «Плифа» (Plinfa), Украина: <https://www.plinfa.com/ru/category/extruders> (дата обращения: 19.04.2023).
8. Материалы сайта фирмы «Петерсен Сервис» (Petersen Service), Германия: <https://www.rehart.de/angebot/maschinen-anlagenbau/ziegelei-produkte-petersenservice/formgebung/> (дата обращения: 25.04.2023).
9. Материалы сайта фирмы «Авельд» (Aweld), Чехия: <https://www.aweld.net/ru/site/products> (дата обращения: 25.04.2023).
10. Материалы сайта фирмы «Строммашина», Могилев, Белоруссия: <https://www.strommashina.mogilev.by/pequipment/cbrick/12-brick-molding/103-scpress> (дата обращения: 19.04.2023).

- Формование керамической трубы с минимальной толщиной стенки до 3 мм (рис. 8.)

- Получение керамических «струй» при продавливании через решетку с диаметром отверстий до 2 мм (рис. 9).

- Создание гранулятора и получение гранул путем разрезания керамических «струй» (рис. 10).

Для этого за решеткой монтируется срезной нож, частота вращения которого может меняться за счет частотного привода. Этим обеспечивается различная длина гранул.

- Конструктив «Лопэкса» может быть применен в других отраслях промышленности для компактирования порошков угля, золы и пыли циклонов с минимальным количеством пластичной связки.

В заключение хочется отметить, что лопастной экструдер «Лопэкс» обладает очевидными преимуществами по сравнению со шнековым прессом, что определяет начало его жизни в технологиях керамики.

References

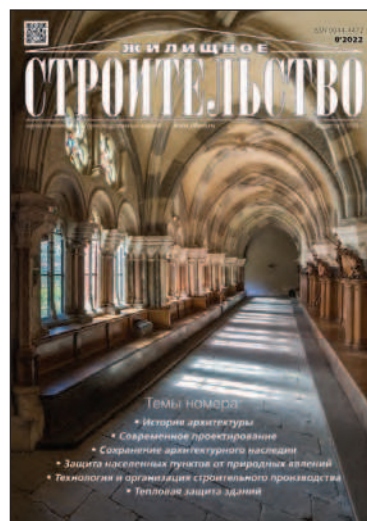
1. Willi Bender, Hans H. Boger. A Short History of the Extruder in Ceramics // Frank Handle. Extrusion in Ceramics. Leipzig, Germany. 2007. 468 p.
2. Materials of the site of the company Verdes, Spain (date of access: 04/19/2023). <https://verdes.ru/machines.html>
3. Materials of the site of the company Morando, Italy (date of access: 04/25/2023). <https://www.rietermorando.com/product/18>
4. Materials of the site of the company STEEL & Sons, USA (date of access: 04/25/2023). <https://www.jcsteele.com/machinery/extruders-and-pug-sealers/>
5. Materials of the site of the company Händle, Germany (date of access: 04/25/2023). <https://www.haendle.com/produkte/formgeben-extrudieren/vakuuaggregate-futura-ii>
6. Materials of the site of the company BONGIOANNI, Italy (date of access: 04/19/2023) https://www.bongioannimacchine.it/heavy_clay_technology/it/10-macchine
7. Materials of the site of the company Plinfa, Ukraine (date of access: 04/19/2023). <https://www.plinfa.com/ru/category/extruders>
8. Materials of the site of the company Petersen Service, Germany (date of access: 04/25/2023). <https://www.rehart.de/angebot/maschinen-anlagenbau/ziegelei-produkte-petersenservice/formgebung/>
9. Materials of the site of the company Aweld, Czech Republic (date of access: 04/25/2023). <https://www.aweld.net/ru/site/products>
10. Materials of the site of the company Strommashina, Republic of Belarus (date of access: 04/25/2023). <https://www.strommashina.mogilev.by/pequipment/cbrick/12-brick-molding/103-scpress>

11. Материалы сайта фирмы «Вичентини» (Vicentini), Италия: https://www.setecsr.it/en/index_vicentini.php (дата обращения: 25.04.2023).
12. Материалы сайта фирмы «Капаччоли» (CAPACCIOLY), Италия: <https://www.capaccioli.com/prodotti/speciale-settore-laterizio/> (дата обращения: 25.04.2023).
13. Материалы сайта фирмы «Ипиак Нери» (IPIAC NERY), Португалия: <https://www.ipiac-neri.com/copia-de-ceramica-estructural> (дата обращения: 27.04.2023).
14. Ильевич А.П. Машины и оборудование для заводов по производству керамики и огнеупоров. М.: Высшая школа, 1979. 344 с.
15. Патент РФ 2772394. *Шнековый пресс* / Шлегель И.Ф. Заявл. 29.10.2021. Оpubл. 19.05.2022. Бюл. № 14.
16. Шлегель И.Ф., Шаевич Г.Я., Карабут Л.А., Пашкова Е.Б., Спитанов В.В., Астафьев В.А. Установка «Каскад» для кирпичной промышленности // *Строительные материалы*. 2005. № 2. С. 20–22.
17. Шлегель И.Ф., Шаевич Г.Я., Астафьев В.А., Карабут Л.А. Промышленная установка «Каскад-13» для глиноподготовки // *Строительные материалы*. 2005. № 10. С. 30.
18. Шлегель И.Ф., Шаевич Г.Я., Гудалов О.В. Перспективы использования установок серии «Каскад» в технологии производства огнеупоров // *Новые огнеупоры*. 2008. № 12. С. 64–66.
19. Шлегель И.Ф., Рукавицын А.В., Андрианов А.В. Использование установок серии «Каскад» в технологии полусухого прессования кирпича // *Строительные материалы*. 2010. № 4. С. 58–59.
20. Шлегель И.Ф., Макаров С.Г., Васякин А.М. Расширение возможностей установок «Каскад» // *Строительные материалы*. 2017. № 11. С. 47–49.
21. Шлегель И.Ф., Шаевич Г.Я., Карабут Л.А., Носков А.В., Астафьев В.А., Молодкина Л.Н., Котелин П.Л., Коровицкий Н.Л. Новые возможности установки «Каскад» // *Строительные материалы*. 2007. № 2. С. 48–50.
22. Шлегель И.Ф., Шаевич Г.Я., Носков А.В., Астафьев В.А., Андрианов А.В., Молодкина Л.Н. Новое поколение глиноперерабатывающих установок «Каскад» // *Строительные материалы*. 2008. № 4. С. 34–35.
23. Патент РФ 2771476. *Загрузочная горловина шнековых устройств* / Шлегель И.Ф. Заявл. 27.12.2021. Оpubл. 04.05.2022. Бюл. № 13.
11. Materials of the site of the company Vicentini, Italy (date of access: 04/25/2023). https://www.setecsr.it/en/index_vicentini.php
12. Materials of the site of the company CAPACCIOLY, Italy (date of access: 04/25/2023). <https://www.capaccioli.com/prodotti/speciale-settore-laterizio/>
13. Materials of the site of the company IPIAC NERY, Portugal (date of access: 04/27/2023). <https://www.ipiac-neri.com/copia-de-ceramica-estructural>
14. Il'evich A.P. *Mashiny i oborudovanie dlja zavodov po proizvodstvu keramiki i ogneuporov* [Machinery and equipment for ceramics and refractory plants]. Moscow: Vysshaja shkola, 1979. 344 p.
15. Patent RF 2772394. *Shnekovyj press* [Screw press]. Shlegel' I.F. Declared 29.10.2021. Published 19.05.2022. Bulletin No. 14. (In Russian).
16. Shlegel' I.F., Shaevich G.Ja., Karabut L.A., Pashkova E.B., Spitanov V.V., Astaf'ev V.A. Installation "Cascade" for the brick industry. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2005. No. 2, pp. 20–22. (In Russian).
17. Shlegel' I.F., Shaevich G.Ja., Astaf'ev V.A., Karabut L.A. Industrial installation "Kaskad-13" for clay preparation. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2005. No. 10, pp. 30. (In Russian).
18. Shlegel' I.F., Shaevich G.Ja., Gudalov O.V. Prospects for the use of installations of the "Kaskad" series in the technology of production of refractories. *Novye ogneupory*. 2008. No. 12, pp. 64–66. (In Russian).
19. Shlegel' I.F., Rukavicyn A.V., Andrianov A.V. Use of "Kaskad" series plants in the technology of semi-dry brick pressing. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2010. No. 4, pp. 58–59. (In Russian).
20. Shlegel' I.F., Makarov S.G., Vasjakin A.M. Expanding the capabilities of "Kaskad" installations. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2017. No. 11, pp. 47–49. (In Russian).
21. Shlegel' I.F., Shaevich G.Ja., Karabut L.A., Noskov A.V., Astaf'ev V.A., Molodkina L.N., Kotelin P.L., Korovickij N.L. New features of the "Kaskad" installation. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2007. No. 2, pp. 48–50. (In Russian).
22. Shlegel' I.F., Shaevich G.Ja., Noskov A.V., Astaf'ev V.A., Andrianov A.V., Molodkina L.N. A new generation of clay processing plants "Kaskad". *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2008. No. 4, pp. 34–35. (In Russian).
23. Patent RF 2771476. *Zagruzochnaja gorlovina shnekovyh ustrojstv* [Loading neck of screw devices]. Shlegel' I.F. Declared 27.12.2021. Published 04.05.2022. Bulletin No. 13. (In Russian).

Подписка на журналы издательства СТРОЙМАТЕРИАЛЫ



www.journal-cm.ru
ISSN 0585-430X (Print)
ISSN 2658-6991 (Online)
Индекс **70886***



www.journal-hc.ru
ISSN 0044-4472
Индекс **70283***

На электронную версию можно подписаться

- на сайтах журналов

<https://journal-cm.ru/index.php/ru/podpiska-2023>

<https://journal-hc.ru/index.php/ru/podpiska-2023>

и издательства **www.rifsm.ru** в разделе «Подписка» можно оформить подписку на электронную полнотекстовую версию журнала в формате *.pdf.

Это позволит вам получать журнал еще до выхода из типографии и быть независимым от почтового ведомства России.

- на сайтах наших партнеров

elibrary.ru

delpress.ru

www.ivis.ru

www.rucont.ru

Оформить подписку в редакции можно с любого месяца на любой период

Необходимо составить заявку в произвольной форме с указанием названия организации, юридического и почтового адреса и отправить на e-mail: mail@rifsm.ru или rifsm@mail.ru

* Индексы по объединенному каталогу «Пресса России» <https://www.pressa-rf.ru>

В.В. КУРНОСОВ, канд. физ.-мат. наук (kbb@komas.su),

В.Р. ТИХОНОВА, инженер

ООО «КОМАС» (143362, Московская обл., г. Апрелевка, ул. Мартовская, 8А)

Колпаковая печь — универсальный агрегат для обжига керамики

Дан анализ соответствия колпаковой печи требованиям наилучших доступных технологий керамического производства с точки зрения энергетики и экологии. Обоснована высокая энергетическая эффективность колпаковой печи как обжигового агрегата различных типов керамической продукции – полнотелого, лицевого, поризованного и клинкерного кирпича, а также керамической плитки, керамогранита, черепицы, пеностекла и пенокерамики. Показано, что применение рекуперативных горелок и струйно-факельного дожигателя позволяет снизить уровень выбросов вредных веществ до требований к классическим нагревательным печам, полностью ликвидировав выбросы в атмосферу летучих органических соединений.

Ключевые слова: колпаковая печь, НДТ (наилучшие доступные технологии), тепловая энергия, рекуперативные горелки, обжиг, керамоволокно, керамические изделия, система автоматического управления, летучие органические соединения.

Для цитирования: Курнос В.В., Тихонова В.Р. Колпаковая печь – универсальный агрегат для обжига керамики // *Строительные материалы*. 2023. № 5. С. 48–52. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-813-5-48-52>

V.V. KURNOSOV, Candidate of Sciences (Physics and Mathematics) (kbb@komas.su), V.R. TIHONOVA, Engineer
ООО «КОМАС» (8А, Martovskaya Street, Aprelevka, 143362, Moscow Region, Russian Federation)

Hood Furnace – Universal Unit for Burning Ceramics

The analysis of the compliance of the hood furnace with the requirements of the best available technologies of ceramic production from the point of view of energy and ecology is given. The high energy efficiency of the hood furnace as a firing unit of various types of ceramic products - full-bodied, face, porous and clinker bricks, as well as ceramic tiles, porcelain stoneware, tiles, foam glass and foam ceramics is shown. It is substantiated that the use of recuperative burners and a jet-flare afterburner makes it possible to reduce the level of emissions of harmful substances to the requirements for classical heating furnaces, completely eliminating emissions of volatile organic substances into the atmosphere.

Keywords: hood furnace, BAT (best available technologies), thermal energy, regenerative burners, roasting, ceramic fiber, ceramic products, automatic control system, volatile organic substances.

For citation: Kurnosov V.V., Tihonova V.R. Hood furnace – universal unit for burning ceramics. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2023. No. 5, pp. 48–52. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-813-5-48-52>

Возросший спрос на различные виды керамических изделий на строительном рынке и условия конкуренции в борьбе за потребителя вынуждают заводы – производители керамического кирпича расширять ассортимент продукции. Обжиговые печные агрегаты непрерывного действия для массового производства однотипных изделий, которыми оснащены практически все кирпичные заводы, не позволяют гибко и своевременно реагировать на изменение типа продукции, а также выпускать изделия ограниченными партиями. Так, при изменениях температуры обжига даже в пределах 100°C неизбежно повышается выход некондиционной продукции или брака. Камерные печи лишены этого недостатка, в них возможно организовать качественный обжиг полнотелого, лицевого, поризованного и клинкерного кирпича, а также керамической плитки, керамогранита, черепицы, пеностекла и пенокерамики [1].

Однако встает вопрос, могут ли печи этого класса соответствовать НДТ (наилучшим доступным технологиям) керамического производства. В работе [2] изложены критерии НДТ и даны ссылки на нормативные документы. На основании приведенной ин-

формации попробуем разобраться в этом вопросе применительно к нашей теме. НДТ керамического производства согласно нормативным документам предполагают применение для обжига керамических изделий туннельных и кольцевых печей [3]. О камерных, ямных, шахтных и тем более колпаковых печах не упоминается. В ситуации подобной неясности оценка уровня технологии обжига в колпаковых печах по отношению к заявленным наилучшим доступным технологиям является актуальной задачей.

Рассмотрим критерий снижения потребления энергии. Технологический показатель – удельное потребление природного газа – при производстве 1 т кирпича составляет ≤ 3 ГДж/т продукции [4]. Поскольку нас интересует эффективность использования тепловой энергии природного газа, обратимся к ГОСТ Р 55646–2013 [5], где в одном фрагменте текста сказано, что доля тепловой энергии природного газа, затраченной на производство конечной продукции, составляет до 90% общей энергии. Однако из следующего текста следует, что доля электрической энергии составляет до 30% общей энергии. Для того чтобы разобраться в столь неоднозначной ситуации, проведем ряд расчетов.

Примем за минимальный уровень потребления уровень потребления тепловой энергии, соответствующий 70%, что составит 2,1 ГДж/т для получения 1 т продукции. Приведем данную величину к более понятному эквивалентному расходу природного газа в физических единицах объема. Низшая теплота сгорания природного газа в настоящее время составляет в среднем 33,3 МДж/м³ (7950 ккал/м³). Таким образом, на обжиг и сушку предлагается использовать не более 63 м³ природного газа на 1 т продукции. Поскольку тепловой энергии, поступающей из зоны охлаждения печи, как правило, достаточно для проведения сушильного процесса, можно принять, что для НДТ верхний предел по расходу природного газа на обжиг составляет 63 м³/т.

В данной ситуации представляет интерес сравнение полученного результата с нормами расхода природного газа на обжиг кирпича в СССР. Так, в работе [6] приведены удельные расходы условного топлива для обжига кирпича в кольцевых и туннельных печах, составляющие 130–150 кг у. т. на 1000 шт. кирпича. Килограмм условного топлива (у. т.) имеет низшую теплоту сгорания 7000 ккал. Примем вес одного условного кирпича равным 3,5 кг. В результате получим, что в СССР критерий потребления тепловой энергии на обжиг кирпича находился в диапазоне 33–38 м³ природного газа на 1 т продукции.

Теперь оценим расход природного газа на обжиг продукции в камерной колпаковой печи. Примем температуру обжига 1000°C. В таком случае на нагрев керамических изделий потребуется энергия, эквивалентная тепловой энергии от сжигания 30 м³ природного газа на 1 т продукции. При этом затраты на аккумуляцию теплоты тепловой изоляцией печи составят дополнительно 20%, т. е. 6 м³/т, потери через наружную стенку и футеровку печи примем равными 5%, что составит дополнительно 1,5 м³/т; также примем среднюю температуру отходящих продуктов сгорания, равную примерно 600°C, что составит 27% энергии от теплоты на нагрев садки, футеровки и потерь через стенку, т. е. 10 м³/т. Таким образом, общий расход на обжиг 1 т изделий составит 48 м³ природного газа. Этот показатель укладывается в верхний предел НДТ по расходу природного газа на обжиг при использовании стандартных горелок без рекуперации тепловой энергии.

Использование теплоты, отводимой из пламенных печей, имеет важное экономическое значение. Одним из способов использования этого тепла является рекуперация, т. е. нагрев воздуха и газа отводимыми из печи продуктами сгорания для повышения эффективности использования топлива. Приведем формулу экономии теплоты при рекуперации из «Упрощенной методики теплотехнических расчетов» [7]:

$$\Theta = \frac{R \cdot a}{\Theta - a + R \cdot a} \cdot 100\%,$$

где Θ – экономия теплоты в % по отношению к расходу теплоты без рекуперации; a – доля от единицы

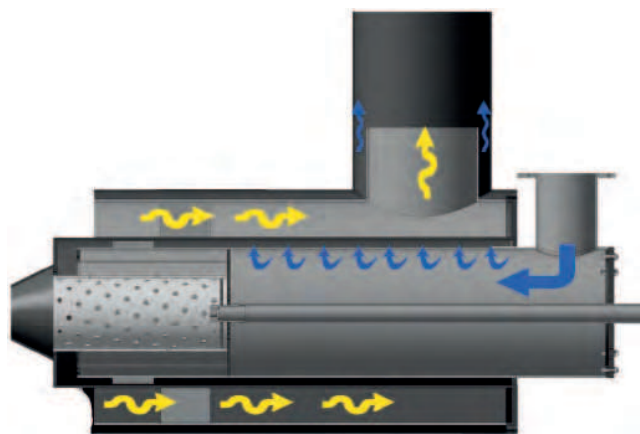


Рис. 1. Рекуперативная горелка
Fig. 1. Recuperative burner



Рис. 2. Колпаковая печь
Fig. 2. Bell furnace

потерь теплоты с продуктами горения; R – степень рекуперации теплоты.

Согласно этой формуле экономия теплоты, вводимой с топливом в рабочее пространство печи, превышает экономию теплоты от рекуперации ($R \cdot a$), так как числитель меньше или равен единице (≤ 1). Таким образом, согласно проведенной формуле в случае рекуперации теплоты имеет место повышение эффективности использования топлива в пламенных печах, что связано с интенсификацией процессов теплообмена.

ООО «КОМАС» разработало и внедрило в производство рекуперативные горелки для пламенных печей различных отраслей промышленности (рис. 1). Согласно рассмотренной выше формуле экономия топлива при применении рекуперативных горелок КОМАС при средней температуре печи 600°C составит 23% в случае подогрева воздуха до 350°C, со сте-



Рис. 3. Термический нейтрализатор
Fig. 3. Thermal neutralizer



Рис. 4. Футеровка печи
Fig. 4. Kiln lining



Рис. 5. Автоматические горелки печи
Fig. 5. Automatic furnace burners

пению рекуперации 0,53, что сократит общий расход топлива на обжиг 1 т изделия до 37 м³ природного газа. Полученный показатель находится в допустимых пределах, приведенных в работе [3], и укладывается в советские нормы. Более того, при применении указанной технологии в случае объединения нескольких печей в один обжиговый комплекс можно при использовании на начальном этапе обжига теплоты охлаждающего воздуха от соседней печи добиться дополнительной экономии природного газа не менее чем на 30%. Это в результате приведет к тому, что общий расход топлива на обжиг 1 т изделия снизится до 27 м³ природного газа.

Важнейшим показателем НДТ является снижение количества вредных выбросов в окружающую среду [8]. При сжигании природного газа основными загрязнителями окружающей среды являются монооксид углерода и оксиды азота [9]. Критериями НДТ для выбросов СО и NO_x в данном случае являются значения показателей выбросов ≤0,8 и ≤0,5 кг/т на 1 т продукции соответственно. Оценим количество выбросов, вносимых продуктами горения природного газа в окружающую среду. Верхний предел в 3500 мг/м³ при сжигании 1 м³ природного газа для выбросов СО и NO_x установлен для печей с температурой рабочего пространства до 1300°С. Для котельных установок этот критерий составляет 1000 мг/м³. Горелки КОМАС производят выбросы СО и NO_x менее 500 мг/м³ на 1 м³ природного газа при температуре рабочего пространства печи до 1000°С, причем при применении активных рекуператоров в них производится дополнительный дожиг монооксида углерода, в результате чего выброс СО снижается до 50–100 мг/м³ на 1 м³ природного газа. При использовании стандартных горелок фирмы КОМАС с максимальным расходом природного газа, составляющим 48 м³ на 1 т продукции, выбросы СО и NO_x не превысят 24 г/т на 1 т продукции, что в 30 раз меньше обозначенного критерия НДТ. Следует отметить, что вредные выбросы в продуктах сгорания природного газа при использовании горелок различных типов на порядок меньше критерия НДТ, в то время как основные выбросы обусловлены возгонкой органики и выгорающих добавок в обжигаемом технологическом материале.

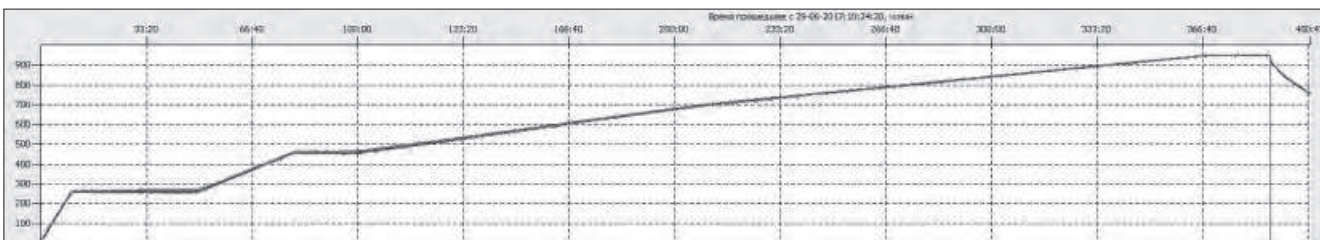


Рис. 6. График обжига
Fig. 6. Firing schedule

Нормирование не распространяется на производство поризованных изделий, уровень выбросов от обжига которых увеличивается как минимум на порядок. Кроме того, не нормируются НДТ летучих органических соединений, выброс которых при применении органических добавок в сырье весьма значителен.

Проведенная оценка критериев НДТ наглядно демонстрирует, что колпаковая печь является весьма перспективным тепловым агрегатом для обжига керамических изделий. Колпак обеспечивает абсолютную герметичность рабочего пространства печи, что позволяет вести тепловой процесс под избыточным давлением в рабочем пространстве печи, обеспечивая высокую равномерность температурного поля печи на всех стадиях обжига, что, в свою очередь, ведет к существенному сокращению времени обжига при гарантированном высоком качестве обожженной продукции. В герметичном рабочем пространстве печи можно создавать восстановительную среду продуктами неполного сгорания природного газа для проведения, например, флешинга или редуцированного обжига. Продукты неполного сгорания нейтрализуются в активном рекуператоре при взаимодействии с системой струй, передавая теплоту сгорания первичному воздуху, поступающему в камеру сгорания горелки. При начальной температуре обжига 200–400°C выделяющиеся летучие соединения эвакуируются в термический нейтрализатор, где происходит их полное дожигание с минимальными выбросами CO и NO_x.

Нами разработан и внедрен комплекс обжига графитовых изделий, включающий колпаковую печь (рис. 2) и термический нейтрализатор, служащий для обезвреживания образующихся из обжигаемой продукции летучих органических соединений (рис. 3). Футеровка стен и свода печи традиционно выполнена из керамоволокна (рис. 4), под печи футерован огнеупорным бетоном и имеет двойной лабиринт, песочный и водяной затвор (рис. 2).

Термический нейтрализатор представляет собой нефутерованную печь струйно-факельного дожигания летучих органических веществ, оборудованную кольцевой горелкой, через которую проходит весь объем эвакуируемых из печи газов. При взаимодействии с многоструйным факелом происходит возгорание летучих веществ с последующим их полным дожиганием

струями воздуха в рабочем пространстве печи. Замеры отходящих из печи газов, проведенные независимым экспертным центром, показали отсутствие следов ароматических веществ; выбросы CO и NO_x укладывались в нормы для нагревательных печей.

Автоматические горелки расположены на противоположных боковых стенах диагонально в шахматном порядке (рис. 5). Горелки ГСП-10 с широким диапазоном изменения коэффициента избытка воздуха от 1 до 10 при минимальных вредных выбросах во всем диапазоне изменения коэффициента обеспечивают требуемый медленный равномерный нагрев, поддержание заданных значений температуры в условиях мощных неконтролируемых выбросов органических веществ с последующей безопасной транспортировкой летучих органических веществ в составе продуктов сгорания по подземному газоходу к термическому нейтрализатору (установке полного дожигания).

АСУ ТП печи, построенная на базе отечественного контроллера и промышленного компьютера, автоматически управляет тепловыми процессами печи и режимом дожигания нейтрализатора. Тепловой процесс ведется по шести термопарам, каждая из шести автоматических горелок управляется индивидуально. Все горелки оснащены узлом подачи азота для нейтрализации взрывного распространения горения в случае мощного выброса летучих органических веществ. Графиком обжига предусмотрены выдержки при начале выхода летучих при температуре 250°C и их наиболее интенсивном выделении при температуре 450°C. По результатам эксплуатации печи все графики были выдержаны, никаких эксцессов не наблюдалось. График обжига (рис. 6) выдерживался АСУ ТП с точностью ±3°C в течение 17 сут проведения процесса.

В зависимости от габаритов колпаковая печь может обжигать от 1 до 4 млн шт. усл. кирпича в год. Вопрос о камерных печах обсуждался в ряде публикаций, в частности был изложен опыт разработки, изготовления и эксплуатации камерных печей для производства клинкерной плитки [10]. Объединение нескольких печей в единый комплекс позволяет выйти на массовый выпуск керамических изделий с улучшением показателей НДТ по энергетике и вредным выбросам и перевести обжиговой процесс в III категорию вредности [11].

Список литературы

1. Курносов В.В., Дорожкин А.А., Калинина Н.Н., Тихонова В.Р., Филатов А.В. Энергоэффективные технологии обжига керамических изделий в камерных печах // *Строительные материалы*. 2016. № 4. С. 37–40.
2. Гусева Т.В., Захаров А.И., Молчанова Я.П., Вартанян М.А., Акберов А.А. Наилучшие доступные технологии производства керамических строительных материалов как инструмент экологического нормирования отрасли // *Строительные материалы*. 2016. № 4. С. 4–9.

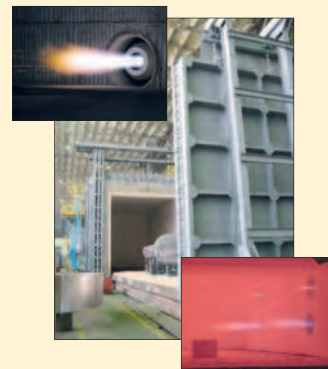
References

1. Kurnosov V.V., Dorozhkin A.A., Kalinina N.N., Tikhonova V.R., Filatov A.V. Energy-efficient technologies for firing ceramic products in chamber kilns. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2016. No. 4, pp. 37–40. (In Russian).
2. Guseva T.V., Zakharov A.I., Molchanova Ya.P., Vartanyan M.A., Akberov A.A. Best available technologies for the production of ceramic building materials as a tool for environmental regulation of the industry. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2016. No. 4, pp. 4–9. (In Russian).

3. Информационно-технический справочник «Производство керамических изделий» ИТС 4. М.: Бюро НДТ, 2015. 222 с.
4. Amr Osama, Fatheya Soliman. Industrial Energy Efficiency. Benchmarking-Report of the Ceramics Sector. 2016. <https://ieeegypt.org/wp-content/uploads/2017/01/BM-Report-Ceramics.pdf>
5. ГОСТ Р 55646–2013. Ресурсосбережение. Производство кирпича и камня керамического. Руководство по применению наилучших доступных технологий повышения энергоэффективности и экологической результативности. М.: Стандартинформ, 2014.
6. Преображенский Н.И. Контроль за рациональным использованием газа. Л.: Недра, 1983. С. 368.
7. Равич М.Б. Упрощенная методика теплотехнических расчетов. М.: Наука, 1964.
8. OECD (2019), Best Available Techniques for Preventing and Controlling Industrial Pollution, Activity 3: Measuring the Effectiveness of BAT Policies, Environment, Health and Safety, Environment Directorate, OECD.
9. Lecomte T., Ferreria De La Fuente J., Neuwahl F., Canova M., Pinasseau A., Jankov I., Brinkmann T., Roudier S. and Delgado Sancho L., Best available techniques (BAT) reference document for large combustion plants. Industrial emissions directive 2010/75/EU (Integrated Pollution Prevention and Control), EUR 28836 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2017, ISBN 978-92-79-74303-0, doi:10.2760/949, JRC107769.
10. Шахов И.И., Курносое В.В. Четырехкамерная печь для обжига керамических изделий // *Строительные материалы*. 2003. № 2. С. 24.
11. Постановление Правительства РФ от 28 сентября 2015 г. № 1029 «Об утверждении критериев отнесения объектов, оказывающих негативное воздействие на окружающую среду, к объектам I, II, III и IV категорий».
3. Informatsionno-tekhnicheskii spravochnik «Proizvodstvo keramicheskikh izdeliy» ITS 4 [Information and technical reference book “Production of ceramic products” ITR 4]. Moscow: Byuro NDT. 2015. 222 p.
4. Amr Osama, Fatheya Soliman. Industrial Energy Efficiency. Benchmarking-Report of the Ceramics Sector. 2016. <https://ieeegypt.org/wp-content/uploads/2017/01/BM-Report-Ceramics.pdf>
5. GOST R 55646–2013. Resource saving. Production of bricks and ceramic stone. Guidance on the application of the best available technologies for improving energy efficiency and environmental performance. Moscow: Standartinform. 2014. (In Russian).
6. Preobrazhensky N.I. Kontrol' za ratsional'nyim ispol'zovaniyem gaza [Control over the rational use of gas]. Leningrad: Nedra. 1983. p. 368.
7. Ravich M.B. Uproshchennaya metodika teplotekhnicheskikh raschetov [Simplified method of heat engineering calculations]. Moscow: Nauka. 1964.
8. OECD (2019), Best Available Techniques for Preventing and Controlling Industrial Pollution, Activity 3: Measuring the Effectiveness of BAT Policies, Environment, Health and Safety, Environment Directorate, OECD.
9. Lecomte T., Ferreria De La Fuente J., Neuwahl F., Canova M., Pinasseau A., Jankov I., Brinkmann T., Roudier S. and Delgado Sancho L., Best available techniques (BAT) reference document for large combustion plants. Industrial emissions directive 2010/75/EU (Integrated Pollution Prevention and Control), EUR 28836 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2017, ISBN 978-92-79-74303-0, doi:10.2760/949, JRC107769.
10. Shakhov I.I., Kurnosov V.V. Four-chamber kiln for firing ceramic products. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2003. No. 2. p. 24. (In Russian).
11. Decree of the Government of the Russian Federation of September 28, 2015 No. 1029 “On approval of the criteria for classifying objects that have a negative impact on the environment as objects of categories I, II, III and IV.” (In Russian).

ООО «КОМАС» – 30 лет качества и инноваций

- ✓ Более чем тридцатилетний опыт экспериментально-исследовательской, проектно-конструкторской и внедренческой работ в области печной теплотехники и автоматизации.
- ✓ Газогорелочное оборудование и технологии нагрева собственной разработки.
- ✓ Работа по цепочке: «Технологическая задача – экспериментальный образец – готовое изделие – промышленная эксплуатация».
- Сроки выполнения от трех месяцев до 1 года.
- ✓ Каждое изделие ООО «КОМАС» адаптируется к конкретным условиям и задаваемым Заказчиком конструктивным, технологическим и теплотехническим параметрам в пределах ГОСТов.
- ✓ На протяжении монтажа, пуско-наладочных работ и ввода в эксплуатацию сотрудники компании осуществляют постоянный контроль и авторский надзор за качеством проводимых работ. Техническое сопровождение при эксплуатации.
- ✓ Применение отечественных аппаратных средств АСУТП.
- ✓ Наши изделия защищены патентами



kbb@komas.ru

+7 (916) 843-99-69

02052023

УДК 699.86

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-813-5-53-57>

П.П. ПАСТУШКОВ^{1,2}, канд. техн. наук (pavel-one@mail.ru),
 Н.В. ПАВЛЕНКО^{1,2}, канд. техн. наук (nv-pavlenko@mail.ru);
 С.И. СМІРНОВ³, инженер (sergey.smi85@gmail.com)

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

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

³ Ассоциация производителей керамических строительных материалов (115477, г. Москва, Кавказский бул., 20, стр. 1)

Исследования влияния различных факторов на теплопроводность крупноформатных керамических камней

Описано комплексное исследование влияния различных факторов на теплопроводность образцов крупноформатных керамических камней отечественного производства на примере шести различных марок. Выявлены проблемы при испытаниях теплопроводности крупноформатных керамических камней по методикам действующих нормативных документов. Испытания проведены по общей методике для строительных материалов ГОСТ 7076 на самом современном оборудовании, что позволило найти ряд зависимостей. Было установлено влияние следующих факторов на теплопроводность камня в сухом состоянии: количество рядов пустот в камне, форма пустот, плотность и теплопроводность керамического черепка. Лучшие теплотехнические показатели были определены у камней с HV дизайном пустот, с количеством рядов пустот более 6,8 шт. на 100 мм длины и наименьшей плотностью и теплопроводностью черепка. Отдельно замечено, что наличие крупных отверстий для захвата пальцами при монтаже кладки в камне негативно сказывается на его теплопроводности. Полученные новые результаты имеют большую практическую значимость в связи с широким применением крупноформатных керамических камней в современном строительстве. Описаны перспективы дальнейших исследований по определению степени влияния различных факторов на теплопроводность камней, выявлению оптимальной формы пустот, а также по установлению зависимости теплопроводности от средней температуры и эксплуатационной влажности.

Ключевые слова: теплопроводность, конвекция, кондукция, крупноформатный керамический камень, дизайн пустот, керамический черепок.

Для цитирования: Пастушков П.П., Павленко Н.В., Смирнов С.И. Исследования влияния различных факторов на теплопроводность крупноформатных керамических камней // *Строительные материалы*. 2023. № 5. С. 53–57.
 DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-813-5-53-57>

P.P. PASTUSHKOV^{1,2}, Candidate of Sciences (Engineering) (pavel-one@mail.ru),

N.V. PAVLENKO^{1,2}, Candidate of Sciences (Engineering) (nv-pavlenko@mail.ru);

S.I. SMIRNOV³, Engineer (sergey.smi85@gmail.com)

¹ Scientific-Research Institute of Building Physics of RAACS (21, Lokomotivny Driveway, Moscow, 127238, Russian Federation)

² Institute of mechanics Lomonosov Moscow State University (1, Michurinsky Avenue, Moscow, 119192, Russian Federation)

³ Association of Ceramic Materials Manufacturers (115477, Moscow, Kavkazsky Boulevard, 20 p. 1)

Research of the Influence of Various Factors on the Thermal Conductivity of Large-Format Vertically Perforated Clay Blocks

The article is devoted to the description of complex studies of the influence of various factors on the thermal conductivity of samples of large-format vertically perforated clay blocks of domestic production of 6 types different samples. Problems are described when testing the thermal conductivity of large-format vertically perforated clay blocks according to the methods of existing local standards. The research were carried out according to GOST 7076 on a modern equipment, which allowed us to find a number of dependencies. The influence of the following factors on the thermal conductivity of a clay block in a dry state was established: number of rows of voids in clay block, shape of voids, density and thermal conductivity of a ceramic cork. The best thermal values were determined for clay blocks with an HV design of voids, with number of rows of voids more than 6.8 pieces per 100 mm of length and the lowest density and thermal conductivity of the ceramic cork. Separately, it was noted that the presence of large holes for gripping with fingers when installing masonry in blocks has a negative effect on its thermal conductivity. The new results obtained are of great practical importance due to the widespread use of vertically perforated clay block in modern construction. Prospects for further research are described to determine the degree of influence of various factors on the thermal conductivity of clay blocks, to identify the optimal shape of voids, as well as to establish the dependence of thermal conductivity on average temperature and operating humidity.

Keywords: thermal conductivity, convection, conduction, large-format vertically perforated clay blocks, design of voids for clay blocks, thermal conductivity of a ceramic cork.

For citation: Pastushkov P.P., Pavlenko N.V., Smirnov S.I. Research of the influence of various factors on the thermal conductivity of large-format vertically perforated clay blocks. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2023. No. 5, pp. 53–57. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-813-5-53-57>

Керамические поризованные крупноформатные камни — одни из немногих современных строительных изделий массового производства, которые можно отнести к типу конструкционно-теплоизоляционных, т. е. одновременно выполняющих и несущую, и теплозащитную функции в ограждающих

конструкциях [1–3]. Поэтому актуальны работы, направленные на исследования их теплотехнических характеристик.

По данным Ассоциации производителей керамических стеновых материалов (АПКСМ), на территории РФ в настоящее время функционируют 11 пред-

приятий, которые находятся в разных регионах и специализируются на выпуске крупноформатных камней с различной конфигурацией пустот. Производители отрасли керамических строительных материалов проводят исследования теплотехнических показателей своих изделий, основываясь на методике, изложенной в ГОСТ 530–2012 «Кирпич и камень керамические. Общие технические условия» с учетом положений ГОСТ 26254–84 «Здания и сооружения. Методы определения сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций» и ГОСТ 25380–2014 «Здания и сооружения. Метод измерения плотности тепловых потоков, проходящих через ограждающие конструкции». Испытания по данным методикам заключаются в создании стационарного теплового потока через фрагмент кладки, смонтированной в климатической камере, определении термического сопротивления и дальнейшего расчета эффективной теплопроводности кладки.

Данный подход имеет ряд существенных недостатков, главный из которых – большая трудоемкость, длительность (до двух месяцев) и соответственно стоимость испытаний, связанные с монтажом кладки (с размерами не менее 1,5×1,5 м) и дальнейшими технологическими операциями. При этом результаты имеют большую погрешность, так как используются приборы по измерению плотности тепловых потоков с низкой точностью, а на фиксируемые показатели может влиять ряд факторов: размер испытываемого фрагмента кладки, влажность и температура в помещении и др.

Для большинства строительных материалов испытания теплопроводности проводятся по общей методике ГОСТ 7076–99 «Материалы и изделия строительные. Метод определения теплопроводности и термического сопротивления при стационарном тепловом режиме» на образцах в виде квадратных пластин [4]. Испытания одной марки материала (проводимые на 3–5 образцах) по этой методике длятся несколько дней, а их стоимость на порядок ниже, чем испытаний на фрагменте кладки. При этом погрешность на заводских приборах – измерителях теплопроводности значительно ниже, чем на датчиках плотности теплового потока, используемых при испытаниях кладок. Однако до недавнего времени проводить испытания крупноформатных керамических камней по методике ГОСТ 7076 было невозможно из-за отсутствия подходящих приборов: толщина образцов на традиционных приборах должна составлять не более 100 мм, при этом для различных поризованных крупноформатных камней на 100 мм длины приходится от 4 до 9 рядов пустот, поэтому изготовить подходящий образец такой толщины не представляется возможным. Эта проблема была решена благодаря появлению по программе Минстроя РФ в секторе испытаний теплофизических характеристик строительных материалов лаборатории строительной теплофизики НИИСФ РААСН самого современного оборудования.

Настоящая статья посвящена описанию результатов исследований теплопроводности образцов крупноформатных керамических камней различных конструкций, проведенных за последние два года по методике ГОСТ 7076, и полученных при этом закономерностях.

Результаты экспериментальных исследований

Испытания проводились на приборе для измерения теплопроводности Lambda-Meter EP500e с расширенным функционалом и минимальной погрешностью измерений среди всех мировых аналогов (менее 1%) [5]. Для испытаний подготавливались образцы из крупноформатных керамических камней толщиной около 120 мм (камень распиливался, поверхность распила шлифовалась), при этом контролировалось, чтобы пустотность образца была равна пустотности целого камня. Образцы высушивались до постоянной массы, оборачивались полиэтиленовой пленкой, чтобы предотвратить свободную циркуляцию воздуха через пустоты камня (это условие выполняется и в реальных ограждающих конструкциях), и размещались в приборе таким образом, чтобы тепловой поток проходил так же, как если бы камень находился в составе ограждающей конструкции (рис. 1, а). Во время испытаний по краям от образца была размещена минераловатная изоляция (по рекомендации от производителя прибора для дополнительной тепловой изоляции от окружающего воздуха) (рис. 1, б).

Всего были исследованы образцы крупноформатных керамических камней отечественного производства шести марок различных конструкций (рис. 2).

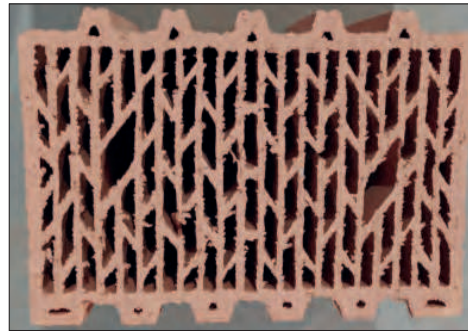
Кроме теплопроводности в сухом состоянии для испытанных марок керамических камней были исследованы факторы, которые теоретически могут оказывать влияние на теплопроводность: количество рядов пустот на 100 мм длины, толщина внутренней стенки, пустотность, средняя плотность и теплопроводность керамического черепка. Все испытанные марки камней имели формат 10,7 НФ (размеры целого камня 380×250×219 мм), кроме марки № 2 формата 8,6 НФ (размеры целого камня 300×250×219 мм). В таблице представлены результаты проведенных исследований. Испытания теплопроводности проводились при средней температуре в образце 0°С. За результат испытаний принимались среднеарифметические значения теплопроводности всех испытанных образцов марки (3–5 образцов для каждой марки).

Анализ результатов исследований

По результатам проведенных исследований было установлено, что на теплопроводность крупноформатного керамического камня наибольшее влияние оказывает конструкция (дизайн) камня, т. е. геометрическая конфигурация пустот, и количество рядов пустот, приходящееся на единицу длины. Найденная зависимость заключается в том, что чем больше рядов пустот содержится в одном камне, тем меньше у него



Рис. 1. Испытания теплопроводности образцов керамических крупноформатных камней на приборе Lambda-Meter EP500e
Fig. 1. Thermal conductivity tests of ceramic large-format clay blocks on the Lambda-Meter EP500e device



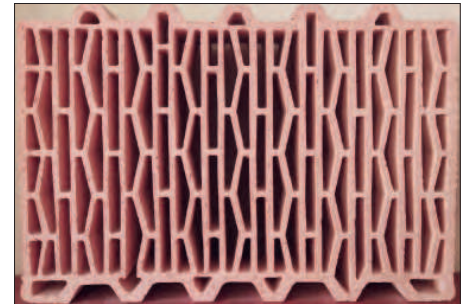
Марка № 1 Керамический крупноформатный камень с пустотами в виде параллелограмма и отверстиями для захвата пальцами



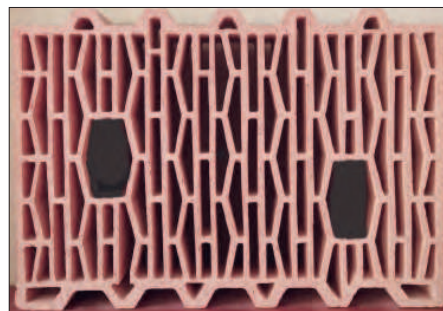
Марка № 2 Керамический крупноформатный камень с пустотами в виде параллелограмма



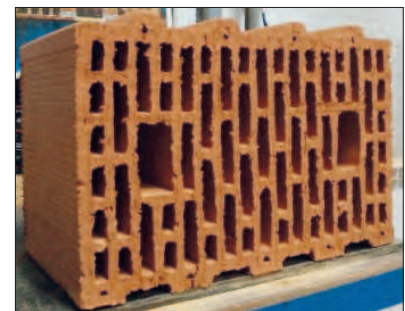
Марка № 3 Керамический крупноформатный камень с пустотами в виде прямоугольника и треугольника (HV дизайн пустот) и отверстиями для захвата пальцами



Марка № 4 Керамический крупноформатный камень с пустотами в виде прямоугольника и треугольника (HV дизайн пустот)



Марка № 5 Керамический крупноформатный камень с пустотами в виде прямоугольника и треугольника (HV дизайн пустот) и отверстиями для захвата пальцами



Марка № 6 Керамический крупноформатный камень с пустотами в виде прямоугольника и отверстиями для захвата пальцами

Рис. 2. Исследованные керамические крупноформатные камни различных конструкций
Fig. 2. Investigated large-format clay blocks of various designs

Результаты исследований керамических крупноформатных камней
Results of research of large-format clay blocks

№ марки	Кол-во рядов пустот на 100 мм длины, шт.	Средняя толщина внутренней стенки, мм	Пустотность, %	Средняя плотность керам. черепка ρ_c , кг/см ³	Теплопроводность керам. черепка λ_c , Вт/(м·°C)	Теплопроводность камня в сухом состоянии λ_0 , Вт/(м·°C)
1	5,53	6	56	1,65	0,415	0,124
2	4,67	3	52	1,58	0,42	0,135
3	8,95	3	57	1,72	0,457	0,109
4	6,84	5	52	1,5	0,384	0,105
5	6,84	5	52	1,5	0,384	0,11
6	4,47	7	56	1,67	0,404	0,144

значение теплопроводности. Марки камней, у которых была зафиксирована наименьшая теплопроводность (№ 3, 4, 5), имели форму рядов пустот в сечении в виде сочетания треугольника и прямоугольника (HV дизайн пустот). Чтобы однозначно установить, является ли этот дизайн камней наиболее эффективным в теплотехническом плане, необходимо проводить дополнительные исследования, в том числе с численным моделированием [6, 7]. На значение теплопроводности целого камня также оказывает влияние теплопроводность керамического черепка, однако степень влияния этого фактора меньше, чем количество рядов пустот на единицу длины: например, у марки № 6 теплопроводность черепка достаточно низкая относительно других марок, при этом теплопроводность всего камня самая большая из всех испытанных марок, так как на один камень приходится наименьшее количество рядов пустот. Стоит отметить также установленное негативное влияние наличия крупных отверстий для захвата пальцами в камне на его теплопроводность – это видно на примере марок № 4 и 5, имеющих одинаковые характеристики, кроме этого фактора (марка № 5 с отверстиями под пальцы имеет большее значение теплопроводности, чем марка № 4 без отверстий). В рамках проведенных исследований не установлено прямой зависимости от теплопроводности камня толщины внутренней стенки и пустотности.

Теплопроводность в пористом строительном материале обусловлена различными взаимовлияющими физическими процессами, которые могут быть сведены к трем типам: кондукция, конвекция и излучение, и осуществляется посредством теплопроводности твердого скелета, образующего пористую структуру материала; теплопроводности газа, находящегося в порах и пустотах; излучения между стенками пор и пустот; конвективного переноса теплоты за счет конвективных токов газа в пустотах [8]. Для крупноформатных керамических камней теплоизоляционные свойства обеспечиваются в основном теплопроводностью воздуха, находящегося в пусто-

тах. При этом уменьшение ширины пустот (увеличение количества рядов пустот на единицу длины) позволяет снизить конвективный теплоперенос в камне. Наряду с этим снижение теплопроводности керамического черепка сказывается на снижении кондуктивного теплопереноса по скелету камня. Вклад этих процессов в суммарную теплопроводность крупноформатных керамических камней должен быть исследован отдельно.

Заключение

В секторе испытаний теплофизических характеристик строительных материалов лаборатории строительной теплофизики НИИСФ РААСН проведены на современном испытательном оборудовании комплексные исследования влияния различных факторов на теплопроводность образцов крупноформатных керамических камней отечественного производства на примере шести различных марок. Было установлено влияние следующих факторов на теплопроводность камня в сухом состоянии: количество рядов пустот в камне, форма пустот, плотность и теплопроводность керамического черепка. Лучшие теплотехнические показатели были определены у камней с HV дизайном пустот, с количеством рядов пустот более 6,8 шт. на 100 мм длины, наименьшей плотностью и теплопроводностью черепка. Отдельно замечено, что наличие в камне крупных отверстий для захвата пальцами при монтаже кладки негативно сказывается на его теплопроводности из-за увеличения конвективного теплопереноса. Представленные исследования можно продолжить с использованием методов численного моделирования для определения степени влияния различных факторов на теплопроводность камня, выявления оптимальной формы пустот и др. Отдельными важными для проектирования ограждающих конструкций с применением крупноформатных керамических камней задачами будут являться дальнейшие исследования по установлению зависимости теплопроводности от средней температуры и эксплуатационной влажности [9, 10].

Список литературы

1. Семёнов А.А. Тенденции развития кирпичной промышленности и кирпичного домостроения в России // *Строительные материалы*. 2018. № 8. С. 49–51. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2018-762-8-49-51>
2. Рубцов О.И., Боброва Е.Ю., Жуков А.Д., Зиновьева Е.А. Керамический кирпич, камни и полнокирпичные стены // *Строительные материалы*. 2019. № 9. С. 8–13. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-774-9-8-13>
3. Гринфельд Г.И., Вишневецкий А.А., Пастушков П.П., Козлов А.Н. Кирпичные фасады. Правильные технические решения и примеры успешной реализации // *Строительные материалы*. 2017. № 4. С. 47–50.

References

1. Semenov A.A. Trends in development of brick industry and brick housing construction in Russia. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2018. No. 8, pp. 49–51. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2018-762-8-49-51>
2. Rubtsov O.I., Bobrova E.Yu., Zhukov A.D., Zinov'eva E.A. Ceramic brick, stones and the full brick walls. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2019. No. 9, pp. 8–13. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-774-9-8-13>
3. Grinfeld G.I., Vishnevsky A.A., Pastushkov P.P., Kozlov A.N. Brick facades. Correct technical solutions and examples of successful implementation. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2017. No. 4, pp. 47–50. (In Russian).

4. Пастушков П.П. О проблемах определения теплопроводности строительных материалов // *Строительные материалы*. 2019. № 4. С. 57–63. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-769-4-57-63>
5. Пастушков П.П. Новые результаты и методические наработки по исследованиям теплопроводности автоклавного ячеистого бетона современного производства // *Строительные материалы*. 2022. № 3. С. 46–50. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-800-3-46-50>
6. Morales M.P., Juárez M.C., Muñoz P., Gómez J.A. Study of the geometry of a voided clay brick using non-rectangular perforations to optimise its thermal properties // *Energy and Buildings*. 2011. Vol. 43. Iss. 9.
7. Juárez M.C., Morales M.P., Muñoz P., Mendivil M.A. Influence of horizontal joint on the thermal properties of single-leaf walls with lightweight clay blocks // *Energy and Buildings*. 2012. Vol. 49.
8. Киселев И.Я. Повышение точности определения теплофизических свойств теплоизоляционных строительных материалов с учетом их структуры и особенностей эксплуатационных воздействий: Дис. ... д-ра техн. наук. М., 2006. 366 с.
9. Пастушков П.П., Гагарин В.Г. Исследования зависимости теплопроводности и коэффициента теплотехнического качества от плотности автоклавного газобетона // *Строительные материалы*. 2017. № 5. С. 26–28.
10. Гагарин В.Г., Пастушков П.П. Определение расчетной влажности строительных материалов // *Промышленное и гражданское строительство*. 2015. № 8. С. 28–33.
4. Pastushkov P.P. On the problems of determining the thermal conductivity of building materials. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2019. No. 4, pp. 57–63. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-769-4-57-63>
5. Pastushkov P.P. New results and methodological developments on thermal conductivity studies of autoclave cellular concrete of modern production. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2022. No. 3, pp. 46–50. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-800-3-46-50>
6. Morales M.P., Juárez M.C., Muñoz P., Gómez J.A. Study of the geometry of a voided clay brick using non-rectangular perforations to optimise its thermal properties. *Energy and Buildings*. 2011. Vol. 43. Iss. 9.
7. Juárez M.C., Morales M.P., Muñoz P., Mendivil M.A. Influence of horizontal joint on the thermal properties of single-leaf walls with lightweight clay blocks. *Energy and Buildings*. 2012. Vol. 49.
8. Kiselev I.Ya. Improving the accuracy of determining the thermophysical properties of insulating building materials with regard to their structure and characteristics of operational impacts. Doctor diss. (Engineering). Moscow. 2006. 366 p. (In Russian).
9. Pastushkov P.P., Gagarin V.G. Studies of the dependence of thermal conductivity and the coefficient of thermal quality on the density of autoclaved aerated concrete. *Stroitel'nye materialy* [Construction Materials]. 2017. No. 5, pp. 26–28. (In Russian).
10. Gagarin V.G., Pastushkov P.P. Determination of the calculated moisture content of building materials. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2015. No. 8, pp. 28–33. (In Russian).

СПЕЦИАЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

Книга «Теоретические основы белизны и окрашивания керамики и портландцемента»

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

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

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

Книга «Технология производства стеновых цементно-песчаных изделий»

Авторы – Балакшин Ю.З., Терехов В.А.

Описано производство и применение стеновых материалов методом вибропрессования из цементно-песчаных бетонов. Рассмотрена существующая и перспективная номенклатура изделий и их свойства. Даны характеристики сырьевым материалам – песку, щебню, вяжущим и химическим добавкам и рекомендации по подбору состава бетонной смеси. Подробно представлена технология производства цементно-песчаных вибропрессованных стеновых изделий. Особое внимание уделено технологическому контролю на производстве и техническому контролю и обслуживанию оборудования. Книга предназначена для организации производственно-технического обучения на предприятии, будет полезна инженерно-техническому персоналу и широкому кругу специалистов.



Заказать литературу можно через редакцию

по тел.: (499) 976-22-08, 976-20-36; e-mail: mail@rifsm.ru, или оформить заявку на сайте www.rifsm.ru

А.И. БЕДОВ¹, канд. техн. наук (gbk@mgsu.ru); А.И. ГАБИТОВ², д-р техн. наук (azat7@ufanet.ru);
Е.В. ДОМАРОВА¹, старший преподаватель (gbk@mgsu.ru); А.С. САЛОВ², канд. техн. наук (salov@list.ru)

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

² Уфимский государственный нефтяной технический университет (450080, г. Уфа, ул. Менделеева, 195)

Напряженно-деформированное состояние сводов из каменной кладки, опирающихся на стальные балки в перекрытиях

Выполнен анализ напряженно-деформированного состояния одного из старейших видов конструкций перекрытий, а именно, сводов из каменной кладки, опирающихся на стальные балки (в ряде случаев на стальные рельсы), так называемых сводов Монье. Как правило, указанное конструктивное решение применялось в перекрытиях над подвалами и сохранилось до настоящего времени в Москве, Санкт-Петербурге и других городах. Проанализировано одно из зданий, расположенных на Тверской улице в Москве. Учитывая специфику напряженно-деформированного состояния рассматриваемых конструкций при наличии в ряде случаев в них повреждений, анализ выполнен в программе Лира САПР 2019 (R2), в которой параметры материала задавались по 14-му кусочно-линейному закону. По результатам расчета получены значения прогибов, максимальные значения усилий N_x , N_y , Q_x , Q_y , M_x , M_y , главных напряжений в нижнем и верхнем слоях свода σ_1 и σ_2 , усилий Q_z и M_y в стальных балках свода с учетом их совместной работы со сводом. Построены и проанализированы расчетные модели для кладки сводов в линейной и нелинейной постановке. При этом результаты сопоставления различных моделей показали, что в металлических балках при пассивной нагрузке от свода без его включения в работу возникают большие напряжения, возможна потеря ими несущей способности. Произведена оценка несущей способности стальных балок по двум группам предельных состояний с учетом их совместной работы со сводами, а также проверка несущей способности по местной устойчивости с учетом работы свода.

Ключевые слова: каменная кладка, повреждения каменной кладки, сложное напряженно-деформированное состояние, объект культурного наследия, своды Монье.

Для цитирования: Бедов А.И., Габитов А.И., Домарова Е.В., Салов А.С. Напряженно-деформированное состояние сводов из каменной кладки, опирающихся на стальные балки в перекрытиях // *Строительные материалы*. 2023. № 5. С. 58–65.
DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-813-5-58-65>

A.I. BEDOV¹, Candidate of Science (Engineering) (gbk@mgsu.ru); A.I. GABITOV², Doctor of Science (Engineering) (azat7@ufanet.ru);
E.V. DOMAROVA¹, Senior lecturer (gbk@mgsu.ru); A.S. SALOV², Candidate of Science (Engineering) (salov@list.ru)

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

² Ufa State Petroleum Technological University (195, Mendeleev, Ufa, 19500, Russian Federation)

Stress-Strain State of Masonry Vaults Supported by Steel Beams in Ceilings

An analysis of the stress-strain state of one of the oldest types of floor structures, namely, masonry vaults supported by steel beams (in some cases, by steel rails), the so-called Monnier vaults, was carried out. As a rule, the indicated constructive solution of ceilings was used in ceilings above basements and has been preserved to this day in Moscow, St. Petersburg and other cities. The analysis was performed for one of the buildings located on Tverskaya Street in Moscow. Taking into account the specifics of the stress-strain state of the structures under consideration, taking into account the presence of damage in some cases, the analysis was carried out in the Lira CAD 2019 (R2) program, in which the material parameters were set according to the 14 piecewise linear law. Based on the results of the calculation, the values of deflections, the maximum values of the forces N_x , N_y , Q_x , Q_y , M_x , M_y , the principal stresses in the lower and upper layers of the roof σ_1 and σ_2 , the forces Q_z and M_y in the steel beams of the roof, taking into account their joint work with the vault, were obtained. Design models for laying vaults in linear and non-linear formulations have been built and analyzed. At the same time, the results of a comparison of various models showed that in metal beams with a passive load from the vault without its inclusion in the work, large stresses arise, and they may lose their bearing capacity. The bearing capacity of steel beams was evaluated for two groups of limit states, taking into account their joint work with vaults, as well as the bearing capacity was checked for local stability, taking into account the operation of the vault.

Keywords: masonry, damage to masonry, complex stress-strain state, object of cultural heritage, Monnier vaults.

For citation: Bedov A.I., Gabitov A.I., Domarova E.V., Salov A.S. Stress-strain state of masonry vaults supported by steel beams in ceilings. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2023. No. 5, pp. 58–65. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-813-5-58-65>

Каменная кладка как конструкционный материал для возведения зданий и сооружений применяется в практике строительства не одно тысячелетие. Материалы, используемые в каменной кладке, — кирпич/камень и раствор позволяют (при соответствующем их применении) создать единый монолитный материал — каменную кладку. Несмотря на то что за последнее столетие появилось значительное количество

новых материалов и технологий, способ сборки кирпичей, блоков и камней в кладку, по сути, остался таким же, как и тысячи лет назад. В большей степени он основан на эмпирическом опыте, и только в последние десятилетия начали появляться различные теории расчета и проектирования каменных конструкций.

Одной из наименее изученных областей является работа поврежденной каменной кладки в конструк-

циях. Во всем мире существует огромное количество зданий различного возраста с несущими конструкциями из каменной кладки, которые непрерывно стареют и требуют выполнения работ по их восстановлению и усилению с минимальным вмешательством в структуру кладки для сохранения их исторического облика.

Недостаточно развитые к настоящему времени методы расчета кладки при сложном ее напряженном состоянии, отсутствие единого подхода к такого рода расчетам и недостаток достоверной информации о влиянии тех или иных повреждений на прочность и устойчивость каменных конструкций приводят к тому, что в каждом случае требуется проводить большое количество прочностных испытаний и с индивидуальным подходом моделировать конструкцию в каком-либо специальном программном комплексе [1–3].

Несущая система рассматриваемых перекрытий включает цилиндрические своды из каменной кладки, опирающиеся на металлические балки (двутавры, железнодорожные рельсы) (рис. 1). Своды Монье получили широкое распространение в России начиная со второй половины XIX в. и до начала индустриализации. При этом их конструкция претерпела значительные изменения. К началу XX в. в общественную практику входят лучковые своды из бетона, бутобетона и железобетона, опирающиеся на стальные прокатные двутавровые балки. Здания с подобными перекрытиями появляются как в больших губернских центрах, так и в уездных портовых городах. В 1903 г. профессор А.Ф. Лолейт на съезде по расширению применения железа в России сделал доклад «Система Монье. Ее применение, промышленное значение и вопросы, связанные с распространением железобетона».

С теоретической точки зрения конструкция системы Монье представляет собой частный случай сложного упругого прямого или кривого бруса, сечение которого представлено из двух материалов с различными модулями упругости, соединенных между собой таким образом, что оба материала работают совместно как одно упругое тело.

Раньше согласно российским строительным нормам считалось, что каменные арки и своды должны рассматриваться с тем же подходом, что и конструкции каменных стен. Основные принципы этих норм основаны на исследованиях первой половины XX в., проведенных Л.И. Онищиком. Исследования проводились с экспериментами на вертикальных столбах из кирпичной кладки. Поэтому все полученные данные можно считать справедливыми именно для вертикальных конструкций — стен, столбов, внешней облицовки [4]. Однако кладка криволинейных арочных и сводчатых конструкций не может вести себя так же, как вертикальные, из-за усилий, действующих под различным углом ее структуры.

В случае арки из-за неопределенности, с одной стороны, может иметь место излишний запас и соот-

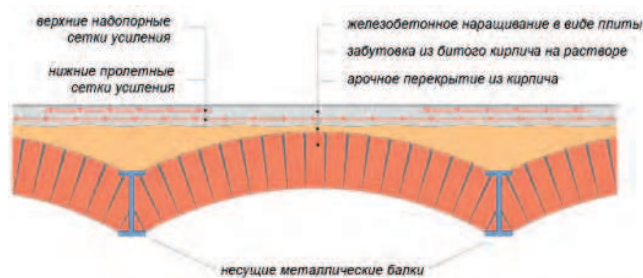


Рис. 1. Конструктивное решение сводов Монье
Fig. 1. Construction solution of Monier vaults

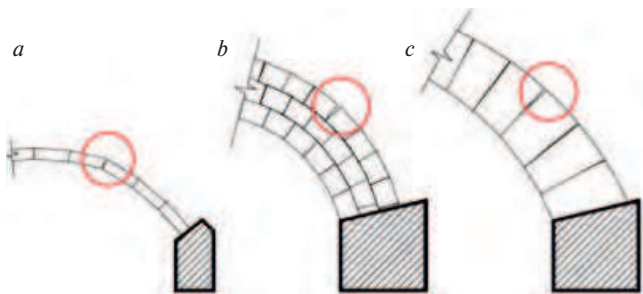


Рис. 2. Раскрытие шва: а – легкая готическая арка; б – многослойная кирпичная арка; с – массивная каменная арка

Fig. 2. Opening the seam: a – light gothic arch; b – layered brick arch; c – massive brick arch

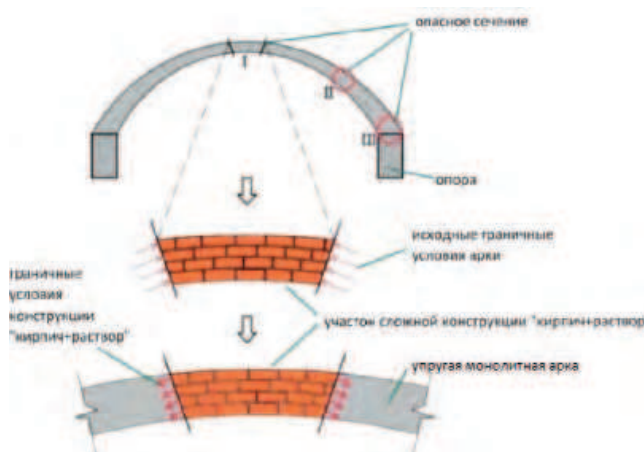


Рис. 3. Последовательность моделирования для опасного участка I арки
Fig. 3. Sequence of modeling for dangerous section of the 1st arch

ветственно низкий коэффициент использования материала. С другой стороны, запас может быть недостаточен и при неблагоприятных условиях может вызвать аварийное состояние.

Значения расчетного сопротивления кладки на растяжение близки к нулю. Это верно для тонких готических сводов, но для массивных сводов, которых большинство среди российских сводчатых конструкций, небольшое раскрытие шва верхнего слоя не вызывает проблем и допустимо (рис. 2). Развитие трещины может начаться только в случае попадания воды.

Существует множество способов моделирования арок и сводов с использованием различных программных комплексов. Однако они не позволяют моделировать поведение кладки с высокой точностью. Например, широко применяемый в России

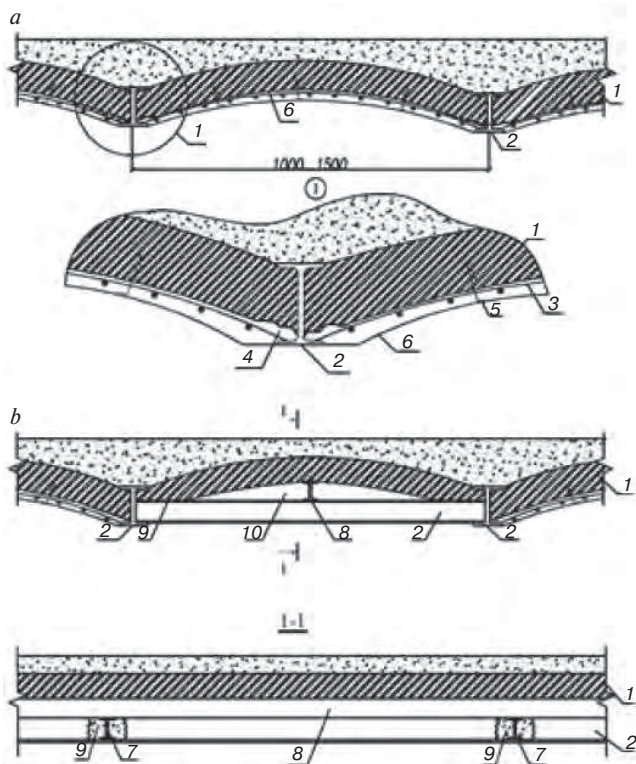


Рис. 4. Способы повышения несущей способности кирпичного свода: *a* – наращивание железобетонной арочной плиты снизу; *b* – подведение разгружающих стальных балок: 1 – свод из каменной кладки; 2 – несущие стальные балки (двутавр, рельс); 3 – арматурная сетка; 4 – пазы в перекрытии для опирания железобетонного наращивания; 5 – анкера для крепления сетки; 6 – железобетонное наращивание в виде арочной кладки; 7 – разгружающие поперечные балки, опирающиеся на несущие балки перекрытия; 8 – разгружающие продольные балки; 9 – ниши в перекрытии; 10 – пространство между перекрытием и разгрузочными балками, заложное каменной кладкой

Fig. 4. Ways to increase the bearing capacity of a brick vault: *a* – building up a reinforced concrete arched slab from below; *b* – supply of unloading steel beams: 1 – masonry vault; 2 – load-bearing steel beams (I-beam, rail); 3 – reinforcing mesh; 4 – grooves in the ceiling for supporting reinforced concrete build-up; 5 – anchors for fixing the mesh; 6 – reinforced concrete building in the form of arched masonry; 7 – unloading transverse beams, based on the load-bearing floor beams; 8 – unloading longitudinal beams; 9 – niches in the ceiling; 10 – the space between the ceiling and the unloading beams, laid with masonry

ПК Лира софт 10.6 не имеет необходимых элементов в библиотеке конечных элементов. Смоделировать своды Монье в указанном программном комплексе возможно только со значительными упрощениями, используя множественные стержни, пластины или объемные элементы, сгенерированные по дуге.

Для анализа арок и сводов необходимы программные комплексы, ориентированные на более широкий спектр строительных задач, например ansys, abaqus или Лира САПР 17. Указанные комплексы позволяют производить симуляцию и расчет гетерогенной модели кладки.

Ниже рассматривается метод, состоящий из комбинации двух расчетных схем арки – монолитного упругого тела и сложной конструкции кирпич+раствор [5]. На первом этапе арка моделируется и анализируется в программном комплексе как монолитное упругое тело. При этом рекомендуется учесть опорные жесткости. На втором этапе один из участков должен быть вырезан (участок 1, рис. 3).

Второй участок располагается под углом 60° к вертикали, третий – в приопорной зоне. При этом принимаются граничные условия от монолитной упругой арки. Участок моделируется как конструкция кирпич+раствор и производится анализ. На третьем этапе новые граничные условия берутся от участка и прикладываются к исходной арке, т. е. «вкладываются» в исходную монолитную арку с соответствующим перераспределением напряжений. Такая последовательность действий повторяется для всех опасных участков, включая новые, если они возникнут.

Характерными повреждениями каменных сводчатых перекрытий являются: образование продольных и поперечных трещин; локальное разрушение каменной кладки свода на всю его толщину или часть ее, вызванные зыбкостью и большими прогибами балок; значительная коррозия нижней зоны стальных балок (своды Монье) [6, 7].

Трещины во многих случаях считаются признаками истощения несущей способности кладки и свидетельствуют о превышении допустимых нагрузок на конструкцию. Однако изначальными причинами их появления и разрушения сводов могут быть не только превышение нагрузки, но и ряд других факторов, связанных с особенностями их эксплуатации [8].

Трещины в растянутой зоне могут зарождаться и развиваться только при условии достаточный высоты растянутой зоны по сечению. При малой высоте растянутой зоны в некоторых случаях могут появляться поверхностные трещины по растворным швам и штукатурному слою при его наличии. Однако они фактически не оказывают влияния на прочность свода [9, 10].

При изменении функционального назначения помещений, расположенных на перекрытиях с каменными сводами, с увеличением полезной нагрузки иногда возникает необходимость в их усилении. Повышение их несущей способности может быть осуществлено наращиванием железобетонной арочной плиты снизу (рис. 4, *a*), подведением разгружающих стальных балок (рис. 4, *b*) и другими способами.

Выбор метода усиления сводов производится в зависимости от необходимой степени повышения их несущей способности с соответствующим обоснованием расчетом. Последние десятилетия исследования работ каменных конструкций при их различных напряженных состояниях стало одним из приоритетных направлений строительной науки. При этом сделан существенный скачок в изучение их поведения и механики разрушения. Это стало возможным благодаря появлению современных расчетных комплексов, позволяющих производить сложные нелинейные расчеты и моделировать конструкцию кладки максимально приближенно к реальным условиям [11–13].

Разработаны критерии прочности, учитывающие как плоское, так и объемное напряженное состояние кладки. Однако эти критерии пока не получили широкого распространения из-за необходимости значи-

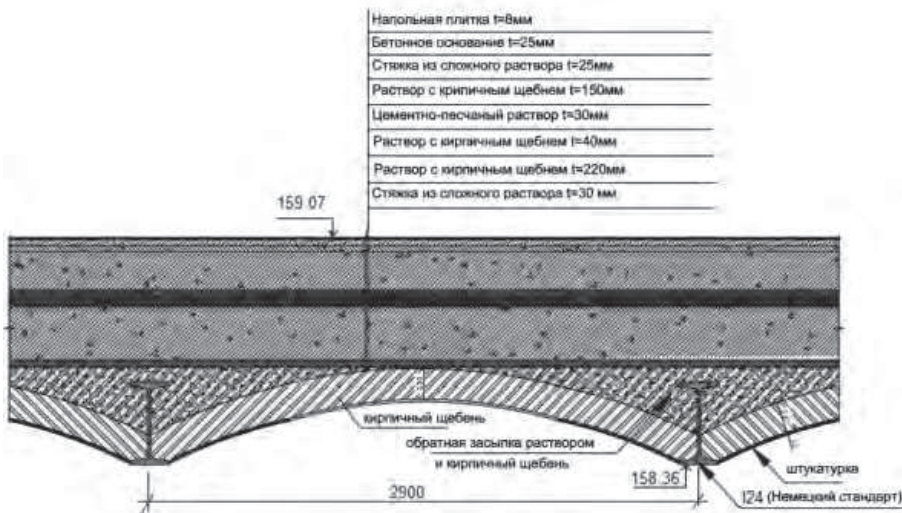


Рис. 5. Конструкция кирпичного свода, рассматриваемого в примере
 Fig. 5. The construction of the brick vault considered in the example

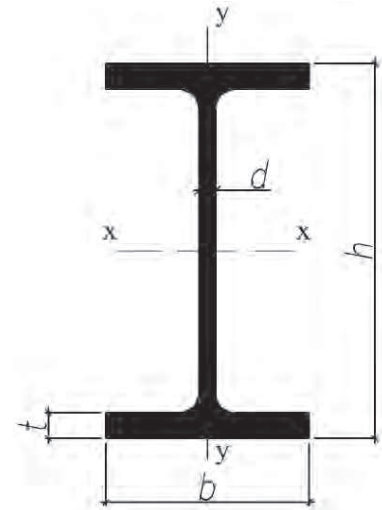


Рис. 6. Прокатные двутавровые балки, использованные в кирпичном своде, в рассматриваемом в примере
 Fig. 6. The rolled I-beams used in the brick vault considered in the example

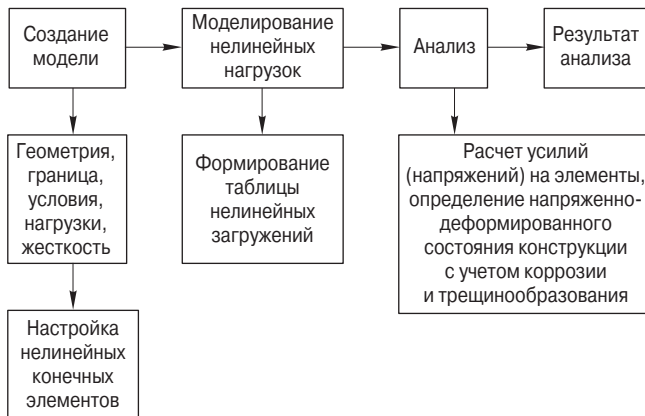


Рис. 7. Блок-схема нелинейного расчета свода из каменной кладки
 Fig. 7. Flowchart for non-linear calculating for vault from masonry

тельного количества входных данных от результатов натуральных испытаний. Кроме того, пока недостаточно изучены условия прочности криволинейных конструкций с армированием [14–16].

В качестве примера рассматривается напряженно-деформированное состояние конструктивных элементов фрагмента перекрытия над подвалом здания, расположенного на улице Тверской в Москве, построенного в первой половине XIX в. с проведением реконструкционных работ во второй половине XIX в. [17–19]. Здание является объектом культурного наследия. Перекрытия над подвалом в здании выполнены в основном в виде сводов из каменной кладки, опирающихся на металлические балки из прокатных двутавров, расположенных с шагом 1,5–3 м.

Своды постоянной толщины 130 мм выполнены из полнотелого кирпича на сложном или цементно-песчаном растворе. На отдельных участках соприкосновения перекрытия по сводом устроена забутовка из боя кирпича на сложном растворе (рис. 5).

Балки выполнены из прокатных двутавров по DIN1025 немецкого сортамента. Для оценки напряженно-деформированного состояния рассматрива-

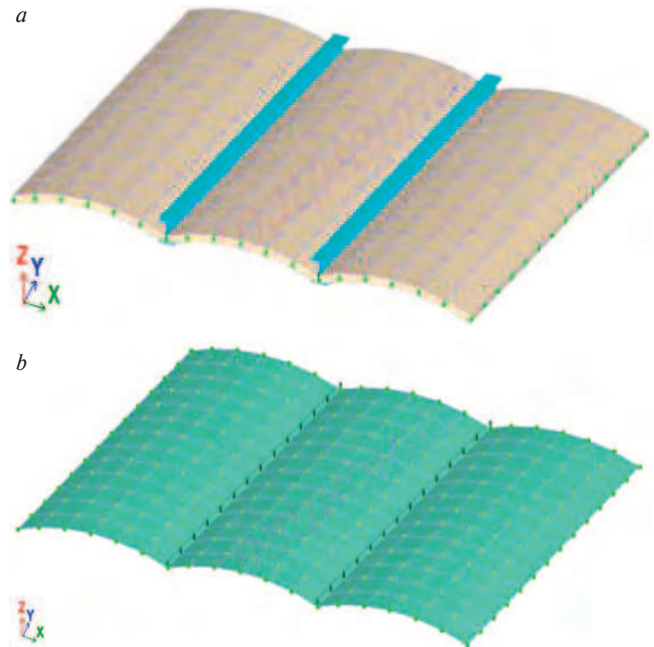


Рис. 8. Расчетная модель свода, рассмотренного в примере: а – модель с отображением заданных жесткостей; б – конечно-элементная модель свода

Fig. 8. Design model of the vault considered in the example: а – model with display of assigned stiffnesses; б – finite element model of the vault

ется трехпролетный фрагмент перекрытия над подвалом с шагом балок 2,9 м и длиной свода 6,7 м. Характеристики балок [18]: $h=300$ мм; $b=125$ мм; $d=10$ мм; $t=16,2$ мм; $A=69,1$ см²; $g=54,2$ кг/м; $I_x=9800$ см⁴; $r_x=11,9$ см; $I_y=451$ см⁴; $r_y=2,56$ см; $W_x=653$ см³; $W_y=7$ см³ (рис. 6).

В перекрытии над подвалом имелись участки со следами длительного замачивания из-за многократных протечек и систем водопровода и канализации. Коррозионный износ металлических балок перекрытия достигает 5 мм.

a

Напря- жение σ	Дефор- мация ϵ
-5	-8.98E-04
-3.8	-7.40E-04
-3	-6.20E-04
-2	-4.50E-04
-1	-2.48E-04
-0.5	-1.31E-04
-0.2	-5.42E-05
-0.1	-2.74E-05
0	0
0.1	2.81E-05
0.2	5.70E-05
0.5	1.48E-04
1	3.20E-04
2	7.74E-04
3	1.56E-03
3.6	2.64E-03
3.7	3.00E-03
3.8	3.53E-03
3.9	4.61E-03
3.95	6.58E-03

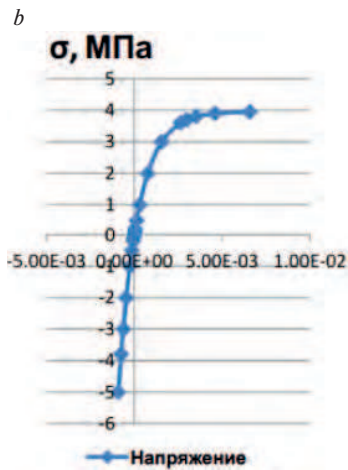


Рис. 9. Результаты расчета деформаций (a); σ - ϵ диаграмма (b)
Fig. 9. Results of calculating strains (a); σ - ϵ diagram (b)

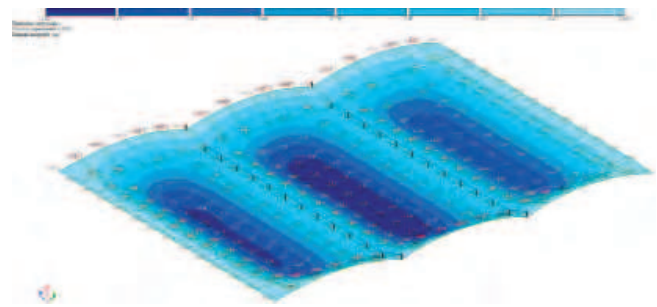


Рис. 10. Изополя прогибов сводов, рассмотренных в примере, мм
Fig. 10. Isofields of vault's flexures in the example, mm

Расчет модели кирпичного свода производился в программном комплексе Лира САПР 2019 (R2) методом конечных элементов. Блок-схема расчета приведена на рис. 7.

Свод моделируется плоскими четырехугольными элементами: для задачи в линейной постановке – 41 тип конечного элемента (универсальный прямоугольный КЭ оболочки), для нелинейной задачи – тип 241 (физически нелинейный универсальный прямоугольный КЭ оболочки). Металлические балки моделируются стержнем: для задачи в линейной постановке – 10 тип конечного элемента (универ-

Таблица 1
Table 1

Результаты численных расчетов кирпичного свода
The results of numerical calculations of the brick vault

Сила	N_x , kN		N_y , kN		Q_x , kN		Q_y , kN		M_x , kN·m		M_y , kN·m	
	Линейный анализ	Нелинейный анализ	Линейный анализ	Нелинейный анализ	Линейный анализ	Нелинейный анализ	Линейный анализ	Нелинейный анализ	Линейный анализ	Нелинейный анализ	Линейный анализ	Нелинейный анализ
min	-1,36	-1,3	-5,38	-4,6	-541	-483	-2240	-2150	-8,18	-28,9	-32,4	-28,9
max	6,5	5,71	1,09	1,2	545	486	1340	2100	8,170	29,9	33,3	29,9

Таблица 2
Table 2

Результаты численных расчетов кирпичного свода – главные напряжения
The results of numerical calculations of the brick vault – principal stresses

Слой	Главное напряжение σ_1 , МПа		Главное напряжение σ_2 , МПа	
	линейный анализ	нелинейный анализ	линейный анализ	нелинейный анализ
Верхний	1,09	0,63	1,97	-1,04
Нижний	1,55	0,5	-1,37	-1,28

Таблица 3
Table 3

Результаты численных расчетов: усилия Q_z в стальных балках
The results of numerical calculations: the forces Q_z in steel beams

Сила	Q_z в модели с пассивной нагрузкой от свода, kN			Q_z в линейном анализе с активными сводами, kN		Q_z в нелинейном анализе с активными сводами, kN	
	Коррозия отсутствует	Коррозия 5 мм	Коррозия 8 мм	Коррозия отсутствует	Коррозия 5 мм	Коррозия отсутствует	Коррозия 5 мм
min	-84,1	-84,1	-84,2	-148	-145	-123	-120
max	80	81	84	146	143	121	119

сальный пространственный стержневой КЭ), для нелинейной задачи – тип 210 (физически нелинейный универсальный пространственный стержневой КЭ) (рис. 8). Для корректного опирания сводов замоделировано шарнирное соединение пластинчатых элементов сводчатых перекрытий со стенами из каменной кладки с помощью добавления групп объединения перемещений.

Материал несущих конструкций: каменная кладка из кирпича марки 100, марка раствора М100. Расчетное сопротивление кладки сжатию $R=1,8$ МПа, модуль упругости (начальной модуль деформации) кладки при кратковременной нагрузке для неармированной кладки $E_0=3600$ МПа (табл. 16 СП 15.13330.2020), временное сопротивление сжатию кладки $R_u=3,6$ МПа.

В программе Лира САПР 2019 (R2) назначение жесткостных характеристик осуществляется с введением модуля «Кирпич» для кирпича. При этом для рассмотрения задачи в нелинейной постановке вычисляется зависимость относительных деформаций от напряжений в соответствии с СП 15.13330.2020:

$$\varepsilon = -\frac{1,1}{\alpha} \ln \left(1 - \frac{\sigma}{1,1R_u} \right). \quad (1)$$

Результаты расчета представлены на рис. 9.

В Лире САПР 2019 (R2) параметры материала задавались по кусочно-линейному закону.

Сбор нагрузок на перекрытие выполнен в соответствии с СП 20.13330.2016. Нагрузки от собственного веса конструкций перекрытия определены в зависимости от их геометрических параметров и объемных весов. Значения постоянных нагрузок: нормативной – 670 кг/м²; расчетной – 780 кг/м². Значения временных нагрузок: нормативной – 300 кг/м²; расчетной – 360 кг/м². Полные значения нагрузок: нормативной – 970 кг/м²; расчетной – 1140 кг/м². Результаты расчета приведены на рис. 10.

Максимальные прогибы сводов: по результатам линейного расчета – 1,8 мм; по результатам нелинейного расчета – 1,5 мм.

Кроме указанных значений прогибов получены максимальные величины усилий в сводах N_x , N_y , Q_x , Q_y , M_x , M_y , главных напряжений в нижнем и верхнем

слоях свода σ_1 и σ_2 , усилий Q_z и M_y в стальных балках свода с учетом их совместной работы со сводом.

Произведена оценка несущей способности стальных балок по двум группам предельных состояний с учетом их совместной работы со сводом, а также проверка несущей способности по местной устойчивости балок с учетом работы свода. Кроме того, получены результаты расчетов усилий Q_z и M_y в балках с пассивной нагрузкой от свода без включения его в работу. Получены также результаты проверки несущей способности балок по двум группам предельных состояний с пассивной нагрузкой от свода без его включения в работу. Произведен сравнительный анализ работы балок с учетом работы свода, а также с вариантом расчета при пассивной нагрузке от свода без его включения в работу усилия Q_z . Значения указанных выше результатов расчетов представлены в табл. 1, 2, 3.

Заключение

1. Рассмотрены критерии прочности, учитывающие как плоское, так и объемное напряженное состояние каменной кладки. Однако указанные критерии не получили до настоящего времени широкого применения из-за необходимости большого количества входных данных по результатам натуральных испытаний.

2. Рассмотренное конструктивное решение сводов подвергается воздействию внешних факторов в значительно большей степени, чем другие конструкции. Деформации сводчатых конструкций происходят, как правило, под действием двух и более факторов, каждый из которых имеет свой специфический характер.

В рассмотренном конструктивном решении сводов наиболее опасным и непредсказуемым видом повреждений является подвижка опор, что может привести к обрушению при обеспечении прочности.

3. Следует отметить, что приведенные результаты имеют частный случай и каждая разновидность повреждений требует отдельного исследования для сохранения существующих зданий, имеющих историческую значимость. При этом для детального моделирования следует использовать модифицированный критерий прочности Г.А. Гениева.

Список литературы

1. Krentowski J., Mlonek S., Ziminski K., Tofiluk A. Structural and technological aspects of the historical floors replacement. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. No. 471 (8), pp. 1–8. DOI: 10.1088/1757-899X/471/8/082057
2. Лолейт А.Ф. Система Монье: ее применение, промышленное значение и вопросы, связанные с распространением железобетона. Доклад. СПб.: Товарищество художественной печати, 1903. 10 с.
3. Зимин С.С., Беспалов В.В., Казимирова А.С. Расчетная модель каменной арочной конструкции // *Вестник Донбасской национальной академии*

References

1. Krentowski J., Mlonek S., Ziminski K., Tofiluk A. Structural and technological aspects of the historical floors replacement. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. No. 471 (8), pp. 1–8. DOI: 10.1088/1757-899X/471/8/082057
2. Loleyt A.F. The Monier system: Its application, industrial significance and issues related to the distribution of reinforced concrete. Report. St. Petersburg: Creativity of art printing. 1903. 10 p.
3. Zimin S.S., Bepalov V.V., Kazimirova A.S. Calculation model of a stone arched structure. *Bulletin*

- строительства и архитектуры. 2015. № 3 (113). С. 33–37.
4. Бедов А.И., Габитов А.И., Знаменский В.В. Оценка технического состояния, восстановление и усиление оснований и строительных конструкций эксплуатируемых зданий и сооружений: В 2 ч. Ч. 2. Восстановление и усиление оснований и строительных конструкций эксплуатируемых зданий и сооружений. М.: АСВ, 2021 (2017). 924 с.
 5. Lalin V.V., Dmitriev A.N., Diakov S.F., Nonlinear deformation and stability of geometrically exact elastic arches // *Magazine of Civil Engineering*. 2019. No. 89 (5), pp. 39–51 DOI: 10.18720/MCE.89.4
 6. Фабричная К.А., Шарафутдинова К.И. К вопросу усиления сводов (типа «Монье») композитными материалами при реконструкции // *Известия КГАСУ*. 2019. № 4 (50). С. 210–219.
 7. Бедов А.И., Габитов А.И., Галлямов А.А., Салов А.С., Гайсин А.М. Применение компьютерного моделирования при оценке напряженно-деформированного состояния несущих конструкций зданий из каменной кладки // *Международный журнал по расчету гражданских и строительных конструкций*. 2017. № 1. С. 42–49.
 8. Страхов Д.Е., Гимранов Л.Р., Сахапова А.И. Применение объемных конечных элементов на примере пожарной каланчи, находящейся в г. Сарапул, являющейся памятником архитектуры федерального значения // *Известия КГАСУ*. 2018. № 3 (45). С. 153–161.
 9. Павлов В.В., Хорьков Е.В. Экспериментальные исследования работы усиленных кирпичных арок при горизонтальной подвижке опор // *Известия КГАСУ*. 2014. № 2 (28). С. 90–96.
 10. Соколов Б.С., Антаков А.Б. Исследования сжатых элементов каменных и армокаменных конструкций. М.: АСВ, 2010. 104 с.
 11. Габитов А.И., Удалова Е.А., Салов А.С., Чернова А.Р., Пыжьянова Д.В., Ямилова В.В. Исторические аспекты производства и применения высокопустотных керамических изделий // *История науки и техники*. 2017. № 6. С. 58–65.
 12. Беспалов В.В., Зимин С.С. Прочность каменной кладки сводчатых конструкций // *Строительство уникальных зданий и сооружений*. 2016. № 11 (50). С. 37–51.
 13. Исекеев И.Д., Трофимов А.В. Совершенствование методики расчета пологих железобетонных сводов, опирающихся на металлические балки // *Вестник гражданских инженеров*. 2018. № 1 (66). С. 28–33.
 14. Francesca Giulia Carozzi, Gabriele Milani, Carlo Poggi. Mechanical properties and numerical modeling of Fabric Reinforced Cementitious Matrix (FRCM) systems for strengthening of masonry structures // *Composite structures*. 2014. Vol. 107, pp. 711–725.
 15. Borri A., Castori G., Corradi M. Intrados strengthening of brick masonry arches with composite materials // *Composites*. 2011. Vol. 42. Part B, pp. 1164–1172.
 4. Bedov A.I., Znamensky V.V., Gabitov A.I. Ocenka tekhnicheskogo sostoyaniya, vosstanovlenie i usilenie osnovanij i stroitel'nyh konstrukcij ekspluatiruemyh zdaniy i sooruzhenij. Vosstanovlenie i usilenie osnovanij i stroitel'nyh konstrukcij ekspluatiruemyh zdaniy i sooruzhenij [Assessment of the technical condition, reconstruction and strengthening of foundations and building structures of buildings and structures in operation. Restoration and strengthening of foundations and building structures of operated buildings and structures]. Moscow: ASV. 2017. 924 p.
 5. Lalin V.V., Dmitriev A.N., Diakov S. F., Nonlinear deformation and stability of geometrically exact elastic arches. *Magazine of Civil Engineering*. 2019. No. 89 (5), pp. 39–51. DOI: 10.18720/MCE.89.4
 6. Fabrichnaya K.A., Sharafutdinova K.I. On the issue of vaults (of the “Monier” type) composite materials during reconstruction. *Izvestiya KGASU*. 2019. No. 4 (50), pp. 210–219. (In Russian).
 7. Bedov A.I., Gabitov A.I., Gallyamov A.A., Salov A.S., Gaisin A.M. Application of computer modeling in assessing the stress-strain state of load-bearing structures of masonry buildings. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2017. № 1, pp. 42–49.
 8. Strakhov D.E., Gimranov L.R., Sakhapova A.I. Application of volumetric finite elements, on the example of a fire tower located in Sarapul, which is an architectural monument of federal significance. *Izvestiya KGASU*. 2018. No. 3 (45), pp. 153–161. (In Russian).
 9. Pavlov V.V., Horkov E.V. Experimental studies of reinforced brick arches with horizontal movement of supports. *Izvestiya KGASU*. 2014. No. 2 (28), pp. 90–96. (In Russian).
 10. Sokolov B.S., Antakov A.B. Issledovaniya szhatyh elementov kamennyh i armokamennyh konstrukciy [Studies of compressed elements of stone and reinforced stone structures]. Moscow: ASV. 2010. 104 p.
 11. Gabitov A.I., Udalova E.A., Salov A.S., Chernova A.R., Pyzhyanova D.V., Yamilova V.V. Historical aspects of production and application of high-void ceramic products. *Istoriya nauki i tekhniki*. 2017. No. 6, pp. 58–65. (In Russian).
 12. Bespalov V.V., Zimin S.S. Strength of masonry vaulted structures. *Stroitel'stvo unikal'nykh zdanii i sooruzhenii*. 2016. No. 11 (50), pp. 37–51. (In Russian).
 13. Isekeev I.D., Trofimov A.V. Improvement of the calculation methodology of flat reinforced concrete arches supported by metal beams. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov*. 2018. No. 1 (66), pp. 28–33. (In Russian).
 14. Francesca Giulia Carozzi, Gabriele Milani, Carlo Poggi. Mechanical properties and numerical modeling of Fabric Reinforced Cementitious Matrix (FRCM) systems for strengthening of masonry structures. *Composite structures*. 2014. Vol. 107, pp. 711–725.

16. Бедов А.И., Гайсин А.М., Габитов А.И., Кузнецов Д.В., Салов А.С., Абуталипова Е.М. Сравнительная оценка определения физико-механических характеристик высокопустотных керамических стеновых изделий на основе современных программных комплексов // *Вестник МГСУ*. 2017. Т. 12. № 1 (100). С. 17–25.
17. Гасиев А.А., Грановский А.В. Динамические испытания образцов каменной кладки, усиленных холстами из углеволокнистой ткани // *Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений*. 2015. № 2. С. 29–35.
18. Хаджишалапов Г.Н., Нажуев М.П., Салахов Э.А., Исаева У.И., Абдурахимов М.Ш., Гасанов Т.А. Вопросы устойчивого развития в промышленности строительных материалов и конструкций // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика*. 2022. № 1. С. 47–58. DOI: 10.15593/2409-5125/2022.1.04
19. Gabitov A.I., Ryazanova V.A., Salov A.S., Gaisin A.M., Timofeev A.A. Manufacture of construction materials by energy-saving technology through the example of the Bashkir region. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 907. Iss. 1. 012049. DOI 10.1088/1757-899X/907/1/012049
15. Borri A., Castori G., Corradi M. Intradados strengthening of brick masonry arches with composite materials. *Composites*. 2011. Vol. 42. Part B, pp. 1164–1172.
16. Bedov A.I., Gaisin A.M., Gabitov A.I., Kuznetsov D.V., Salov A.S., Abutalipova E.M. Comparative evaluation of the determination of physical and mechanical characteristics of high-void ceramic wall products based on modern software systems. *Vestnik MGSU*. 2017. Vol. 12. No. 1 (100), pp. 17–25. (In Russian).
17. Gassiev A.A., Granovsky A.V. Dynamic tests of masonry samples reinforced with canvases made of carbon fiber fabric. *Seismostoitkoe stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzhenii*. 2015. No. 2, pp. 29–35. (In Russian).
18. Khadzhishalapov G.N., Nazhuev M.P., Salakhov E.A., Isaeva U.I., Abdurahimov M.Sh., Hasanov T.A. Issues of sustainable development in the industry of building materials and structures. *Vestnik of the Perm National Research Polytechnic University. Applied Ecology. Urbanistics*. 2022. No. 1, pp. 47–58. DOI: 10.15593/2409-5125/2022.1.04
19. Gabitov A.I., Ryazanova V.A., Salov A.S., Gaisin A.M., Timofeev A.A. Manufacture of construction materials by energy-saving technology through the example of the Bashkir region. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 907. Iss. 1. 012049. DOI 10.1088/1757-899X/907/1/012049

СПЕЦИАЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

Учебное пособие «Химическая технология керамики»

Авторы – Андрианов Н.Т., Балкевич В.Л., Беляков А.В., Власов А.С.,
Гузман И.Я., Лукин Е.С., Мосин Ю.М., Скидан Б.С.

Освещены вопросы современного состояния технологии основных видов керамических изделий строительного, хозяйственно-бытового и технического назначения, а также различных видов огнеупоров. Главное внимание уделено основным процессам технологии керамики и ее свойствам. Подробно изложены характеристика различных видов сырья, проблемы подготовки керамических масс различного вида и их формование различными методами, особенности механизмов спекания, а также дополнительные виды обработки керамики: металлизация, глазурирование, декорирование, механическая обработка. Детально описаны свойства керамических изделий – механические, деформационные, теплофизические, электрофизические, в том числе при высоких температурах.

**Книга «Керамические пигменты»**

Авторы – Масленникова Г.Н., Пищ И.В.

В монографии рассмотрены физико-химические основы синтеза пигментов, в том числе термодинамическое обоснование реакций, теория цветности, современные методы синтеза пигментов и их классификация, методы оценки качества. Приведены сведения по технологии пигментов и красок различных цветов и кристаллических структур. Описаны современные методы декорирования керамическими красками изделий из сортового стекла, фарфора, фаянса и майолики. Книга предназначена для научных сотрудников, студентов, специализирующихся в области технологии керамики и стекла, а также для инженерно-технических работников, занятых в производстве керамических изделий и красок.



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

П.А. БАКУСОВ^{1,2}, инженер, ассистент кафедры информационных технологий (bakusovpavel@gmail.com)

¹ Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (190005, г. Санкт-Петербург, ул. 2-я Красноармейская, 4)

² ООО «ИСП «Геореконструкция» (190005, г. Санкт-Петербург, Измайловский пр., 4, оф. 414)

Примеры применения функции когерентности в задачах обследования каменных конструкций

Во время обследования и работ по реконструкции и реставрации зданий и сооружений часто возникают вопросы, касающиеся оценки связности элементов каменных конструкций. Например, на данный момент не существует обоснованных методов оценки качества работ по усилению каменных конструкций, имеющих явно выраженные повреждения. Кроме того, зачастую возникают вопросы о связи заложённых проёмов с основным массивом каменной стены. Для решения данных задач предлагается использовать оценку функции когерентности, которая строится по записям колебаний исследуемых каменных конструкций. В качестве динамической нагрузки рассматривается сейсмический фон. Предлагаемые методы можно считать методами неразрушающего контроля, поскольку они требуют минимального физического воздействия на исследуемые конструкции. В статье приводится краткое описание функции когерентности, построение ее оценки, а также используемое измерительное оборудование. В качестве примеров применения данной оценки приводятся результаты обработки измерений двух трещин до и после работ по усилению, а также двух заложённых проёмов. Поскольку описываемые в статье методики находятся на стадии разработки и исследования, приводятся нерешённые на данный момент вопросы. Кроме того, перечисляются ограничения, которые возникают во время измерений, и границы применимости предлагаемого метода.

Ключевые слова: каменные конструкции, функция когерентности, датчики колебаний, повреждения, вычинка каменной кладки, перевязка каменной кладки.

Автор благодарит своего коллегу, канд техн. наук Станислава Олеговича Кондратьева за помощь в проведении измерений, а также полезные советы и предложения при подготовке данной статьи.

Для цитирования: Бакусов П.А. Примеры применения функции когерентности в задачах обследования каменных конструкций // *Строительные материалы*. 2023. № 5. С. 66–71. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-813-5-66-71>

P.A. BAKUSOV^{1,2}, Engineer, Assistant of the Department of Information Technologies (bakusovpavel@gmail.com)

¹ Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (4, 2nd Krasnoarmeiskaya Street, Saint Petersburg, 190005, Russian Federation)

² «Georeconstruction» ISP OOO (office 414, 4, Izmaylovskiy Avenue, Saint Petersburg, 190005, Russian Federation)

Examples of the Application of the Coherence Function in the Tasks of Inspection of Stone Structures

During the survey and work on the reconstruction and restoration of buildings and structures, questions often arise regarding the assessment of the connectivity of elements of stone structures. For example, at the moment there are no reasonable methods for assessing the quality of work to strengthen stone structures that have obvious damage. In addition, questions often arise about the connection between the embedded openings and the main mass of the stone wall. To solve these problems, it is proposed to use an estimate of the coherence function, which is based on the vibration records of the stone structures under study. The seismic background is considered as a dynamic load. The proposed methods can be considered as methods of non-destructive testing, since they require minimal physical impact on the structures under study. The article provides a brief description of the coherence function, the construction of its estimate, as well as the measuring equipment used. As examples of the application of this assessment, the results of processing measurements of two cracks before and after reinforcement work, as well as two embedded openings, are given. Since the methods described in the article are at the stage of development and research, unresolved issues are presented at the moment. In addition, the limitations that arise during measurements and the limits of applicability of the proposed method are listed.

Keywords: stone structures, function of coherence, vibration sensors, damages, masonry renovation, masonry bond.

The author thanks his colleague Kondratev Stanislav Olegovich (Candidate of Sciences (Engineering)) for assistance in measurements as well as for valuable comments and suggestions.

For citation: Bakusov P.A. Examples of the application of the coherence function in the tasks of inspection of stone structures. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2023. No. 5, pp. 66–71. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-813-5-66-71>

Используемый математический аппарат

Функция когерентности — это функция от частоты f , представляющая собой нормированную взаимную спектральную плотность двух случайных процессов $X(t)$ и $Y(t)$ [1–6]. Поскольку в реальности можно зарегистрировать лишь дискретные реализации $x[t_n]$ и $y[t_n]$ этих случайных процессов, ограниченные во времени, то функцию когерентности можно только оценить:

$$\hat{\gamma}_{xy}^2(f_k) = \frac{|\hat{P}_{xy}(f_k)|^2}{\hat{P}_{xx}(f_k)\hat{P}_{yy}(f_k)}, \quad (1)$$

где t_n — это момент времени, в который было зарегистрировано состояние рассматриваемого процесса:

$$t_n = \frac{n}{F}, \quad n = \overline{0, N-1}; \quad (2)$$

F — частота дискретизации используемого оборудования (количество регистраций состояний за одну

Технические характеристики велосиметров
Specifications for velocimeters

Параметр	Диапазон измерений, мм/с	Частотный диапазон, Гц	Количество осей	Рабочий диапазон температуры, °С	Масса, кг
Значение	от 0,0002 до 20	от 0,3 до 500	3	от -40 до +80	1,2

секунду); N – количество записанных значений процесса; $\hat{P}_{xy}(f_k)$ – оценка взаимной спектральной плотности реализаций $x[t_n]$ и $y[t_n]$; $\hat{P}_{xx}(f_k)$ и $\hat{P}_{yy}(f_k)$ – их спектральные плотности соответственно, а частота f_k определяется по формуле:

$$f_k = \frac{k}{T}, \quad k = \overline{0, N-1}, \quad (3)$$

где k – это номер гармоники, на которые раскладывается сигнал; T – длительность записи процесса во времени.

Оценки спектральных плотностей, участвующих в формуле (1), можно производить различными способами (некоторые методы приводятся, например, в работе [7]). По мнению автора, наиболее простой и достаточной для рассматриваемых далее задач оценкой спектральных плотностей является оценка, получаемая методом Бартлетта [8–10].

Идея метода Бартлетта заключается в следующем. Поскольку для оценки спектральной плотности необходимо предусмотреть операцию нахождения математического ожидания, исход-

ная реализация разбивается на K интервалов размера L – получается псевдоансамбль. По каждому элементу полученного псевдоансамбля рассчитывается периодограмма, после чего производится усреднение.

Оценка спектральной плотности по методу Бартлетта является состоятельной, а ее устойчивость улучшается как величина, обратная размеру псевдоансамбля K .

Функция когерентности является аналогом квадрата нормированной корреляционной функции. В случае если значение функции на частоте f_n

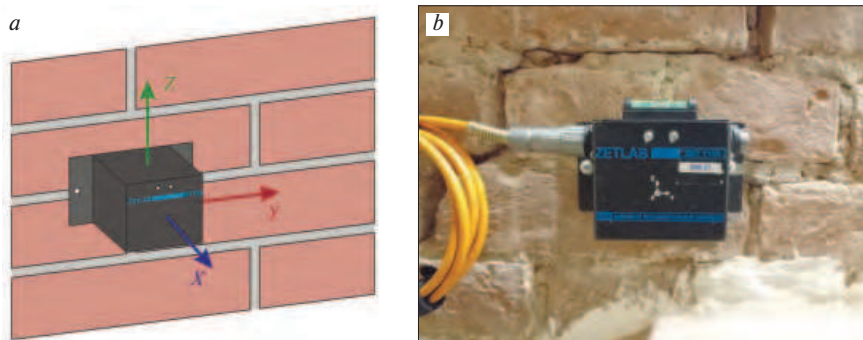


Рис. 1. Измерительное оборудование: а – направление осей; б – пример установки
Fig. 1. Measuring equipment: a – the direction of the axes; b – installation example

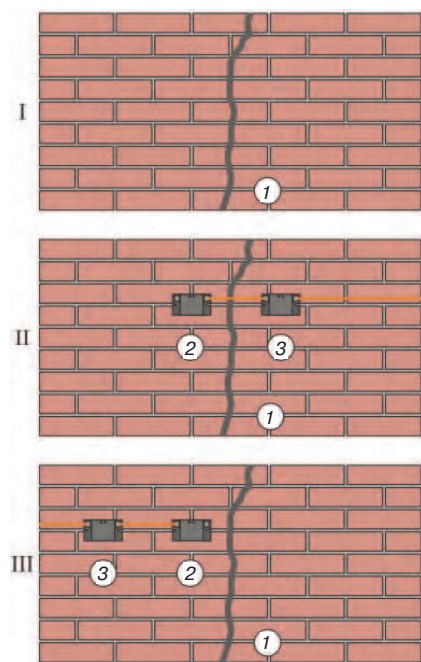


Рис. 2. Схема измерений: 1 – повреждение; 2 – опорный датчик; 3 – переносной датчик
Fig. 2. Scheme of measurements: 1 – damage; 2 – reference sensor; 3 – portable sensor

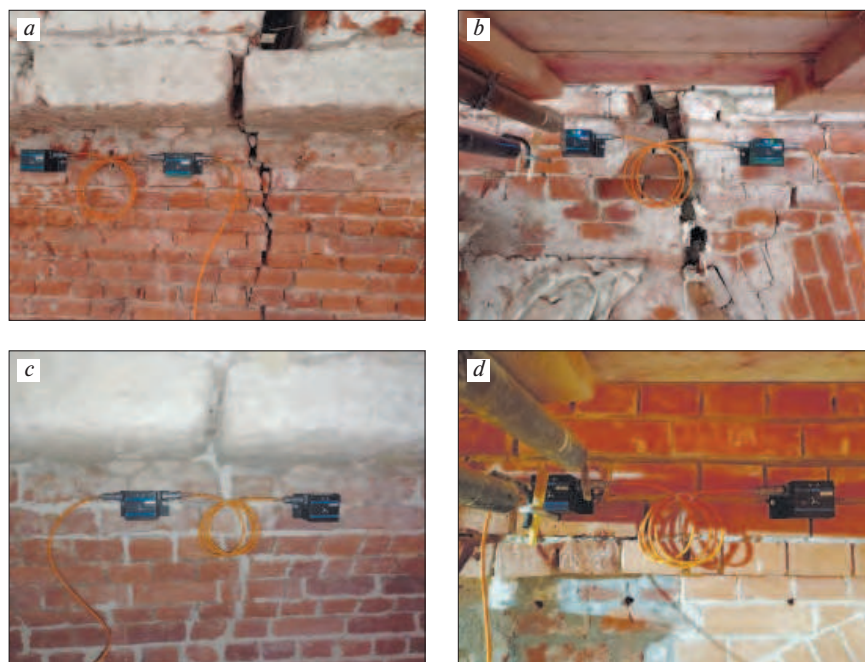


Рис. 3. Фотофиксация повреждений до (а, б) и после (с, д) работ по усилению
Fig. 3. Photofixation of damage before (a, b) and after (c, d) reinforcement work

равно нулю, говорят, что на этой частоте рассматриваемые процессы некогерентны, или некоррелированы. Наоборот, если на этой частоте функция равна единице, то на ней наблюдается коге-

рентность (скоррелированность). Если же функция когерентности равна нулю при всех значениях частоты, то рассматриваемые процессы статистически независимы.

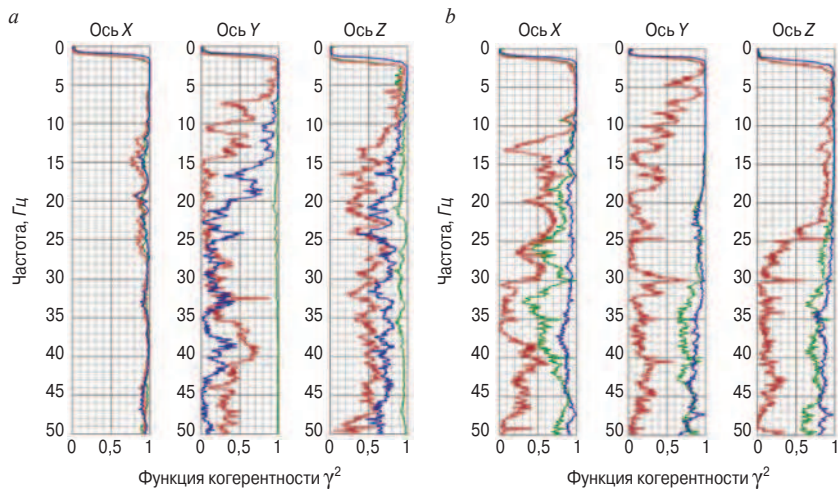


Рис. 4. Результаты обработки измерений: *a* – трещина раскрытием до 30 мм; *b* – трещина раскрытием до 70 мм. Графики функции когерентности: зеленый – эталонной кирпичной кладки; красный – трещины до усиления; синий – трещины после усиления

Fig. 4. Results of measurement processing: *a* – crack opening up to 30 mm; *b* – crack opening up to 70 mm. Graphs of the coherence function: green – reference brickwork; red – cracks before strengthening; blue – cracks after strengthening



Рис. 5. Фотофиксация исследуемых заложённых проемов: *a* – проем № 1 (датчики измеряют колебания зоны шва); *b* – проем № 2 (датчики измеряют кладку заложённого проема)

Fig. 5. Photofixation of the investigated embedded openings: *a* – opening No. 1 (sensors measure vibrations of the seam zone); *b* – opening No. 2 (sensors measure the laying of the laid opening)

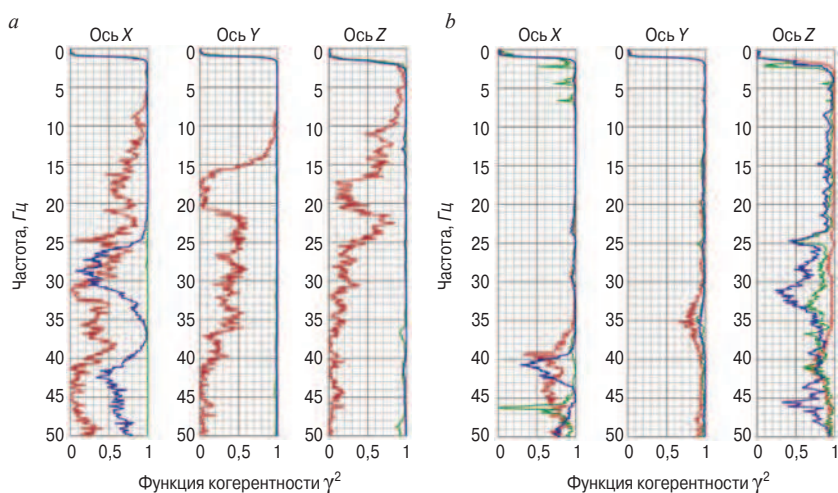


Рис. 6. Результаты обработки измерений: *a* – проем № 1; *b* – проем № 2. Графики функции когерентности: зеленый – кладка основного массива стены; синий – кладка заложённого проема; красный – шов между кладками

Fig. 6. Measurement processing results: *a* – aperture No. 1; *b* – aperture No. 2. Graphs of the coherence function: green – masonry of the main mass of the wall; blue – masonry of the laid opening; red – seam between masonry

Используемое оборудование

Для измерения колебаний исследуемых конструкций использовались велосиметры – датчики, фиксирующие скорость колебаний тела, на которое они установлены. Технические характеристики велосиметров приведены в таблице. Датчик имеет чувствительный элемент, который преобразует механические колебания в аналоговый сигнал в трех взаимно ортогональных направлениях. Оси *X* и *Y* направлены в горизонтальной плоскости: *X* – в поперечном направлении, *Y* – в продольном к телу, а ось *Z* – в вертикальном (рис. 1, *a*). Далее, аналогово-цифровой преобразователь оцифровывает сигналы, после чего производится запись в память измерительной системы.

Для закрепления датчика на исследуемой конструкции в швах кладки (с целью сохранения целостности исторических кирпичей или камней) просверливаются отверстия под дюбели и шурупы. Положение датчика устанавливается с помощью уровня (рис. 1, *b*).

При исследовании применимости данных датчиков было выявлено, что для решения рассматриваемых задач можно использовать частотный диапазон от 1 до 50 Гц. Малые значения функции когерентности в диапазоне от 0 до 1 Гц на графиках, представленных ниже, обусловлены слабой чувствительностью датчиков в данной полосе, а не проявлением динамических характеристик исследуемой конструкции.

Методики и результаты измерений

Во всех представленных ниже случаях измерения проводились в течение 900 с. Частота дискретизации датчиков – 100 Гц, поэтому рассматриваемый частотный диапазон составлял от 0 до 50 Гц. Шаг по частоте был выбран 0,1 Гц, откуда размер псевдоансамбля составил $K=90$.

В качестве динамической нагрузки, возбуждающей вынужденные и собственные колебания конструк-

ций, рассматривается сейсмический фон природного и техногенного происхождения.

Первая рассматриваемая задача — это оценка качества работ по усилению поврежденной каменной кладки. В работе [11] уже приводился пример со сравнением работ по инъектированию трещин и вычинке кирпичной кладки. Теперь покажем сравнение динамического поведения повреждения до усиления и после.

Методика измерений следующая. Производится два цикла: первый цикл — измерения до производства работ по усилению, второй цикл — после усиления в тех же точках. Каждый цикл можно разбить на следующие этапы:

1) поиск наиболее удобного места для измерений, чтобы датчики можно было установить в одинаковом положении в пространстве; рядом с повреждением имелась цельная кладка, рассматриваемая далее как эталонная — рис. 2, I;

2) измерение повреждения (датчики устанавливаются в одном уровне так, чтобы между ними оказалось исследуемое повреждение) — рис. 2, II;

3) измерение эталонной кладки (один из датчиков переносится так, чтобы между ними оказался участок кладки, отражающий общее состояние конструкции; расстояние между датчиками должно быть такое же, как и при измерении повреждения) — рис. 2, III;

4) по полученным записям в трех направлениях строится оценка функций когерентности;

5) производится анализ полученных данных.

Рассмотрим две трещины. Первая — вертикальная трещина в уровне венчающего карниза раскрытием до 30 мм. Вторая — вертикальная трещина в уровне венчающего карниза раскрытием до 70 мм. На рис. 3 приводится фотофиксация: первой трещины до (а) и после (с) усиления; второй трещины до (b) и после (d) усиления.

На рис. 4 представлены результаты измерений и последующей обработки. Зеленые графики функции когерентности — эталонная кладка; красные — кладка с трещиной до работ по усилению; синие — после усиления. По графикам оси X можно делать выводы о поперечной связности конструкции (сопротивление конструкции поперечному смещению), т. е. является ли трещина сквозной; оси Y — о серьезности самого повреждения (чем раньше наблюдается падение графика, тем хуже); оси Z — о вертикальной связности, т. е. насколько конструкция способна сопротивляться вертикальному смещению.

По графикам функций когерентности, приведенным на рис. 4, можно сделать следующие выводы. По первой трещине видно, что проведенные работы по усилению не сильно исправили ситуацию: по осям Y и Z графики функции когерентности после усиления (синие) выше графиков до усиления (красные), однако не сильно. Это связано с тем, что хоть визуально трещина выглядит усиленной, по факту усиления

проведено не было: в зоне трещины не были обнаружены следы проведения инъектирования, например остатки пакеров. Трещина была просто замазана раствором, который и поспособствовал некоторому улучшению связности данной области кладки. Также можно сделать вывод, что данная трещина не являлась сквозной: графики функции когерентности по оси X во всех случаях близки к единице и не имеют провалов.

По графикам когерентности второй трещины видно, что, во-первых, она была сквозной: красный график по оси X имеет провал после значения частоты около 10 Гц. Во-вторых, работы по усилению полностью устранили повреждение: по всем осям синий график (участок кладки с повреждением после усиления) проходит либо рядом, либо выше зеленого (эталонного участка кладки). В данном случае производство работ очевидно: была проведена вычинка кирпичной кладки (рис. 3, d).

Вторая задача: оценка перевязки элементов каменных конструкций. При реконструкции и реставрации зданий часто обнаруживаются заложенные проемы, качество перевязки которых с основной конструкцией стены оказывается под вопросом.

В качестве оценки связи предлагается следующая методика:

1) поиск наиболее удобного места для измерений (чтобы датчики можно было установить в одинаковом положении в пространстве);

2) измерение кладки основной стены (датчики устанавливаются в одном уровне; между парой датчиков должна располагаться эталонная область кладки);

3) измерение кладки заложенного проема (аналогично предыдущему этапу; расстояние между датчиками должно быть таким же);

4) измерение шва (датчики устанавливаются таким образом, чтобы между ними располагался исследуемый шов; расстояние между датчиками должно быть таким же, как и на предыдущих этапах);

5) по полученным записям в трех направлениях строится оценка функций когерентности;

6) производится анализ полученных данных.

Рассмотрим результаты измерений двух заложенных проемов. На рис. 5 представлена их фотофиксация. На рис. 6 приводятся результаты измерений и последующей обработки. Зеленые графики функции когерентности — кладка основного массива стены, синие — кладка заложенного проема, красные — швы между кладками.

Сравнивая графики функций когерентности обоих случаев, можно сделать следующие выводы. Во-первых, в обоих случаях связность кладки основного массива стены и заложенного проема близка (в первом случае качество кладки проема немного лучше, во втором — наоборот). Во-вторых, для проема № 1 наблюдается отсутствие связи кладки заложенного проема с кладкой стены: по всем осям графики функции когерентности для швов (красные графики) имеют падение на достаточно низких частотах (для по-

перечной оси X – в районе 10 Гц, продольной оси Y – около 3 Гц, а вертикальной оси Z – 23 Гц). Для проема № 2 картина противоположная: все графики функций когерентности близки друг к другу. Кроме того, по оси Z график, относящийся к шву между кладками (красный), располагается выше относительно остальных.

Таким образом, в первом случае можно рекомендовать усиление или проведение работ по перевязке кладок. Во втором же случае можно считать, что связность кладок достаточна для совместной работы конструкции в целом.

Обсуждение

Предлагаемые методики находятся на стадии разработки: приведенные результаты являются частью серии измерений различных повреждений. Например, остается открытым вопрос влияния раскрытия трещины на значение частоты, начиная с которой у графика функции когерентности наблюдается спад. Однако уже было замечено, что подъем графика функции когерентности на низких частотах в случае отсутствия связи двух элементов конструкции (например, в случае сквозной трещины) связан с областью частот собственных колебаний сооружения в целом и/или элемента конструкции в частности. Таким образом, с помощью функции когерентности также можно производить оценку интервала, в котором находятся собственные частоты колебаний сооружений и элементов конструкций. Также пока не ясно, важна ли форма графика функции когерентности при условии, что значения функции меньше 0,75, т. е. связь между сигналами на данных частотах статистически мала.

Выводы

Предлагаемые методики являются примером разрушающего контроля. С одной стороны, родственным методом является георадар и ультразвуковая дефектоскопия, например [12, 13]. Различие в том, что в данной методике используются колебания в инфразвуковой (низкочастотной) области, вызванные сейсмическим фоном. В георадаре и ультразвуковой дефектоскопии используются сигналы высокой частоты, а сравнение происходит между поданным на объект исследования сигналом и принятым отраженным. Кроме того, для данных методов любая кладка будет представлять один большой дефект. С другой стороны, сходными являются методы, позволяющие оценивать состояние конструкций по оценке их динамических параметров. Для этого в качестве динамической нагрузки рассматривается либо удар [14, 15], либо сейсмический фон [1–18]. Однако в данном случае требуется знание о частот-

Список литературы

1. Бендат Дж., Пирсол А. Измерение и анализ случайных процессов. М.: Мир, 1974. 463 с.

ном составе этой же конструкции в условиях отсутствия повреждений.

На основе проведенных исследований показана эффективность и перспективность предлагаемого метода контроля связности каменных конструкций на основе оценки функции когерентности. Он позволяет неразрушающим образом и с малыми временными затратами определить изменение технического состояния отдельных исторических конструкций относительно мероприятий по их усилению и тем самым дать оценку обеспеченности механической безопасности с учетом произведенных работ.

В заключение укажем проблемы, с которыми приходится сталкиваться при работе с описанными методиками.

1. Подбор оборудования. Для измерений кроме велосиметров было также опробовано два вида акселерометров: результаты измерений оказались неудовлетворительны. Кроме того, хоть используемые велосиметры и имеют по паспорту частотный диапазон до 500 Гц, для описанных методик можно рассматривать только частотную полосу от 1 до 50 Гц. Также оборудование должно быть достаточно малых габаритов и массы для удобства транспортировки и установки.

2. Установка оборудования. Далеко не всегда имеется возможность закрепить датчики на кладке, освобожденной от отделочного слоя. Чаще всего кладка имеет штукатурный слой, который безусловно влияет на результаты, особенно если он достаточно толстый. Даже если кладка и освобождена от штукатурного слоя, она сама не всегда оказывается ровной, что создает трудности для вертикальной установки датчика.

3. Дополнительные воздействия. В идеальном случае измерения желательно проводить при отсутствии каких-либо дополнительных динамических воздействий. Однако чаще всего приходится работать в условиях производимых работ по реконструкции и реставрации.

References

1. Bendat J., Piersol A. Izmerenie i analiz sluchajnyh processov [Measurement and analysis of random processes]. Moscow: Mir, 1974. 463 p.
2. Bendat J., Piersol A. Primeneniya korrelyatsionnogo i spektral'no analiza [Engineering applications of correlation and spectral analysis]. Moscow: Mir, 1983. 310 p.
3. Jenkins G., Watts D. Spektral'nyj analiz i ego prilozheniya [Digital spectral analysis and its applications]. Vol. 2. Moscow: Mir, 1972. 287 p.
4. Marple Jr.S.L. Tsifrovoi spektral'nyi analiz i ego prilozheniya [Digital spectral analysis]. Moscow: Mir, 1990. 584 p.
5. Otnes R., Enochson L. Prikladnoi analiz vremennykh ryadov [Applied time series analysis]. Moscow: Mir, 1982. 428 p.

2. Бендат Дж., Пирсол А. Применение корреляционного и спектрально анализа. М.: Мир, 1983. 310 с.
3. Дженкинс Г., Ваттс Д. Спектральный анализ и его приложения. М.: Мир, 1972. Т. 2. 287 с.
4. Марпл-мл. С.Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения. М.: Мир, 1990. 584 с.
5. Отнес Р., Эноксон Л. Прикладной анализ временных рядов. М.: Мир, 1982. 428 с.
6. Рандалл Р.Б. Частотный анализ. Копенгаген: Брюль и Кьер, 1989. 389 с.
7. Овчарук В.Н. Спектральный анализ сигналов акустической эмиссии // *Ученые заметки ТОГУ*. 2013. Т. 4. № 4. С. 974–986.
8. Bartlett M.S. Smoothing periodograms from time-series with continuous spectra // *Nature*. 1948. Vol. 161, pp. 686–687. doi:10.1038/161686a0
9. Bartlett M.S. Periodogram analysis and continuous spectra // *Biometrika*. 1950. Vol. 37, No. 1/2, pp. 1–16. DOI: 10.2307/2332141
10. Бартлетт М.С. Введение в теорию случайных процессов. М.: ИЛ, 1958. 384 с.
11. Деркач В.Н., Бакусов П.А., Орлович Р.Б. Оценка эффективности инъектирования и вычинки поврежденной каменной кладки // *Строительные материалы*. 2022. №9. С.55–61. DOI: 10.31659/0585-430X-2022-806-9-55-61
12. Patitz G. Bestandserfassung mit Bauradar – ein zerstörungsfreies Verfahren für die Praxis // *Mauerwerk*. 2013. Vol. 17, Iss. 4, pp. 196–200. DOI: 10.1002/dama.201300579
13. Wiggerhauser H., Behrens M., Mouser D., Moryson R.M., Pudovikov S., Herrmann H-G. Non-destructive assessment of retaining wall of former coal mine plant // *Mauerwerk*. 2018. Vol. 22. Iss. 3, pp. 175–186. DOI: 10.1002/dama.201700021
14. Kwiecien A., Chelmecki J., Matysek P. Non-destructive test of brick columns using change in frequency and inertancy response // *Structural Analysis of Historical Constructions*. 2012, pp. 2437–2444.
15. Завалишин С.И., Шаблинский Г.Э., Зубков Д.А., Румянцев А.А. Динамический мониторинг зданий и сооружений для контроля их сейсмостойкости // *Предотвращение аварий зданий и сооружений*. 2009. № 2 (2). С. 1–12.
16. Gentile C., Saisi A., Cabboi A. Dynamic monitoring of a Masonry tower // *Structural Analysis of Historical Constructions*. 2012, pp. 2390–2397
17. Elyamani A., Caselles J.O., Clapes J., Roca P. Assessment of dynamic behavior of Mallorca cathedral // *Structural Analysis of Historical Constructions*. 2012, pp. 2376–2384.
18. Grosel J., Sawicki W., Wojcicki Z. Vibration measurements in analysis of historical structures // *Structural Analysis of Historical Constructions*. 2012, pp. 2398–2411.
6. Randall R.B. Chastotnyj analiz [Frequency analysis]. Kopenhagen: Bryul' i K"er, 1989. 389 p.
7. Ovcharuk V.N. Spectral analysis of signals acoustic emission. *Uchenye zametki TOGU*. 2013. Vol. 4, No. 4, pp. 974–986. (In Russian).
8. Bartlett M.S. Smoothing periodograms from time-series with continuous spectra. *Nature*. 1948. Vol. 161, pp. 686–687. DOI: <https://doi.org/10.1038/161686a0>
9. Bartlett M.S. Periodogram analysis and continuous spectra. *Biometrika*. 1950. Vol. 37. No. 1/2, pp. 1–16. DOI: <https://doi.org/10.2307/2332141>
10. Bartlett M.S. Vvedenie v teoriyu sluchainykh protsessov [An Introduction to stochastic processes with special reference to methods and applications]. Moscow: IL. 1958. 384 p.
11. Derkach V.N., Bakusov P.A., Orlovich R.B. Evaluation of the effectiveness of injection and repair of damaged masonry. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2022. No. 9, pp. 55–61. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-806-9-55-61>
12. Patitz G. Bestandserfassung mit Bauradar – ein zerstörungsfreies Verfahren für die Praxis. *Mauerwerk*. 2013. Vol. 17. Iss. 4, pp. 196–200. DOI: <https://doi.org/10.1002/dama.201300579>
13. Wiggerhauser H., Behrens M., Mouser D., Moryson R.M., Pudovikov S., Herrmann H-G. Non-destructive assessment of retaining wall of former coal mine plant. *Mauerwerk*. 2018. Vol. 22. Iss. 3, pp. 175–186. DOI: <https://doi.org/10.1002/dama.201700021>
14. Kwiecien A., Chelmecki J., Matysek P. Non-destructive test of brick columns using change in frequency and inertancy response. *Structural Analysis of Historical Constructions*. 2012, pp. 2437–2444.
15. Zavalishin S.I., Shablinskii G.E., Zubkov D.A., Rumyantsev A.A. Dinamiceskii monitoring zdaniy i sooruzhenii dlya kontrolya ikh seismostoikosti [Dynamic monitoring of buildings and structures to control their seismic stability]. *Predotvrashchenie aviarii zdaniy i sooruzhenii*. 2009. No. 2 (2), pp. 1–12. (In Russian).
16. Gentile C., Saisi A., Cabboi A. Dynamic monitoring of a Masonry tower. *Structural Analysis of Historical Constructions*. 2012, pp. 2390–2397.
17. Elyamani A., Caselles J.O., Clapes J., Roca P. Assessment of dynamic behavior of Mallorca cathedral. *Structural Analysis of Historical Constructions*. 2012, pp. 2376–2384.
18. Grosel J., Sawicki W., Wojcicki Z. Vibration measurements in analysis of historical structures. *Structural Analysis of Historical Constructions*. 2012, pp. 2398–2411.

С.В. ФЕДОСОВ, д-р техн. наук, профессор, академик РААСН (FedosovSV@mgsu.ru),

Э. КЕНЕВЕИ, аспирант (kenewei@mail.ru),

А.А. ЛАПИДУС, д-р техн. наук, профессор (lapidus58@mail.ru)

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

В поиске инновационных материалов для массового строительства малоэтажных зданий в Республике Чад

История архитектуры и строительства показала, что традиционная архитектура каждой страны обусловлена наличием местных материалов. Учитывая это, «народная архитектура» является воплощением местных материалов, доступных в определенной местности, и проявляет колорит и специфические формы благодаря изобретательности мастеров и народных умельцев. Все это воплотилось в строительстве жилья африканских поселений, изученных на примере Республики Чад. Среда обитания, реализованная ремесленниками, была построена из доступных местных материалов, таких как стерня, листья деревьев, земляно-соломенная смесь, блоки земли из необожженной глины (адобы) и др. Со временем стало развиваться строительство жилья из блоков из прессованной глины, обожженного кирпича, легких бетонных блоков (шлакоблоков) и пр. Сегодня используемые ранее материалы не отвечают современным требованиям, и получение материалов, учитывающих эволюционные процессы и разработанных на основе местных ресурсов, является одним из самых актуальных вопросов строительной индустрии. Краткий обзор в настоящей публикации позволяет читателям составить представление о материалах, используемых в гражданском строительстве Республики Чад. В нем выявлены преимущества и недостатки этих материалов, а также предложен инновационный материал для массового строительства малоэтажных зданий на основе местных ресурсов.

Ключевые слова: адобы, прессованный кирпич из глины, обожженный кирпич, солома, легкий бетон, арболит.

Для цитирования: Федосов С.В., Кеневаи Э., Лapidус А.А. В поиске инновационных материалов для массового строительства малоэтажных зданий в Республике Чад // *Строительные материалы*. 2023. № 5. С. 72–78.

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-813-5-72-78>

S.V. FEDOSOV, Doctor of Sciences (Engineering), Professor, Academician of RAASN (FedosovSV@mgsu.ru),

E. KENEWEI, Graduate Student (kenewei@mail.ru),

A.A. LAPIDUS, Doctor of Sciences (Engineering), Professor (lapidus58@mail.ru)

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

In Search of Innovative Materials for Mass Construction of Low-Rise Buildings in the Republic of Chad

The history of architecture and construction has shown that the traditional architecture of each country has become possible only thanks to the abundance of local materials available to everyone. Given this reality, folk architecture is a materialization of local materials available in every corner manifesting in visible form thanks to the ingenuity of the masters. This natural opportunity has been embodied in the construction of housing in African societies, and Chad is also no exception. The habitat built by artisans was built from available local materials, such as stubble, tree leaves, earth-straw mixture, blocks of earth from unbaked clay (adobe) and others. Over time, housing is being built from blocks of compressed clay, baked bricks, light concrete blocks (cinder blocks) and others. Given the current trend, these materials no longer meet modern challenges, so thinking about developing materials that take into account evolution means finding innovative materials developed on the basis of local resources, taking into account existing realities without compromising the well-being of the future society. The work in this research paper will allow us to briefly lay out the existing materials used in construction in Chad, as well as identify their advantages and disadvantages and offer innovative and sustainable new material for the mass construction of low-rise buildings based on local resources.

Keywords: adobe, compressed clay block, baked brick, straw, light concrete, arbolite.

For citation: Fedosov S.V., Kenewei E., Lapidus A.A. In search of innovative materials for mass construction of low-rise buildings in the Republic of Chad. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2023. No. 5, pp. 72–78. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-813-5-72-78>

В Республике Чад материалы, используемые в строительном производстве, традиционно представлены керамической продукцией на основе местного глинистого сырья, в то же время появляются и новые материалы.

Адобы. Глинобитный кирпич (адоб) – это кирпич, полученный из смеси глины, воды и растительных остатков, таких как солома, сухие листья, опилки, конопля или шерсть животных [1]. Это один из старейших строительных материалов в африканских обществах. Он легко разлагается водой, поэтому требует хорошей защиты от дождевой воды [2].

Местный материал изготовлен на основе простых и базовых процессов. Для защиты стен от просачивания влаги и эрозии их поверхность должна быть защищена цементной штукатуркой [3]. Производство адобов не требует каких-либо технических навыков и особых требований к сырью [4]. Любая глинистая смесь является подходящим сырьем для производства адобов.

Процесс производства. Для получения качественных адобов смесь предварительно увлажняют и выдерживают в этом состоянии в течение двух–пяти дней [5]. Смесь замешивают, затем изготавливают

адобы и сушат их. Традиционный адоб имеет прочность около 5 МПа [6].

Обожженные кирпичи производятся из глины с аналогичными адобам производственными процессами. Методы приготовления разнообразны и используются в зависимости от компонентов смеси, которые применялись при изготовлении кирпича. Например, существует смешивание земли с пометом животных в соотношении от 30 до 45% смеси с глиной. Помет животных предотвращает растрескивание, а также служит топливом для осуществления процесса обжига. После того как кирпич высохнет, для обжига его укладывают без угля в качестве дополнительного топлива (рис. 1). Этот метод требует небольшого количества дров для проведения обжига, поэтому он дешевле.

Второй способ – с использованием углей в качестве дополнительного топлива. Смесь изготавливается из сухой соломы в количестве 3–10% от общей массы смеси глины.

Размеры кирпичей различны. Самые маленькие (и по-видимому, наиболее распространенные) имеют высоту от 4 до 5 см, ширину 9 см и длину от 15 до 17 см. Самые большие размеры от 7 до 10 см высотой, от 12 до 16 см шириной и от 28 до 30 см длиной. Кирпичи большего размера требуют большей внимательности и тщательности проведения процедуры обжига.

Прессованный кирпич из глины – это современная версия глинобитного блока, используемого в строительстве. Отметим, что в большинстве африканских стран и частности в Чаде, формованные блоки из прессованной глины занимают большую часть производства местных материалов.

Для производства блоков из прессованной глины обычно просеивают сухую смесь (глина) с помощью сетки (8 мм). А затем добавляют в нее песок и немного воды, чтобы смесь не была слишком влажной [7].

Преимущества блоков из прессованной глины:

- блоки из прессованной глины имеют равномерную поверхность;
- способ производства блоков из прессованной глины является гибким и адаптируемым как к сельским, так и к городским районам;
- производство блоков из прессованной глины осуществляется на местном уровне, что снижает транспортные расходы; требуется мало энергии на добычу, переработку и производство;
- производство блоков из прессованной глины происходит быстро;
- блоки из прессованной глины имеют хорошую теплоизоляционную характеристику;
- блоки из прессованной глины являются негорючими материалами [8, 9].

Недостатки блоков из прессованной глины. Несмотря на преимущества блоков из прессованной глины, у них есть недостатки, среди которых:

- в регионах с умеренным климатом дожди и морозы снижают механические и физические свойства блоков, ограничивая их долговечность;
- блоки из прессованной глины разлагаются при постоянном контакте с водой [8, 9].

Бетонные блоки. Шлакоблок – строительный материал, состоящий из цемента, песка, шлака и в некоторых случаях гравия. Стандартные размеры шлакоблока, обычно используемые для строительства в Чаде: 10×20×40 см; 15×20×40 см (рис. 2); 20×20×40 см.

Шлакоблок в основном используется в кладке, он достаточно прост в применении, устойчив к износу и атмосферным воздействиям и обеспечивает длительный срок службы зданий [10]. Минимальная прочность при сжатии составляет от 4 до 16 МПа.

Шлакоблок в Республике Чад используется преимущественно потому, что это иностранная разработка, которая считается лучшей по сравнению с традиционными местными материалами (адобами и обожженным кирпичом). Шлакоблоки шириной 15 и 20 см с штукатуркой являются наиболее распространенной строительной технологией в данном регионе. Изготовление шлакоблоков достаточно просто, реализуется в отдаленных провинциях.

Недостатками шлакоблока являются:

- низкая теплопроводность (0,27–0,65 Вт/(м·К)). Стены из шлакоблоков нуждаются в тепло- и звукоизоляции;
- сложность крепления гвоздей и дюбелей к стенам из шлакоблока;
- обязательный полив: после изготовления блоки следует поливать водой, чтобы обеспечить затвердевание и избежать последствий растрескивания и хрупкости. Полив производится вручную в течение двух и более дней, количество и время поливов зависят от температуры и влажности среды. Для правильного полива в случае местности с высокой температурой (температура достигает 52°C [10, 11]) необходима обработка 3–4 раза в день продолжительностью 20–30 мин.

Местный цементный завод «Цементы Африки».

В Чаде завод производит два вида цемента – супер СРА45 (СЕМ II 42,5) и супер СРJ45 (СЕМ II 32,5) [13].

Портландцемент СРА 45 (СЕМ II 42,5) с добавками, содержит минимальный процент клинкера (до 75%), остальное – добавки, такие как известняк и гипс. Среди основных характеристик, регламентируемых стандартом, – прочность при сжатии $R_{сж}$ 28 сут должна быть $\geq 42,5$ МПа [13].

Портландцемент СРJ45 (СЕМ II 32,5) представляет собой портландцемент с добавками и содержание клинкера 65%, остальное – известняк и гипс.

Среди основных характеристик, гарантированных стандартом, регламентируемая прочность при сжатии $R_{сж}$ 28 сут должна быть $\geq 32,5$ МПа [12].

Состав клинкера завода «Цементы Африки» представлен:



Рис. 1. Кирпичи, выложенные для обжига (а) и обожженные, готовые к использованию (б)

Fig. 1. Bricks laid out for firing (a) and fired, ready to use (b)



Рис. 2. Шлакоблочные блоки размером 15×20×40 см

Fig. 2. Slag blocks sized 15×20×40 cm

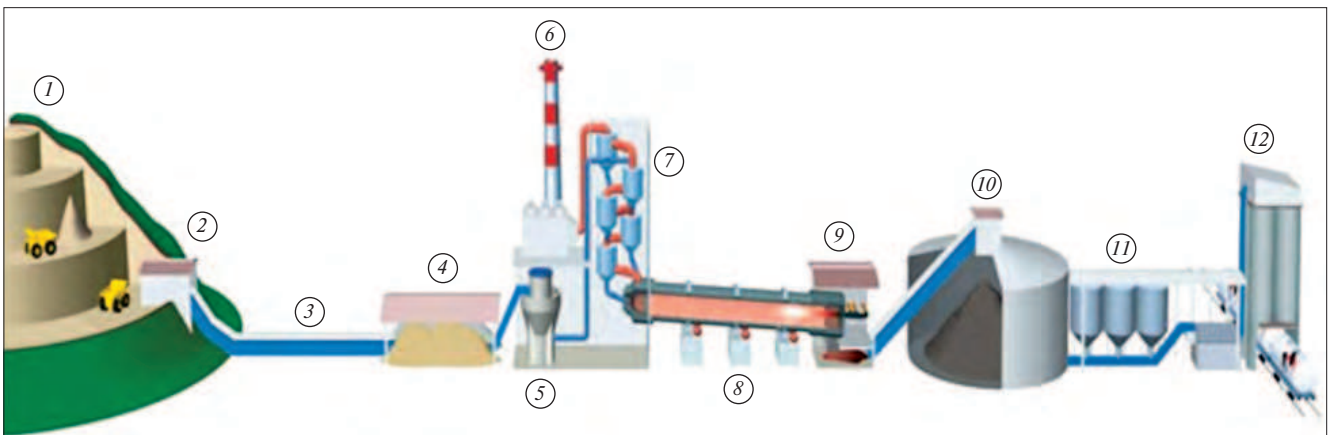


Рис. 3. Схема процесса производства цемента [13]

Fig. 3. Diagram of the cement production process [13]

- 65% CaO (колеблется в диапазоне 60–69%);
- 21% SiO₂ (колеблется в диапазоне 18–24%);
- 6% Al₂O₃ (колеблется в диапазоне 4–8%);
- 3% Fe₂O₃ (колеблется в диапазоне 1–8%);
- 2% MgO (колеблется в диапазоне 0–5% максимум);
- 1% щелочи (колеблется в диапазоне 0–2% максимум);
- 1% SO₃ (колеблется в диапазоне 0–3% максимум).

Производственная схема представлена на рис. 3.

• карьер (1): известняк и мергель добываются из карьеров шахтным способом или с помощью механической лопаты;

• дробилка (2): полученные куски дробятся в ударных или щековых дробилках до максимального размера 50 мм;

• транспортировка (3): дробленые материалы доставляются на завод «Цементы Африки» самосвалами, а чаще всего ленточными конвейерами;

• предварительная гомогенизация (4): известняк и мергель смешиваются и предварительно гомогенизируются;

• мукомольная мельница (5): предварительно гомогенизированный материал измельчается и сушится в мельнице;



Рис. 4. Пример арболитового блока

Fig. 4. Arbolite block

- удаление пыли (6): пыль, выбрасываемая мельницами или содержащаяся в продуктах сгорания, задерживается электростатическими или рукавными фильтрами;
- теплообменник (7): перед подачей во вращающуюся печь мука предварительно нагревается;
- вращающаяся печь (8): сырая мука превращается в клинкер при температуре 1450°C;
- охладитель клинкера (9): для быстрого охлаждения клинкер подается в контакт с воздухом;

Таблица 1
Table 1Средняя плотность арболита из вторичного сырья сельскохозяйственного производства [24]
Average density of arbolite from secondary raw materials of agricultural production [24]

Арболит	Класс по прочности при сжатии	Марка по прочности при сжатии	Средняя плотность, кг/м ³ , арболита на сырье		
			Костра льна или дробленых стеблей хлопчатника	Костра конопли	Дробленая рисовая солома
Теплоизоляционный	В 0,35	M5	400–500	400–500	500
	В 0,75	M10	450–500	450–500	–
	В 1	M15	500	500	–
Конструкционный	В 1,5	–	500–600	50–600	600–700
	В 2	M25	500–700	600–700	–
	В 2,5	M35	600–750	–	–
	В 3,5	M50	700–850	–	–

Таблица 2
Table 2Сравнение арболита с другими материалами [26]
Comparison of arbolite with other materials [26]

Материал	Плотность, кг/м ³	Теплопроводность, Вт/(м·К)	Морозостойкость, циклов	Предел прочности при сжатии, МПа
Кирпич керамический	1550–1700	0,6–0,95	25	2,5–25
Кирпич силикатный	1700–1950	0,85–1,15	25	5–30
Керамзитобетон	900–1200	0,5–0,7	25	3,5–7,5
Газобетон	600–800	0,18–0,28	35	2,5–15
Пенобетон	200–1200	0,14–0,38	35	2,5–7,5
Дерево	450–600	0,15	–	1,5–4
Арболит	400–850	0,07–0,17	25–50	0,5–5

• бункер для клинкера (10): после охлаждения клинкер хранится в бункере;

• цементная дробилка (11): в этом отделении клинкер измельчается совместно с 5% гипса для получения цемента;

• логистика (12): цемент поставляется навалом в цистернах или в мешках.

Рассмотрев материалы, используемые при строительстве в Республике Чад, можно заключить, что все они имеют ряд недостатков. Это вызывает интерес производителей к разработке и внедрению новых материалов, которые будут отвечать требованиям безопасности, экологичности и сохранению природных ресурсов. Одним из таких материалов может стать арболит (рис. 4), который можно получить, используя вторичный ресурс – отходы сельского хозяйства (стебли хлопчатника), объем которых увеличивается ежегодно. Перспективным направлением также является применение золы-уноса завода «Цементы Африки» с добавлением химических добавок. В этом случае обилие сельскохозяйственных и промышленных отходов способствует крупномасштабному производству арболитов.

Арболит (от лат. «arbor» – дерево и «litos» – камень) состоит в основном (80–90%) из органических заполнителей, цемента и химических добавок [13].

Производство арболитных изделий осуществляется по следующей технологической цепочке [14]: измельчение органического заполнителя (костра льна, конопли; солома злаковых культур; стебли хлопчатника, подсолнуха) – сепарация (классификация, просеивание) – перемешивание (в водной среде с химическими добавками) – дозирование и уплотнение прессованием в форме – гидратация цементных составляющих – выдержка в течение 4–5 сут – извлечение и складирование.

Преимущества и недостатки арболитов.**Преимущества:**

• огнестойкость; несмотря на то что арболит состоит в основном из органических веществ (80–90%), он устойчив к огню при температуре до 300°C в течение 0,75–1,5 ч. Это свойство приобретает благодаря добавлению химических веществ, таких как сульфат алюминия;

• устойчивость к гниению под действием микроорганизмов (биологическая коррозия);

• теплопроводность (0,07–0,17 Вт/(м·К)) [15]. Стандартный блок из арболита толщиной 30 см по своим тепло- и звукоизоляционным свойствам обладает характеристиками, как у кирпичной стены толщиной 90 см и как у классической деревянной стены толщиной 50 см;

- звукоизоляция; помимо своей способности не допускать теплообмена между внутренней и внешней средой здания, арболит также не позволяет передавать звук между стенами, что делает его рекомендуемым материалом для акустических конструкций;

- легкий вес; конструкции из арболита имеют меньший вес, чем другие строительные материалы, что позволяет снизить общий вес здания и нагрузку на фундамент и пол; это, в свою очередь, позволяет использовать более дешевые легкие фундаменты и значительно снизить стоимость строительных работ;

- экологичность; арболит — экологически чистый материал — поскольку состоит на 80–90% из природных элементов. Состав материала, его производство и эксплуатация безопасны для здоровья человека и окружающей среды;

- пористость; благодаря своей пористой структуре дышащие стены из арболита обеспечивают комфортную температуру в здании, хороший воздухообмен, что способствует благоприятному микроклимату внутри помещения;

- паропроницаемость; помимо своей пористости, арболит обладает хорошей паропроницаемостью, что позволяет ему поддерживать (теплую) комнатную температуру здания в холодной зоне и поддерживать прохладную комнатную температуру в жаркой зоне. Этот материал не только впитывает влагу, но и обеспечивает естественный и экологичный микроклимат внутри здания. В этом случае расходы на отопление в холодной зоне или на кондиционирование воздуха здания в жаркой зоне значительно сокращаются;

- эксплуатационные характеристики; арболит обладает хорошей механической прочностью на удар, легкостью крепления, адгезией к креплению на его поверхность элементов;

- долговечность; материал не подвергается деформации с течением времени. Он не подвержен повреждению микроорганизмами, присутствующими в его окружающей среде;

- время затвердевания; после выполнения основных этапов строительства конструкция с применением арболита не требует времени на осадку, что значительно сокращает время строительства [16; 17].

Недостатки:

- защита от длительного воздействия воды: арболит состоит на 80–90% из натуральных компонентов, длительное воздействие на них дождя или снега не приведет к моментальному разрушению материала, но если эти явления будут постоянными, структура арболита может пострадать. Поэтому, чтобы избежать каких-либо неудобств, необходимо следить за герметичностью стен, подверженных воздействию влаги;

- сложность при выборе подходящего поставщика составляющих компонентов способствуют появлению на рынке немалого количества фальсификата;
- высокий коэффициент водопоглощения;

- арболит пригоден только для строительства малоэтажных зданий [16, 17].

Химические добавки и их влияние на арболит.

Химические добавки особым образом воздействуют на арболит: ускоряют процесс твердения, регулируют пористость смеси, повышают устойчивость к коррозии и гармонизируют смесь для получения эффективного конечного продукта [18]. Хлорид кальция, по Н.И. Довнару [19], действует на составляющие бетона в качестве пластификатора, уменьшая необходимое количество воды затворения, ускоряет процесс затвердевания вяжущего и снижает температуру прогрева термообработки при нормальных условиях. Недостатки при использовании хлорида кальция для получения арболитов:

- дозирование должно проводиться опытным путем с тщательным подбором режима, с учетом химических реакций компонентов цемента;

- он сохраняет влагу и передает это свойство изготовленному бетону, что снижает показатель прочности и повышает значение коэффициента теплопроводности бетона.

Несмотря на недостаток хлорида кальция, он является наиболее часто используемым при производстве арболитов.

Сульфат алюминия используется для восполнения выявленных недостатков хлорида кальция, поскольку он не сохраняет влагу, не окрашивает поверхность бетона, не ухудшает химическую стойкость бетона [20]. Согласно исследованию Кауфмана сульфат алюминия снижает устойчивость арболита на 10–12% по сравнению с материалом, полученным на основе хлорида кальция [20]. Среди добавок, часто используемых для изготовления арболитовых изделий, можно назвать жидкое стекло [19]. Оно создает пленку вокруг органических заполнителей, предотвращая проникновение опасных веществ из органических составляющих в цемент. Также используется фосфорная кислота в соединении с оксидами металлов, она позволяет увеличить прочность арболита [21].

Для того чтобы усилить вяжущие свойства веществ с органическим заполнителем, ускорить отверждение и повысить прочность арболитовых изделий, в состав смеси добавляют небольшое количество глицерина.

Для ускорения отверждения арболитовых изделий и также для повышения их прочностных свойств в смесь вводят гидроксид кальция и карбонат аммония [22].

Международный опыт свидетельствует о том, что этот материал можно без проблем использовать в Африке, поскольку климатические условия это позволяют (табл. 1, 2) [23].

Выводы

Исходя из изложенного, можно сделать следующие выводы [24, 25]:

- блоки из необожженной глины не являются эффективными и инновационными материалами,

которые могут быть рекомендованы для массового строительства малоэтажных зданий [26];

- шлакоблоки не являются конкурентными материалами, и они требуют значительных дополнительных затрат для создания комфорта в помещениях [27];

- блоки из прессованной глины подвержены разрушению при воздействии воды и влаги, и они также не являются эффективными материалами для массового строительства [28];

- арболиты являются экологически чистыми, актуальными, надежными и эффективными материалами для массового строительства малоэтажных домов [29];

- состав арболита позволяет получать легкие, экономичные, экологически чистые блоки и может применяться на всей территории Республики Чад;

- прочностные характеристики арболитов при прочности при сжатии (1,5; 2,5; 3,5; 5) МПа, по маркам (М15; М25; М35; М50) и по классам (В0,5; В1; В1,5; В2; В2,5; В3,5) позволяют рекомендовать их не только в качестве теплоизоляционных, но и в качестве конструкционных материалов для массового строительства малоэтажных зданий [29];

- строительство дома из арболита стоит дешевле, что рекомендует его как идеальный материал для бедных стран с низкими доходами населения.

Список литературы / References

- Amou D., Benyahia D., Semcha A., et al. Conception d'une brique comprimée à partir de sable et d'argile de la région d'adrar (bts). *Thèse de doctorat. Université Ahmed Draïa-Adrar*. 2016. 21 p.
- Mango-Itulamy L.A. Valorisation des gisements argileux pour la fabrication des blocs de terre comprimée. *Thèse de doctorat. Université de Liège*. 2019. 14 p.
- Eugénie Crété. Burundi Analyse comparative des techniques de maçonnerie en terre. *International Federation of Red Cross and Red Crescent Societies-Shelter Research Unit*. 2019. 12 p. <https://preparecenter.org/wp-content/uploads/2020/10/24BI01-Rapport.pdf>
- Mango-Itulamy L.A. Valorisation des gisements argileux pour la fabrication des blocs de terre comprimée. *Thèse de doctorat. Université de Liège*. 2019. 15 p.
- Eugénie Crété. Burundi Analyse comparative des techniques de maçonnerie en terre. *International Federation of Red Cross and Red Crescent Societies-Shelter Research Unit*. 2019, pp. 13–14. <https://preparecenter.org/wp-content/uploads/2020/10/24BI01-Rapport.pdf>
- Mango-Itulamy L.A. Valorisation des gisements argileux pour la fabrication des blocs de terre comprimée. *Thèse de doctorat. Université de Liège*. 2019. 20 p.
- Eugénie Crété. Burundi Analyse comparative des techniques de maçonnerie en terre. *International Federation of Red Cross and Red Crescent Societies-Shelter Research Unit*. 2019, pp. 36–37. <https://preparecenter.org/wp-content/uploads/2020/10/24BI01-Rapport.pdf>
- Samou D., Benyahia D., Semcha A., et al. Conception d'une brique comprimée à partir de sable et d'argile de la région d'Adrar (bts). *Thèse de doctorat. Université Ahmed Draïa-Adrar*. 2016, pp. 23–24.
- Mango-Itulamy L.A. Valorisation des gisements argileux pour la fabrication des blocs de terre comprimée. *Thèse de doctorat. Université de Liège*. 2019, pp. 29–32.
- Catalogue bâtiment. Pac la signature du béton naturel. 2020, pp. 11–17. https://www.ets-pac.fr/upload/catalogues/lapac_catalogue_batiment.pdf
- Eugénie Crété/ Burundi Analyse comparative des techniques de maçonnerie en terre. *International Federation of Red Cross and Red Crescent Societies-Shelter Research Unit*. 2019. 20 p. <https://preparecenter.org/wp-content/uploads/2020/10/24BI01-Rapport.pdf>
- Dagou H.H. Etude comparative des caractéristiques mécaniques des ciments utilisés au Burkina Faso. *Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement*. 2015. С. 11–15. http://documentation.2ie-edu.org/cdi2ie/opac_css/doc_num.php?explnum_id=2181
- Пряничникова А.В., Долматов С.Н., Стрижнев В.П., Шаронова М.З. Влияние древесных сахаров на прочностные характеристики древесно-цементных композиций. *Молодые ученые в решении актуальных проблем науки: Сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых*. Красноярск, 2019. С. 115–117.
- Pranichnikova A.V., Dolmatov S.N., Strizhnev V.P., Sharonova M.Z. Influence of wood sugars on the strength characteristics of wood-cement compositions. *Young scientists in solving urgent problems of science. Collection of materials of the All-Russian scientific-practical conference of students, graduate students and young scientists*. Krasnoyarsk. 2019, pp. 115–117. (In Russian).
- Патент RU2594024C1. *Строительный элемент, способ его изготовления и способ его использования* / Дун А. Заявл. 12.05.2015. Опубл. 10.08.2016. Бюл. № 22.
- Patent RU2594024C1. *Building element, method of its manufacture and method of its use* / Dun A. Declared 12.05.2015. Published 10.08.2016. Bull. No. 22. (In Russian).
- Матыева А.К. Модифицированный арболит из местного сырья Кыргызской Республики по энергосберегающей технологии для ограждающих конструкций зданий // *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. 2019. № 4. С. 33–37. URL: <https://applied-research.ru/ru/article/view?id=12693>
- Matyeva A.K. Modified wood concrete from local raw materials of the Kyrgyz Republic using energy-saving

- technology for building envelopes. *International Journal of Applied and Fundamental Research*. 2019. No. 4, pp. 33–37. URL: <https://applied-research.ru/article/view?id=12693>
16. Асатов Н.У. Дом из арболита // *Academy*. 2020. № 12. С. 91–93.
 16. Asatov N.U. Wood concrete house. *Academy*. 2020. No. 12, pp. 91–93. (In Russian).
 17. Куницкая О.А., Замерщиков Д.Н. Перспективная технология производства композиционных строительных материалов на основе пластика и древесных отходов // *Вестник АГАТУ*. 2021. № 3. С. 65–66.
 17. Kunitskaya O.A., Zamerschikov D.N. Perspective technology for the production of composite building materials based on plastic and wood waste. *Vestnik AGATU*. 2021. No. 3, pp. 65–66. (In Russian).
 18. Жбанова Е.В., Девяткина И.А. Перспективы использования отходов переработки древесины при производстве арболита. *Инженерные и социальные системы: Сборник научных трудов института архитектуры, строительства и транспорта ИВГПУ*. Иваново, 2019. Вып. 4. С. 43–46.
 18. Zhbanova E.V., Devyatkina I.A. Prospects for the use of wood processing waste in the production of wood concrete. *Engineering and social systems. Collection of scientific papers of the institute of architecture, construction and transport of IVGPU*. Ivanovo. 2019. Iss. 4, pp. 43–46.
 19. Коринчук М.А., Румянцева В.Е. Получение легких бетонов (арболитов) с использованием вторичного сырья на основе хлопчатника, конопли, рисовой шелухи // *Молодые ученые – развитию национальной технологической инициативы (поиск)*. 2022. № 1. С. 321–323.
 19. Korinchuk M.A., Rumyantseva V.E. Obtaining lightweight concretes (arbolites) using secondary raw materials based on cotton, hemp, rice husk. *Molodyye uchenyye – razvitiyu natsional'noy tekhnologicheskoy initsiativy (poisk)*. 2022. No. 1, pp. 321–323. (In Russian).
 20. Краснова В.Ф., Зотов Д.А. Применение химических добавок для изготовления арболита // *Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика*. 2018. № 4. С. 38–40.
 20. Krasnova V.F., Zotov D.A. The use of chemical additives for the manufacture of wood concrete. *Aktual'nyye napravleniya nauchnykh issledovaniy XXI veka: teoriya i praktika*. 2018. No. 4, pp. 38–40. (In Russian).
 21. Маматов Х.А., Абдуллаев У.М. Заполнители для шлакощелочных легких бетонов // *Innovative Development in Educational Activities*. 2022. Т. 1. № 5. С. 31–38.
 21. Mamatov Kh.A., Abdullaev U.M. Aggregates for slag-alkali lightweight concretes. *Innovative Development in Educational Activities*. 2022. Vol. 1. No. 5, pp. 31–38. (In Russian).
 22. Матыева А.К., Кенешбек У.Т., Сайытказиев Н.Т. Арболит из легкого бетона // *Наука и инновационные технологии*. 2019. № 10. С. 41–42.
 22. Matyeva A.K., Keneshbek U.T., Saiytkaziev N.T. Arbolit from lightweight concrete. *Nauka i innovatsionnyye tekhnologii*. 2019. No. 10, pp. 41–42. (In Russian).
 23. Исакулов Б.Н., Байбулов А.К., Иваницкая Н.В. Исследование механизма формирования прочности и разрушение серосодержащих арболитовых композитов при различных нагрузках // *Вестник Евразийского национального университета им. Л.Н. Гумилева. Сер. Технические науки и технологии*. 2019. Т. 126. № 1. С. 32–40.
 23. Isakulov B.N., Baibulov A.K., Ivanitskaya N.V. Study of the mechanism of strength formation and destruction of sulfur-containing arbolite composites under various loads. *Vestnik of the Eurasian National University named after L.N. Gumilyov. Series: technical sciences and technologies*. 2019. Vol. 126. No. 1, pp. 32–40. (In Russian).
 24. Жбанова Е.В., Девяткина И.А. Перспективы использования отходов переработки древесины при производстве арболита. *Инженерные и социальные системы. Сборник научных трудов Института архитектуры, строительства и транспорта ИВГПУ*. Иваново, 2019. Вып. 4. С. 43–46.
 24. Zhbanova E.V., Devyatkina I.A. Prospects for the use of wood processing waste in the production of wood concrete. *Engineering and social systems. Collection of scientific papers of the institute of architecture, construction and transport of IVGPU*. Ivanovo. 2019. Iss. 4, pp. 43–46. (In Russian).
 25. Eugénie Crété. Burundi Analyse comparative des techniques de maçonnerie en terre. *International Federation of Red Cross and Red Crescent Societies–Shelter Research Unit*. 2019, pp. 13–14. <https://preparecenter.org/wp-content/uploads/2020/10/24BI01-Rapport.pdf>
 26. Catalogue bâtiment. *Pac la signature du béton naturel*. 2020, pp. 11–17. https://www.ets-pac.fr/upload/catalogues/lapac_catalogue_batiment.pdf
 27. Mango-Itulamy L.A. Valorisation des gisements argileux pour la fabrication des blocs de terre comprimée. *Thèse de doctorat. Université de Liège*. 2019, pp. 29–32.
 28. Местников А.Е., Семенов С.С., Васильева Д.В. Рациональное использование минерально-сырьевых ресурсов Якутии в технологии строительных материалов // *Фундаментальные исследования*. 2017. № 12-1. С. 80–84.
 28. Mestnikov A.E., Semenov S.S., Vasil'eva D.V. Rational use of mineral resources of Yakutia in the technology of building materials. *Fundamental'nyye issledovaniya*. 2017. No. 12-1, pp. 80–84. (In Russian).
 29. ГОСТ 19222–2019. Арболит и изделия из него. *Технические условия*. М.: Стандартинформ, 2019. С. 6–8.
 29. GOST RF 19222–2019. *Arbolit i izdeliya iz nego. Tekhnicheskiye usloviya* [Arbolit and products from it. Specifications]. Moscow: Standartinform. 2019, pp. 6–8. (In Russian).

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, докторанты, 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



**20–21
сентября
2023 г.
п. Архыз**

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

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

**Одиннадцатая Международная конференция
«Повышение эффективности производства
и применения гипсовых материалов и изделий»**

Тематика конференции:

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

Генеральный спонсор:



Генеральный информационный спонсор: журнал



КОМФОРТНЫЙ ДОМ ВМЕСТЕ С КНАУФ



Ремонт и отделка дома или квартиры с материалами КНАУФ – это комплексные решения любой дизайнерской идеи и строительной задачи.

www.knauf.ru
ООО «КНАУФ ГИПС»

KNAUF
Немецкий стандарт

УДК 666.533

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-813-5-81-88>

С.А. ОТМАН АЗМИ, аспирант (azmiothman2222@gmail.ru),
 Н.В. ЧЕРНЫШЕВА, д-р техн. наук, доцент, профессор (chernysheva56@rambler.ru),
 М.Ю. ДРЕБЕЗГОВА, канд. техн. наук, доцент (mdrebezgova@mail.ru),
 Е.В. КОВАЛЕНКО, аспирант (elenadmitriev@yandex.ru),
 С.В. МАСАЛИТИНА, магистрант (sveta.masalitina2017@gmail.com)

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

Состав и свойства композиционного гипсового вяжущего повышенной водостойкости

Для отрасли малоэтажного строительства, динамично развивающейся в настоящее время, требуется подбор инновационных материалов и решений, в том числе быстротвердеющих видов вяжущих. Актуальным является получение композиционных гипсовых вяжущих (КГВ) и бетонов (растворов) на их основе за счет использования надлежащего соотношения компонентов – гипсовых вяжущих, портландцемента и комплекса тонкодисперсных минеральных добавок, снижающих концентрацию $\text{Ca}(\text{OH})_2$ в жидкой фазе твердеющей системы с образованием низкоосновных гидросиликатов кальция и других малорастворимых соединений, уплотняющих структуру и препятствующих проникновению влаги внутрь затвердевшего вяжущего. Материалы на основе КГВ достаточно быстро твердеют и набирают требуемую прочность. Представленные в статье результаты экспериментальных исследований подтверждают активность используемых тонкодисперсных минеральных добавок (кварцевого песка, метакаолина ВМК-45) и согласуются с показателями физико-механических характеристик гипсоцементного вяжущего на их основе. При твердении КГВ аморфная фаза SiO_2 в составе используемых минеральных добавок способствует связыванию $\text{Ca}(\text{OH})_2$, выделяющегося при гидратации C_3S . Снижается основность твердеющей системы с формированием низкоосновных гидросиликатов кальция второй генерации и других новообразований, которые совместно с наполнителем (известняковой пылью) уплотняют микроструктуру твердеющей матрицы и, как следствие, повышают стабильность композиции.

Ключевые слова: минеральные добавки, композиционные гипсовые вяжущие, состав и свойства, микроструктура.

Исследования физико-механических свойств, фазового состава и микроструктуры камня на основе КГВ с комплексом минеральных добавок были проведены в рамках реализации программы «Приоритет 2030» на базе Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова.

Для цитирования: Отман Азми С.А., Чернышева Н.В., Дребезгова М.Ю., Коваленко Е.В., Масалитина С.В. Состав и свойства композиционного гипсового вяжущего повышенной водостойкости // *Строительные материалы*. 2023. № 5. С. 81–88.

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-813-5-81-88>

S.A. OTHMAN AZMI, Postgraduate (azmiothman2222@gmail.ru),
 N.V. CHERNYSHEVA, Doctor of Sciences (Engineering), Docent, Professor (chernysheva56@rambler.ru),
 M.Yu. DREBEZGOVA, Candidate of Sciences (Engineering), Docent (mdrebezgova@mail.ru),
 E.V. KOVALENKO, Postgraduate (elenadmitriev@yandex.ru), S.V. MASALITINA, Magistrate, (sveta.masalitina2017@gmail.com)
 Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (46, Kostyukova Street, Belgorod, 308012, Russian Federation)

Composition and Properties of Composite Gypsum Binder with Increased Water Resistance

The industry of low-rise construction, which is dynamically developing at the present time, requires the selection of innovative materials and solutions, including fast-hardening types of binders. It is relevant to obtain composite gypsum binders (CGB) and concretes (solutions) based on them by using the appropriate ratio of components – gypsum binders, Portland cement and a complex of finely dispersed mineral additives that reduce the concentration of $\text{Ca}(\text{OH})_2$ in the liquid phase of the hardening system with the formation of low-base calcium hydrosilicates and other poorly soluble compounds that seal the structure and prevent penetration of moisture into the hardened binder. Materials based on CGB harden quickly enough and gain the required strength. The results of experimental studies presented in the article confirm the activity of fine mineral additives used (quartz sand, metakaolin ВМК-45) and are consistent with the indicators of the physical and mechanical characteristics of gypsum cement binder based on them. During the hardening of CGB, the amorphous phase of SiO_2 in the composition of the mineral additives used contributes to the binding of $\text{Ca}(\text{OH})_2$, released during hydration of C_3S . The basicity of the hardening system decreases with the formation of low-base calcium hydrosilicates of the second generation and other neoplasms, which, together with the filler (limestone dust), compact the microstructure of the hardening matrix and, as a result, increase the stability of the composition.

Keywords: mineral additives, composite gypsum binders, composition and properties, microstructure.

Studies of the physical and mechanical properties, phase composition and microstructure of the stone based on CGB with a complex of mineral additives were carried out as part of the implementation of the “Priority 2030” Program at the base of the Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov.

For citation: Othman Azmin S.A., Chernysheva N.V., Drebezgova M.Yu., Kovalenko E.V. Composition and properties of composite gypsum binder with increased water resistance. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2023. No. 5, pp. 81–88. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-813-5-81-88>

В настоящее время ввиду динамично развивающейся отрасли малоэтажного строительства растет потребность в новых инновационных решениях для расширения спектра строительных материалов, в том числе быстротвердеющих видов вяжущих. Эффек-

тивными являются гипсовые вяжущие, однако в строительной практике из-за низких показателей по водо-, морозо- и атмосферостойкости для наружной отделки стеновых конструкций зданий и сооружений они не используются.

Таблица 1
Table 1

Химический состав минеральных добавок и наполнителя
Chemical composition of mineral additives and filler

Компонент	Оксиды, мас. %								
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃
Кварцевый песок	91	4,54	0,29	0,09	2,6	0,27	0,45	0,65	0,003
Метакаолин	56,1	40,5	0,9	–	0,16	–	0,15	0,79	–
Известняковая пыль	4,25	1,67	0,43	0,06	28,48	20,17	0,12	0,19	0,098

Получение эффективных материалов для наружной отделки возможно путем использования водостойких композиционных гипсовых вяжущих (КГВ), включающих тщательно подобранную смесь гипсового вяжущего, портландцемента, а также активных минеральных добавок [1–12]. Материалы на основе КГВ достаточно быстро твердеют и набирают требуемую прочность. Использование КГВ с более низким энергопотреблением взамен портландцемента может рассматриваться и как один из методов снижения экологических рисков.

При разработке достаточно устойчивых твердеющих структур гипсоцементного камня необходимо учитывать, что их разрушение происходит в результате образования этtringита – 3CaO·Al₂O₃·3CaSO₄·32H₂O, занимаемый объем которого в композиции значительно превышает суммарный объем исходных соединений.

С целью устранения деструктивных процессов в состав вяжущего вводят минеральные добавки, содержащие активный кремнезем (SiO₂) и способные снижать концентрацию гидроксида кальция в твердеющей системе в определенный период времени с образованием труднорастворимых микродисперсных новообразований.

Активность минеральных добавок зависит от химического состава, наличия аморфного кремнезема, от величины их удельной поверхности и др. [13].

При создании КГВ с учетом ранее проведенных исследований [3, 4] одновременно применяли две модификации гипсовых вяжущих (табл. 1) – α- и β-модификацию (70% – Г-5 БП и 30% – ГВВС-16), ЗАО «Самарский гипсовый комбинат»; портландцемент ЦЕМ I 42,5 Н, «Новоросцемент» (ГОСТ 31108–2016); минеральные добавки – малоактивный тонкомолотый кварцевый песок и высокоактивный метакаолин ВМК-45, а также для уплотнения твердеющей матрицы КГВ в качестве наполнителя – известняковую пыль.

Химический состав минеральных добавок представлен в табл. 1, свойства гипсовых вяжущих в табл. 2.

Для получения из кварцевого песка тонкодисперсной минеральной добавки его предварительно сушили, а затем, согласно ГОСТ 310.2–810, мололи в лабораторной вибрационной мельнице до удельной поверхности 500–700 м²/кг.

Для подтверждения реакционной способности минеральной добавки из тонкомолотого песка были проведены исследования по поглощению гидроксида каль-

ция в твердеющей системе согласно ТУ 21-31-62–89 – Гипсоцементно-пуццолановое вяжущее (табл. 3).

В результате анализа полученных данных было выявлено, что для обеспечения стабильности гипсоцементной композиции целесообразно ис-

Таблица 2
Table 2

Свойства гипсовых вяжущих
Properties of gypsum binders

Показатели	Вяжущее	
	Г-5 БП	ГВВС-16
Степень помола, максимальный остаток на сите с размером ячеек 0,2 мм, %	14	21
Нормальная плотность	0,48	0,38
Сроки схватывания, мин, с: начало конец	6-30 10-30	11-30 13-00
Предел прочности при изгибе, МПа	2,5	6,3
Предел прочности при сжатии, МПа: – сухих образцов – насыщенных водой образцов	5 12,2 5,3	16 29,8 7,7
Коэффициент размягчения	0,34	0,47

Таблица 3
Table 3

Кинетика поглощения гидроксида кальция
Kinetics of absorption of calcium hydroxide

№ п/п	Материалы, г				Концентрации СаО в р-ре, г/л, через:	
	Гипс	ПЦ	Песок	ВМК-45	5 сут	7 сут
Удельная поверхность тонкодисперсного кремнезема 500 м ² /кг						
1	4	2,5	2,5	–	1,12	1,05
2	4	2,5	2,5	0,125	1,07	0,98
3	4	2,5	2,5	0,25	1,02	0,91
4	4	2,5	5	–	1,1	1
5	4	2,5	5	0,125	1,03	0,85
6	4	2,5	5	0,25	0,91	0,83
Удельная поверхность тонкодисперсного кремнезема 700 м ² /кг						
7	4	2,5	2,5	–	1,12	1,03
8	4	2,5	2,5	0,125	1,03	0,96
9	4	2,5	2,5	0,25	0,98	0,89
10	4	2,5	5	–	1,07	0,98
11	4	2,5	5	0,125	1	0,83
12	4	2,5	5	0,25	0,86	0,8

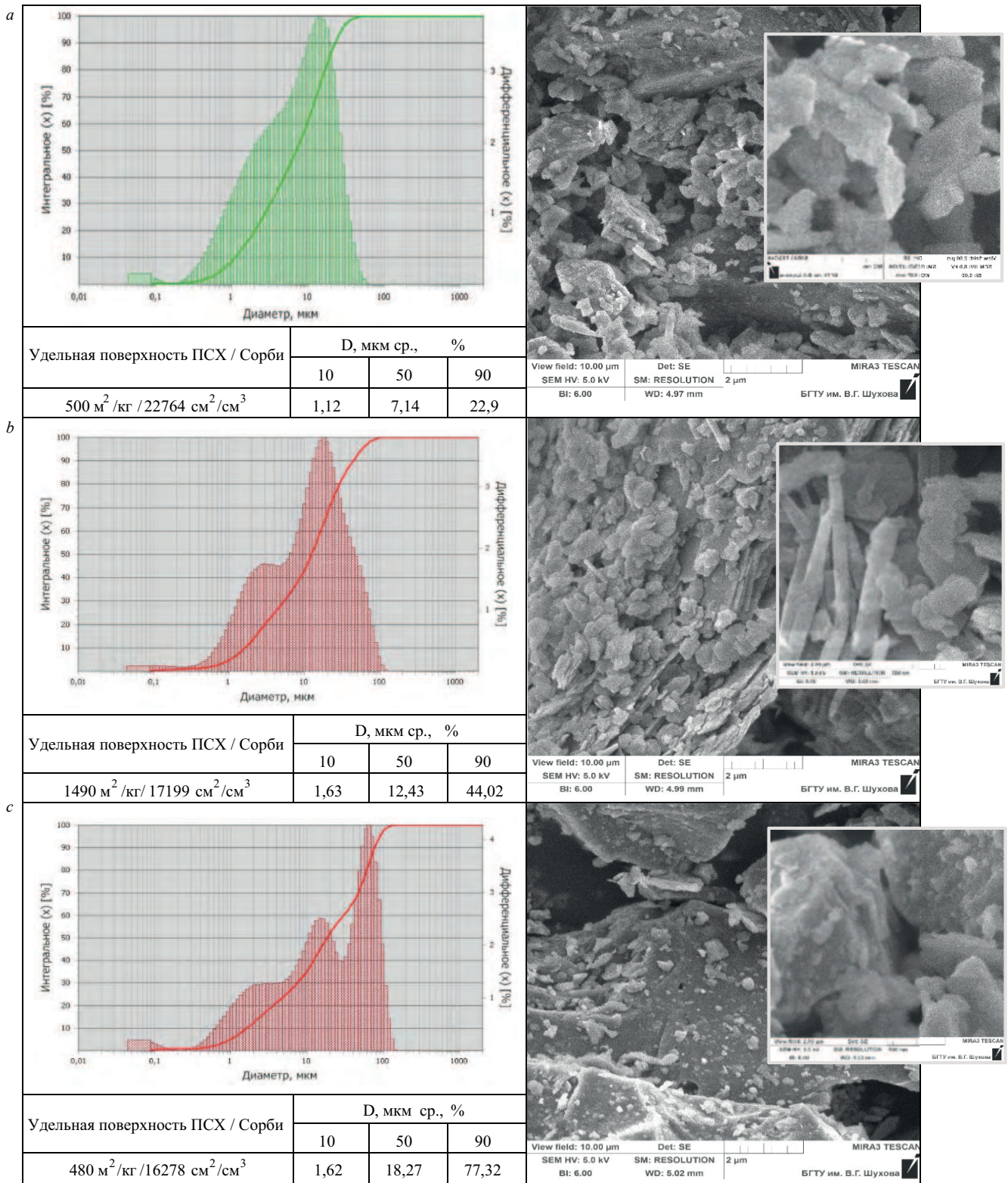


Рис. 1. Характеристики гранулометрического состава минеральных компонентов КГВ: *a* – кварцевый песок (удельная поверхность 500 м²/кг); *b* – метакраолин ВМК-45; *c* – известняковая пыль
Fig. 1. Characteristics of the granulometric composition of mineral components of KGV: *a* – quartz sand (specific over 500 м²/кг); *b* – metakaolin VMK-45; *c* – screening of limestone crushing (limestone dust)

пользовать тонкомолотый кварцевый песок с удельной поверхностью 500 м²/кг и соотношением портландцемент:тонкодисперсный кварц – 1:2 с дополнительным введением в состав вяжущего

метакраолина ВМК-45 в количестве 5% от массы портландцемента.
 С учетом полученных данных и рекомендаций [2] приготовление КГВ осуществляли последовательным

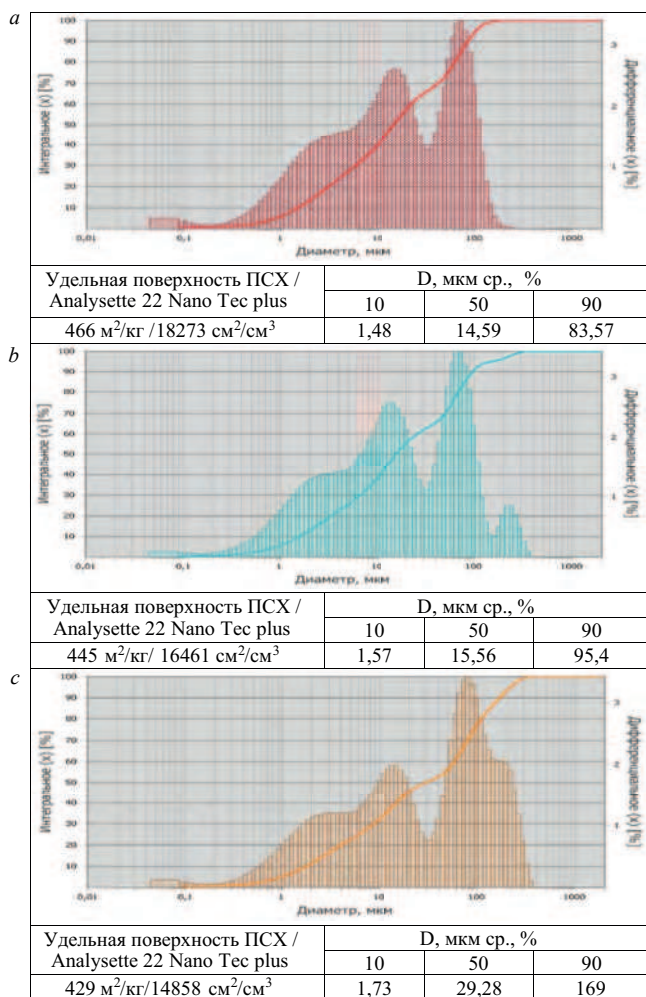


Рис. 2. Характеристики гранулометрического состава КГВ: а – Г-Ц-П500; б – Г-Ц-П500-ВМК-45; с – Г-Ц-П500-ВМК-45-изв. пыль
 Fig. 2. Characteristics of the granulometric composition of KGV: a – G-C-P500; b – G-C-P500-VMK-45; c – G-C-P500-VMK-45-lime dust

смешиванием, совмещенным с кратковременным до-молотом (до 3 мин) в лабораторной вибрационной мельнице всех компонентов КГВ (мас. %): предварительно диспергированный кварцевый песок (20%), метакралин ВМК-45 (5% от массы ПЦ) и известняковую пыль (1,5%) совместно с портландцементом (10%), а затем с гипсовым вяжущим (70%), включающим две модификации (Г-5 Б II – 70% и ГВВС-16 – 30%).

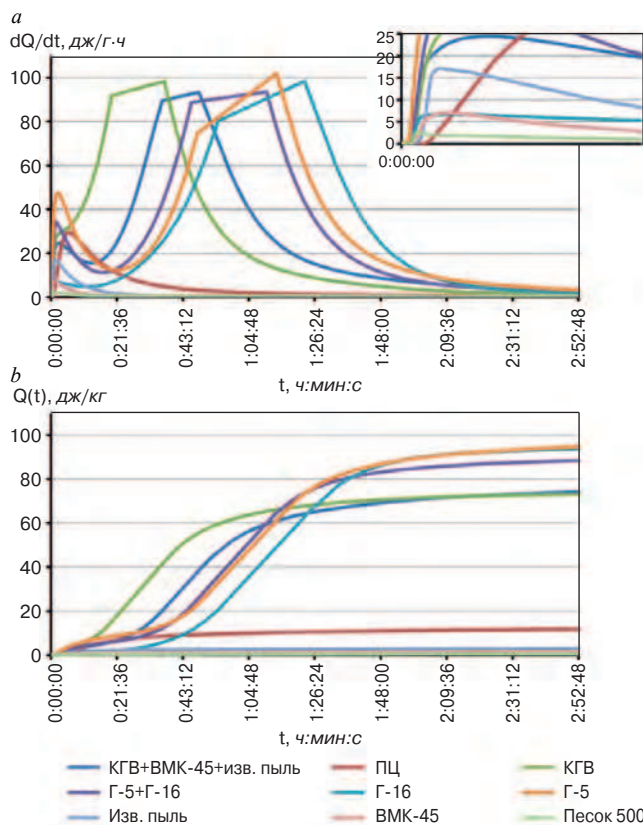


Рис. 3. Кинетика тепловыделения при гидратации КГВ с комплексом минеральных добавок: а – интенсивность скорости; б – теплота гидратации
 Fig. 3. Kinetics of heat release during hydration of KGV with a complex of mineral additives: a – intensity of velocity; b – heat of hydration

Анализ гранулометрического состава минеральных добавок и наполнителя, а также КГВ с их использованием, выполненный с помощью прибора Microsizer 201, представлен на рис. 1.

Было установлено, что в тонкомолотом до удельной поверхности 500 м²/кг кварцевом песке присутствуют частицы с развитой шероховатой поверхностью, основной диапазон которых находится в интервале от 1 до 150 мкм с максимумом (90%) в области 22,9 мкм; 50% частиц составляет фракция размером 7,14 мкм и 10% – фракция частиц размером 1,12 мкм (рис. 1, а).

Высокоактивный метакралин ВМК-45 содержит значительное количество мелких частиц размером от

Таблица 4
 Table 4

Состав и свойства КГВ
 Composition and properties of KGV

№ п/п	Состав КГВ, мас. %					В/В	Сроки схватывания, мин, с		R _{сж} , МПа			K _p
	Г	ПЦ	П	ВМК	Известь		Начало	Конец	2 ч	7 сут	28 сут/(сух)	
2	69,5	10	20	0,5	–	0,42	8-00	9-00	7,2	8,5	11,8/19,2	0,71
3	68	10	20	0,5	1,5	0,42	8-30	9-30	6,9	8,7	12,3/19,6	0,73

Примечание. Г – смесь двух модификаций гипсовых вяжущих (Г-5 Б II 70% и ГВВС-16 – 30%); П – тонкодисперсный песок (кремнезем); удельная поверхность тонкодисперсного кремнезема – 500 м²/кг; расплыв смеси – 120 ± 5 мм.

1 до 5 мкм, имеющих пластинчатую форму и слоистую шероховатую поверхность с максимумом (90%) в области 22,9 мкм; 50% составляют частицы размером 7,14 мкм и 10% – частицы размером 1,12 мкм (рис. 1, b).

Тонкодисперсный отсев дробления известняка (известняковая пыль) имеет прерывистую гранулометрию частиц с наличием ярко выраженных пиков на интегральной кривой. 90% составляют фракции частиц размером 77,32 мкм, 50% – 18,27 мкм и 10% – 1,62 мкм. Форма частиц угловатая, поверхность шероховатая (рис. 1, c).

Зерновой состав КГВ характеризуется полидисперсной прерывистой гранулометрией частиц, обусловленной особенностями зерновых составов и разной размолоспособностью входящих в состав компонентов (рис. 2, a–c).

Особенностью гранулометрии КГВ с комплексом минеральных добавок (рис. 2, c) является наличие двух ярко выраженных пиков на интегральной кривой в области крупных и средних частиц: первый пик – с максимальным содержанием частиц в пределах 106 мкм, второй – в области частиц диаметром 11 мкм. Из всех частиц 90% составляет фракция размером 169 мкм, 50% – 29,28 мкм и 10% – 1,73 мкм. Это способствует образованию рациональной микроструктуры композита за счет более плотной упаковки частиц, повышению прочности и подтверждается результатами исследования физико-механических свойств.

С целью подтверждения эффективности использования предложенных минеральных компонентов были определены физико-механические показатели разработанных вяжущих. Были изготовлены образцы-кубы размером 3×3×3 см, которые испытывали в возрасте 2 ч, 7 и 28 сут. Состав и физико-механические свойства КГВ представлены в табл. 4.

Установлено, что введение в КГВ с минеральной добавкой тонкомолотого кварцевого песка метакаолина ВМК-45 (состав 2, табл. 4), позволяет повысить предел прочности при сжатии через 2 ч – на 9%; через 7 сут – на 11,8%; через 28 сут – на 32,5%, коэффициент размягчения – на 14,5% (с 0,62 до 0,71).

Дополнительное введение наполнителя (известняковой пыли) в КГВ (состав 3) практически не изменяет предела прочности при сжатии через 2 ч (повышает только на 4,5% по сравнению с составом 1),

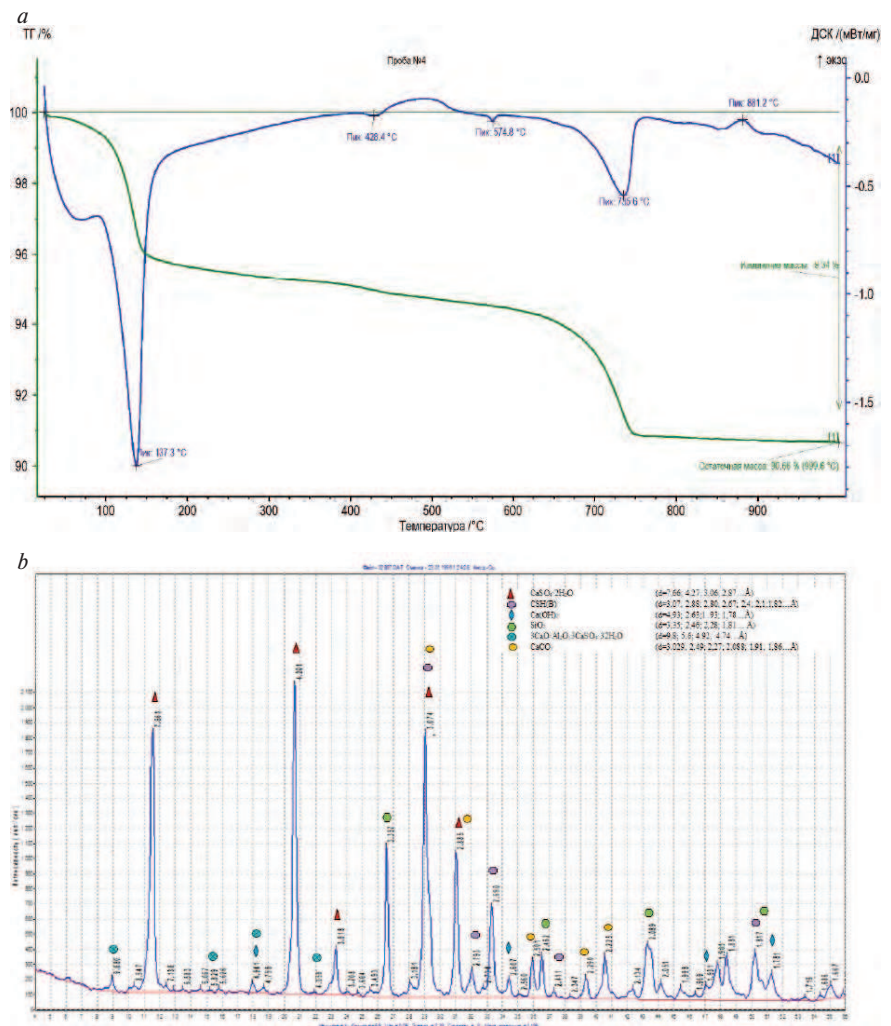


Рис. 4. ДТА (a) и РФА (b) затвердевшего КГВ с комплексом минеральных добавок
Fig. 4. DTA (a) and RFA (b) of solidified GGV with a complex of mineral additives

с увеличением данного показателя в 7-суточном возрасте на 14,5% (с 7,6 до 8,7 МПа) и в 28-суточном возрасте на 38,2% (с 8,9 до 12,3 МПа). При этом коэффициент размягчения (K_p) повышается с 0,62 до 0,73 – на 17,7%.

Для уточнения сложного механизма ранних стадий гидратации КГВ были проведены термокинетические исследования влияния входящих в его состав компонентов (табл. 5).

Известно, что изменения в характере протекания гидратации вяжущих связаны с проявлением термокинетического эффекта, который базируется на взаимодействии двух физических параметров – температуры и времени [3, 14].

Установлено, что сразу же после взаимодействия с водой у исследуемых минеральных добавок и вяжущих по-разному проявляется реакционная способность, обусловленная адсорбционными процессами, кристаллизацией гипса и химическими реакциями.

Были выявлены различия в максимальной скорости тепловыделения исследуемых добавок (по убыва-

**Таблица 5
Table 5**

**Значения термокинетических показателей
Values of thermokinetic parameters**

№	Компоненты КГВ	Начало реакции, с	Экзоэффект			Тепло-выделение макс. за 72 ч, Дж/г
			Момент достижения	Величина максимума, Дж/г·ч	Тепло-выделение, Дж/г	
1	Песок 500	38	2 ч 10 мин	0,15	0,63	0,91
2	Метакаолин ВМК-45	37	1 мин 21 с	7,04	0,09	1,99
3	Известняковая пыль	44	1 мин 09 с	17,18	0,11	3,15
4	Г-5 Б II	24	2 мин 25 с	47,3	1,42	98,29
			1 ч 14 мин	102,01	61,09	
5	ГВВС-16	33	1 ч 23 мин	98,42	62,69	95,61
6	Г-5 Б II+ГВВС-16	23	1 мин 33 с	34,08	0,51	90,74
			1 ч 10 мин 36 с	93,67	59,88	
7	ЦЕМ I 42,5 Н	65	5 мин 38 с	29,39	1,54	253,5
			2 ч 34 мин	0,71	11,63	
			15 ч 2 мин	7,81	59,7	
8	КГВ	33	37 мин 05 с	98,37	42,38	83,79
			57 ч 6 мин	0,05	83,59	
9	КГВ+ВМК45+ известняковая пыль	26	02 мин 31 с	24,48	0,76	83,23
			48 мин 23 с	93,48	38,34	

ления исследуемых добавок устанавливается в следующей последовательности (по убыванию): у метакаолина ВМК-45 – через 4 ч 45 мин (0,15 Дж/г·ч), у известняковой пыли – через 3 ч 40 мин (0,09 Дж/г·ч) и у тонкодисперсного кварцевого песка – через 2 ч (0,1 Дж/г·ч), что можно объяснить их различной реакционной активностью.

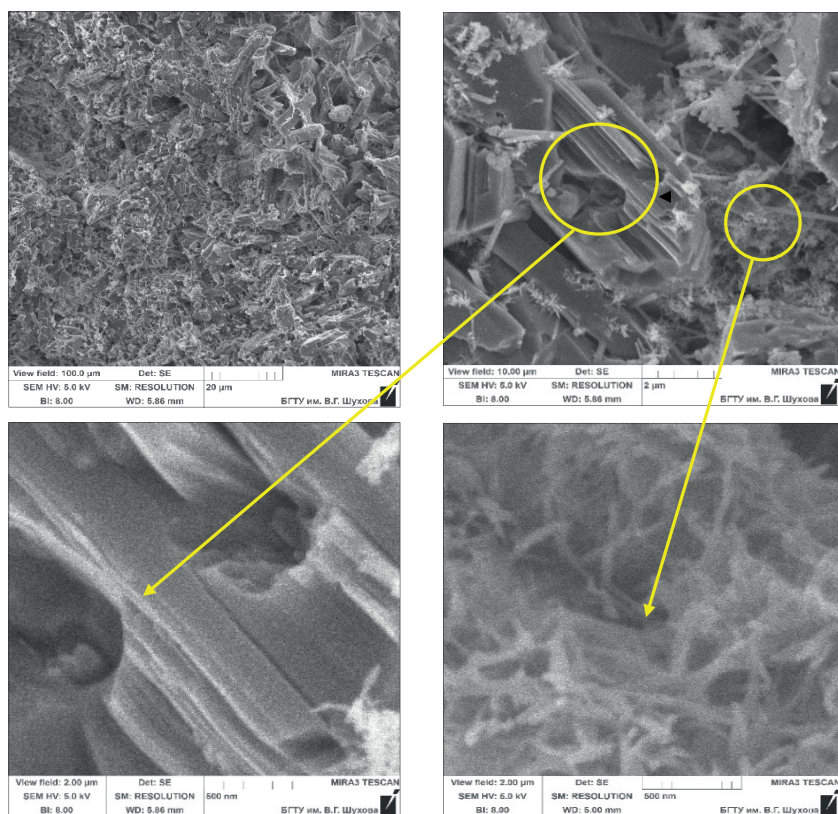
Максимальная скорость тепло-выделения смеси гипсовых вяжущих (70% – Г-5 Б II и 30% – ГВВС-16) наступает раньше, чем у Г-5 Б II и ГВВС-16, что отражает факт ее более высокой реакционной способности (рис. 3).

У КГВ с комплексом минеральных добавок, включающим тонкодисперсный кварцевый песок, метакаолин ВМК-45 и известняковую пыль (состав 9, табл. 5, рис. 3), после затворения водой (практически до 2 ч 50 мин) значение скорости экзоэффекта (93,48 Дж/г·ч) несколько ниже, чем у КГВ с минеральной добавкой тонкодисперсного кварцевого песка (98,37 Дж/г·ч) – (состав 8, табл. 5, рис. 3). Максимальные же значения тепловыделения за 72 ч у данных составов практически не отличаются и составляют 83,79 Дж/г для КГВ с тонкодисперсным кварцем и 83,23 Дж/г для КГВ с комплексом минеральных добавок, что согласуется с результатами физико-механических испытаний образцов (табл. 4).

Сопоставление полученных кривых тепловыделения с кривыми скорости гидратации КГВ показало их практически полное соответствие (рис. 3).

На дериватограмме (рис. 4, а) гидратированного в течение 28 сут КГВ с комплексом минеральных добавок (состав № 3, табл. 4) ДТА кривая содержит четыре эндотермических эффекта (при температуре 137,3, 428,4, 574,8 и 735,6°С) и один экзотермический эффект в области температуры 881,2°С.

Первый, самый глубокий эндотермический эффект с пиком при температуре 137,3°С связан с дегидратацией двухводного гипса до полуводного, а эндоэффект с максимумом при температуре 428,4°С связан с перестройкой кристаллической решетки при переходе растворимого ангидрита в нерастворимый.



**Рис. 5. Микроструктура затвердевшего КГВ (состав 3 согласно табл. 4)
Fig. 5. Microstructure of hardened CGV (compositions 3 according to Table 4)**

нию): известняковая пыль (17,18 Дж/г·ч) – метакаолин ВМК-45 (7,04 Дж/г·ч) – тонкодисперсный кварц (0,15 Дж/г·ч). Особенность приведенных термограмм заключается в том, что нулевой уровень тепловыде-

Эндоэффект при температуре 574,8°C связан с полиморфным превращением кварца а также, возможно, относится к дегидратации портландита.

Эндоэффект при температуре 735,6°C, вероятно, обусловлен диссоциацией доломита – $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$, а также переходом α - и β -растворимого ангидрита в нерастворимый.

Наличие экзоэффекта в области 881,2°C связано с разложением $\text{CSH}(\text{В})$ и нерастворимого ангидрита (на оксид кальция, сернистый газ и кислород), возможно взаимодействие CaO с активными минеральными добавками.

При помощи РФА (рис. 4, б) было установлено, что в качестве продуктов гидратации в пробе исследуемого образца КГВ (состав № 3, табл. 4) присутствует двуводный сульфат кальция ($d=7,66; 4,27; 3,06; 2,87\text{\AA}$). Рентгенограмма содержит также линии карбоната кальция ($d=3,029; 2,49; 2,27; 2,088; 1,91; 1,86\text{\AA}$).

Рефлексы гидросиликата кальция типа $\text{CSH}(\text{В})$ ($d=3,07; 2,88; 2,8; 2,67; 2,4; 2,1; 1,82\text{\AA}$) перекрывают сильные линии отражения дигидрата сульфата кальция. Наличие достаточно широких дифракционных максимумов ($d=2,8-3,1\text{\AA}$) может свидетельствовать о наличии новообразованной рентгеноаморфной фазы, соответствующей гелеобразным низкоосновным гидросиликатам кальция, которые относятся к плохо закристаллизованным минералам переменного состава и не создают четких дифракционных отражений.

На рентгенограмме выявлен $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ($d=4,93; 2,63; 1,93; 1,78\text{\AA}$) очень слабой интенсивности, а этрингит ($d=9,7; 5,6; 4,92; 4,74\text{\AA}$) на рентгенограмме практически отсутствует.

Кроме того, в составе гипсоцементного камня обнаружено присутствие минералов исходного компонента – кварца ($d=3,35; 2,46; 2,28; 1,81\text{\AA}$).

Анализ снимков микроструктуры затвердевшего КГВ показал, что комплекс минеральных добавок в составе вяжущего обеспечивает формирование гипсоцементного камня с достаточно плотной упаковкой кристаллов. На микрофотографиях видны новообразования, которые выкристаллизовываются в виде призматических кристаллов дигидрата (рис. 5), отдельных кристаллов разной морфологии и размеров, а также микро- и наноразмерных новообразований, которые, судя по характерной морфологии, можно отнести к С-S-H-гелю, в основном имеющему переменный состав и аморфную природу. Кольматация межкристаллических полостей и пор твердеющей гипсоцементной матрицы водостойкими новообразованиями защищает контакты срастания гипсовых кристаллов от растворения и обеспечивает повышение прочности, водостойкости, а также скорости набора прочности гипсоцементного камня.

Таким образом, проведенные исследования подтверждают активность используемых тонкодисперсных минеральных добавок и согласуются с показателями физико-механических характеристик КГВ на их основе. При твердении КГВ аморфная фаза SiO_2 в составе минеральных добавок способствует связыванию $\text{Ca}(\text{OH})_2$, выделяющегося при гидратации C_3S . Снижается основность твердеющей системы с формированием низкоосновных гидросиликатов кальция второй генерации и других новообразований, уплотняющих микроструктуру твердеющей матрицы и, как следствие, повышающих стабильность композиций.

Список литературы

1. Ферронская А.В. Гипс в малоэтажном строительстве. М.: АСВ, 2008. 240 с.
2. Кузнецова Т.В., Нефедьев А.П., Коссов Д.Ю. Кинетика гидратации и свойства цемента с добавкой метакаолина // *Строительные материалы*. 2015. № 7. С. 3–6.
3. Дребезгова М.Ю., Чернышева Н.В., Шаталова С.В. Композиционное гипсовое вяжущее с многокомпонентными минеральными добавками разного генезиса // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2017. № 10. С. 27–34.
4. Дребезгова М.Ю. К вопросу кинетики тепловыделения при гидратации гипсовых вяжущих (Ч. I) // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2017. № 3. С. 19–22.
5. Морозова Н.Н., Кузнецова Г.В., Майсурадзе Н.В., Ахтариев Р.Р., Абдрашитова Л.Р., Низамутдинова Э.Р. Исследование активности пуццоланового компонента и суперпластификатора для гипсоцементно-пуццоланового вяжущего белого цвета // *Строительные материалы*. 2018. № 8.

References

1. Ferronskaya A.V. Gips v maloetazhnom stroitel'stve [Gypsum in low-rise construction]. Moscow: ASV. 2008. 240 p.
2. Kuznetsova T.V., Nefediev A.P., Kossov D.Yu. Kinetics of hydration and properties of cement with the addition of metakaolin. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2015. No. 7, pp. 3–6. (In Russian).
3. Drebezgova M.Yu., Chernysheva 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).
4. Drebezgova M.Yu. On the issue of heat release kinetics during hydration of gypsum binders (Part I). *Vestnik BSTU named after V.G. Shukhov*. 2017. No. 3, pp. 19–22. (In Russian).
5. Morozova N.N., Kuznetsova G.V., Maysuradze N.V., Akhtariev R.R., Abdrashitova L.R., Nizamutdinova E.R. Research in the activity of a pozzolanic component and superplasticizer for gypsum cement poz-

- С. 26–30. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2018-762-8-26-30>
6. Бурьянов А.Ф., Фишер Х.-Б., Гальцева Н.А., Махортов Д.Н., Хасаншин Р.Р. Исследование влияния различных активизирующих добавок на свойства ангидритового вяжущего // *Строительные материалы*. 2020. № 7. С. 4–9. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-782-7-4-9>
 7. Гаркави М.С., Артамонов А.В., Колодежная Е.В., Нefeldев А.П., Худовекова Е.А. Гипсовое вяжущее низкой водопотребности: производство и свойства // *Строительные материалы*. 2020. № 7. С. 34–38. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-782-7-34-38>
 8. Рузина Н.С., Яковлев Г.И., Гордина А.Ф., Первущин Г.Н., Семёнова Ю.А., Бегунова Е.В. Модификация вяжущих на основе сульфата кальция комплексными добавками // *Строительные материалы*. 2020. № 7. С. 18–22. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-782-7-18-22>
 9. Петропавловская В.Б., Завадько М.Ю., Новиченкова Т.Б., Петропавловский К.С., Бурьянов А.Ф. Гипсовые модифицированные композиции с использованием активированного базальтового наполнителя // *Строительные материалы*. 2020. № 7. С. 10–17. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-782-7-10-17>
 10. Халиулин М.И., Гильманшина А.И. Влияние вида и механоактивации минеральных наполнителей на свойства композиционных гипсовых вяжущих. В сборнике: *X Международная научно-практическая конференция «Повышение эффективности производства и применения гипсовых материалов и изделий»*. Материалы конференции. Воронеж, 2021. С. 142–149.
 11. Батова М.Д., Семёнова Ю.А., Гордина А.Ф., Яковлев Г.И., Бурьянов А.Ф., Стивенс А.Э., Бегунова Е.В. Структура и свойства гипсовых композиций с минеральными дисперсными добавками // *Строительные материалы*. 2021. № 10. С. 49–53. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-796-10-49-53>
 12. Бурьянов А.Ф., Фишер Х.-Б., Коровяков В.Ф., Гальцева Н.А., Будыжова 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>
 13. 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>
 14. Usherov-Marshak A.V., Sinyakin A.G. The thermokinetic factor in cement hardening. *Cement*. 1997, pp. 19–21.
 - zolanitic binder of white colour (GCPB). *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2018. No. 8, pp. 26–30. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2018-762-8-26-30>
 6. Buryanov A.F., Fisher H.-B., Gal'tseva N.A., Machortov D.N., Hasanshin R.R. Research in the influence of various activating additives on the properties of anhydrite binder. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2020. No. 7, pp. 4–9. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-782-7-4-9>
 7. Garkavi M.S., Artamonov A.V., Kolodezhnaya E.V., Nefedev A.P., Khudovekova E.A. Gypsum binder of low water demand: production and properties. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2020. No. 7, pp. 34–38. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-782-7-34-38>
 8. Ruzina N.S., Yakovlev G.I., Gordina A.F., Pervushin G.N., Semenova Yu.A., Begunova E.V. Modification of binders based on calcium sulfate with complex additives. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2020. No. 7, pp. 18–22. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-782-7-18-22>
 9. Petropavlovskaya V.B., Zavad'ko M.Yu., Novichenkova T.B., Petropavlovskii K.S., Buryanov A.F. Gypsum modified compositions with the use of activated basalt filler. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2020. No. 7, pp. 10–17. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-782-7-10-17>
 10. Khaliulin M.I., Gilmannshina A.I. Influence of the type and mechanical activation of mineral fillers on the properties of composite gypsum binders. In the collection: *X International Scientific and Practical Conference "Improving the efficiency of production and use of gypsum materials and products."* Conference materials. Voronezh. 2021, pp. 142–149. (In Russian).
 11. Batova M.D., Semenova Yu.A., Gordina A.F., Yakovlev G.I., Buryanov A.F., Stevens A.E., Begunova E.V. Structure and properties of gypsum compositions with mineral dispersed additives. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2021. No. 10, pp. 49–53. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-796-10-49-53>
 12. Buryanov A.F., Fisher H.-B., Korovyakov V.F., Gal'tseva N.A., Buldyzhova 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>
 13. 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>
 14. Usherov-Marshak A.V., Sinyakin A.G. The thermokinetic factor in cement hardening. *Cement*. 1997, pp. 19–21.

УДК 666.914

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-813-5-89-94>

Н.И. АЛФИМОВА¹, канд. техн. наук, доцент (alfimovan@mail.ru),
С.Ю. ПИРИЕВА¹, ассистент (p-sevda@mail.ru);
К.М. ЛЕВИЦКАЯ^{1,2}, аспирант (levickayalevickaya@gmail.com)

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

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

Повышение качественных характеристик прессованных изделий из цитрогипса и вяжущего на его основе

Гипсосодержащие отходы являются хорошей альтернативой природному гипсовому камню. Однако создание качественных вяжущих и материалов на их основе возможно только при применении нетрадиционных методов и подходов, которые позволяют нивелировать негативное влияние особенностей гипсосодержащих отходов на свойства конечного продукта. К одним из таких технологических приемов относится изготовление изделий с использованием принципов полусухого прессования. При высоком содержании в составе прессуемой формовочной массы вяжущей составляющей на поверхности изделий могут образовываться значительные дефекты в виде отслоений и клинов, что отрицательно сказывается не только на эстетических, но и на физико-механических характеристиках изделий. Появление таких дефектов связано с высокой адгезией вяжущей составляющей к металлической поверхности формы, а также с пристенным трением частиц при перемещении в процессе прессования и выпрессовки. Целью данного исследования было рассмотрение возможности повышения качественных характеристик (внешний вид, средняя плотность, прочность при сжатии) изделий, изготавливаемых путем прессования полусухой формовочной смеси. В качестве объекта исследований выступал гипсосодержащий отход биохимического синтеза лимонной кислоты – цитрогипс и вяжущее на его основе. Установлено, что при прочих равных параметрах изготовления введение в состав формовочной массы добавки пенообразователя и замена материала формирующей поверхности на пластик способствуют устранению дефектов на поверхности образцов, при этом прирост средней плотности составляет 10%, прочности при сжатии – 60,6%.

Ключевые слова: гипсосодержащие отходы, цитрогипс, полусухое прессование, дефекты поверхности, экологическая безопасность, утилизация отходов производства, вторичное сырье.

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

Для цитирования: Алфимова Н.И., Пириева С.Ю., Левицкая К.М. Повышение качественных характеристик прессованных изделий из цитрогипса и вяжущего на его основе // *Строительные материалы*. 2023. № 5. С. 89–94.
DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-813-5-89-94>

N.I. ALFIMOVA¹, Candidate of Sciences (Engineering) (alfimovan@mail.ru), S.Yu. PIRIEVA¹, Assistant (p-sevda@mail.ru);
K.M. LEVICKAYA^{1,2}, Postgraduate (levickayalevickaya@gmail.com)

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

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

Improvement in Qualitative Characteristics of Pressed Products from Citrogyypsum and Based Binder

Gypsum by-products are a good alternative to natural gypsum stone. However, the production of high-quality binders and materials based on them is possible only with the use of non-traditional methods and approaches that avoid the negative impact of the characteristics of gypsum-containing waste on the properties of the final product. One of these technological methods is the manufacture of products using the principles of the semi-dry pressing method. However, due to the high content of the binder component in the pressed raw mix, significant defects in the form of delaminations and wedges can occur on the surface of the products, which negatively affects not only the aesthetic but also the physical and mechanical characteristics of the products. The appearance of such defects is associated with the high adhesion of the binder to the metal surface of the mold, as well as with the near-wall friction of the particles during pressing and extrusion. In this connection, the purpose of this study was to consider the possibility of improving the quality characteristics (appearance, average density, compressive strength) of products manufactured by pressing a semi-dry raw mix. The object of research was a gypsum-containing waste from the biochemical synthesis of citric acid – citrogypsum and a binder based on it. It has been established that other things being equal, the manufacturing parameters, the introduction of a foaming agent additive in the raw mix, and the replacement of the forming surface material with plastic help to eliminate defects on the surface of the samples, as well as to ensure an increase in average density by 10%, and compressive strength by 60.6%.

Keywords: gypsum-containing by-products, citrogypsum, semi-dry pressing method, surface defects.

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

For citation: Alfimova N.I., Piriieva S.Yu., Levickaya K.M. Improvement in qualitative characteristics of pressed products from citrogypsum and based binder. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2023. No. 5, pp. 89–94. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-813-5-89-94>

Эффективность гипсовых вяжущих и изделий на их основе доказана на практике по всему миру. В первую очередь это обусловлено тем, что их изготовление по сравнению с цементными отличается экологичностью, меньшей металлоемкостью и энергоемкостью. В частности, затраты тепловой энергии на производство одной тонны гипса в 4–5 раз ниже по сравнению с портландцементом и не сопровождаются выбросами пыли и CO_2 в атмосферу [1–3]. Однако не во всех регионах присутствует природная сырьевая база для производства гипсовых вяжущих.

Альтернативой природному гипсовому камню могут выступать гипсосодержащие отходы (ГСО) различных промышленных предприятий, такие как: фосфогипс, борогипс, цитрогипс (ЦГ) и др. [4–6]. Ввиду того, что ГСО отличаются определенной спецификой (высокая удельная поверхность и влажность, непостоянство гранулометрического, химического и минерального составов, наличие примесей и др.), получение качественных вяжущих и изделий на их основе требует применения специальных подходов (использование различных модификаторов, технологических приемов, специальных режимов, оборудования и т. д.) [7, 8]. К одному из таких технологических приемов относится прессование.

Многочисленные исследования доказали возможность получения изделий с высокими физико-механическими характеристиками путем прессования при давлении 10–30 МПа дигидрата сульфата кальция или его смеси с полугидратом сульфата кальция, при этом в качестве объектов исследования рассматривалось как природное гипсосодержащее сырье и вяжущее на его основе, так и отходы производства (фосфогипс, отходы керамических производств, цитрогипс) [9–14].

Также была установлена возможность получения изделий с достаточно высокими прочностными характеристиками (до 30 МПа) путем прессования при более низких давлениях – 3–7 МПа. В качестве дигидрата сульфата кальция использовался цитрогипс фракции менее 112 мкм (фракционированный цитрогипс, или ФЦГ), в качестве полугидрата сульфата кальция – вяжущее, полученное путем нагрева ЦГ (цитрогипсовое вяжущее, или ЦГВ) при температуре 175°C. Содержание цитрогипсового вяжущего в смеси варьировалось от 50 до 90%. Однако в ходе данного исследования было установлено, что, несмотря на высокие физико-механические характеристики, часть образцов отличалась высокой дефектностью поверхности в виде отслоений и клинов. Максимально низким качеством поверхности отличался образец, изготовленный при давлении прессования 3 МПа из сырьевой смеси, состоящей из 10% ФЦГ и 90% ЦГВ при водотвердом отношении 0,15 [15].

Комплексный анализ представленных в данном исследовании результатов показал, что основной причиной появления дефектов на поверхности образцов является высокая адгезия вяжущего к поверхности металлической формы, а также наличие при-

стенного межчастичного трения, которое возникает в процессе прессования и выпрессовки [15].

Также в ходе дополнительного литературного анализа было установлено, что при изготовлении изделий методом прессования пристенное межчастичное трение может негативно отражаться не только на качестве поверхности, но и на физико-механических характеристиках конечных изделий. Это обусловлено тем, что частицы формовочной массы во время прессования перемещаются, создавая боковое давление на стенки формы, при этом трение и заклинивание частиц затрудняют их перемещение, в результате чего происходит неравномерность распределения средней плотности по объему (как по высоте, так и от центра к периферии), что, в свою очередь, может отрицательно сказываться на пределе прочности при сжатии изделия.

Снизить отрицательное воздействие пристенного трения на качественные характеристики изделий можно путем сведения его к минимуму за счет применения различных приемов, способствующих нарушению стехиометрии сырья (использование различных смазок, химических добавок и пр.) [16].

Целью данного исследования было рассмотрение возможности повышения качественных характеристик (внешний вид, средняя плотность, предел прочности при сжатии) изделий, изготавливаемых путем прессования полусухой формовочной смеси, состоящей из фракционированного цитрогипса и цитрогипсового вяжущего, за счет применения различных химических и технологических приемов.

Объекты и методы исследований

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

Синтез вяжущего из цитрогипса осуществлялся в следующей последовательности: из предварительно высушенного в естественных условиях лаборатории цитрогипса исключались крупные каменистые включения, после чего он засыпался на противень (общая масса навески 2 кг) и помещался в сушильный шкаф. Заданная температура сушильного шкафа составляла 175°C. Нагрев осуществлялся до достижения цитрогипсом температуры, максимально приближенной к температуре сушильного шкафа (160–165°C); при данной температуре вяжущее выдерживалось в сушильном шкафу 1 ч, после чего охлаждалось и выдерживалось в естественных условиях в течение 2 сут до стабилизации массы. Контроль температуры цитрогипса осуществлялся с помощью термопар.

Фракционированный цитрогипс получали путем просеивания исходного ЦГ через сито с размером 112 мкм.

Процесс изготовления образцов состоял из следующих переделов:

1. Приготовление сырьевой смеси путем смешивания фракционированного цитрогипса (10%) и цитрогипсового вяжущего (90%) до однородной массы.

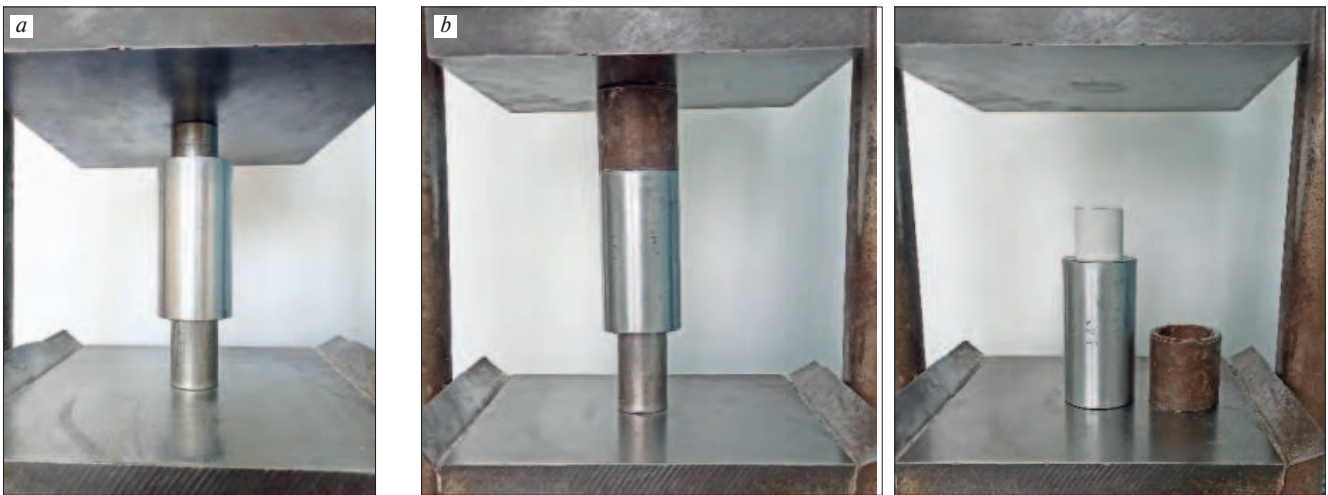


Рис. 1. Процесс изготовления образцов методом прессования: *a* – формование изделий путем прессования на гидравлическом прессе в металлической форме с цилиндрической поверхностью; *b* – выпрессовка образцов

Fig. 1. Sample making by pressing method: *a* – molding products in a metal mold by pressing using a hydraulic press; *b* – extrusion of samples

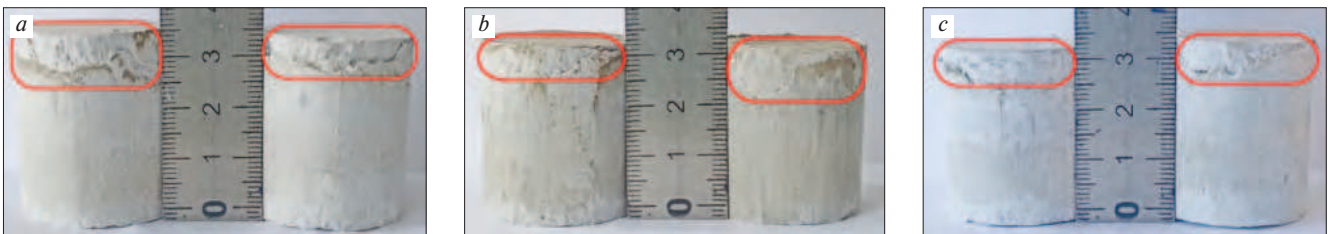


Рис. 2. Внешний вид образцов в зависимости от содержания в составе сырьевой смеси пенообразователя: *a* – 0%; *b* – 0,095%; *c* – 0,19%

Fig. 2. Appearance of the samples depending on the foaming agent content in the raw mix: *a* – 0%; *b* – 0,095%; *c* – 0,19%

Таблица 1
Table 1

Физико-механические характеристики образцов в зависимости от содержания пенообразователя
Physical and mechanical properties of the samples depending on the foaming agent content

№ состава	Содержание пенообразователя, % от массы сырьевой смеси	Средняя плотность, кг/м ³	Предел прочности при сжатии, МПа
1	0	1594	14,18
2	0,19	1736	20,08
3	0,095	1720	21,3

Таблица 2
Table 2

Физико-механические характеристики образцов, изготовленных с использованием формы с пластиковой формирующей поверхностью, в зависимости от содержания пенообразователя
Physical and mechanical properties of samples made using a plastic forming surface depending on the foaming agent content

№ состава	Содержание пенообразователя, % от массы сырьевой смеси	Средняя плотность, кг/м ³	Предел прочности при сжатии, МПа
1	0	1649	20,4
2	0,095	1753	22,78

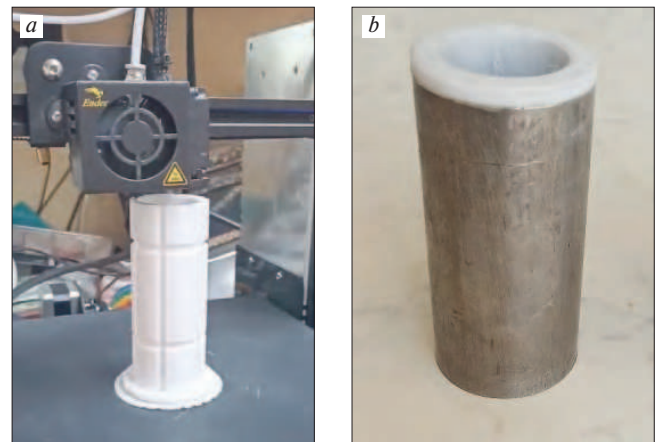


Рис. 3. Печать пластикового сердечника на 3D-принтере (*a*); форма с пластиковым сердечником (*b*)

Fig. 3. The process of printing a plastic core on a 3D printer (*a*); mold with plastic core (*b*)

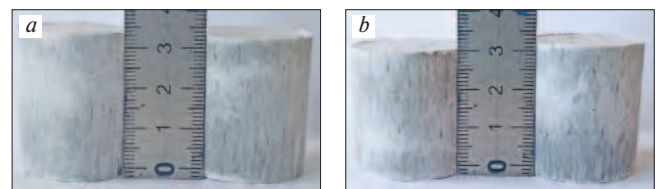


Рис. 4. Внешний вид образцов, изготовленных в форме с пластиковой формирующей поверхностью, в зависимости от количества пенообразователя в смеси: *a* – 0%; *b* – 0,095%

Fig. 4. The appearance of samples made in a mold with a plastic forming surface, depending on the foaming agent content in the raw mix: *a* – 0%; *b* – 0,095%

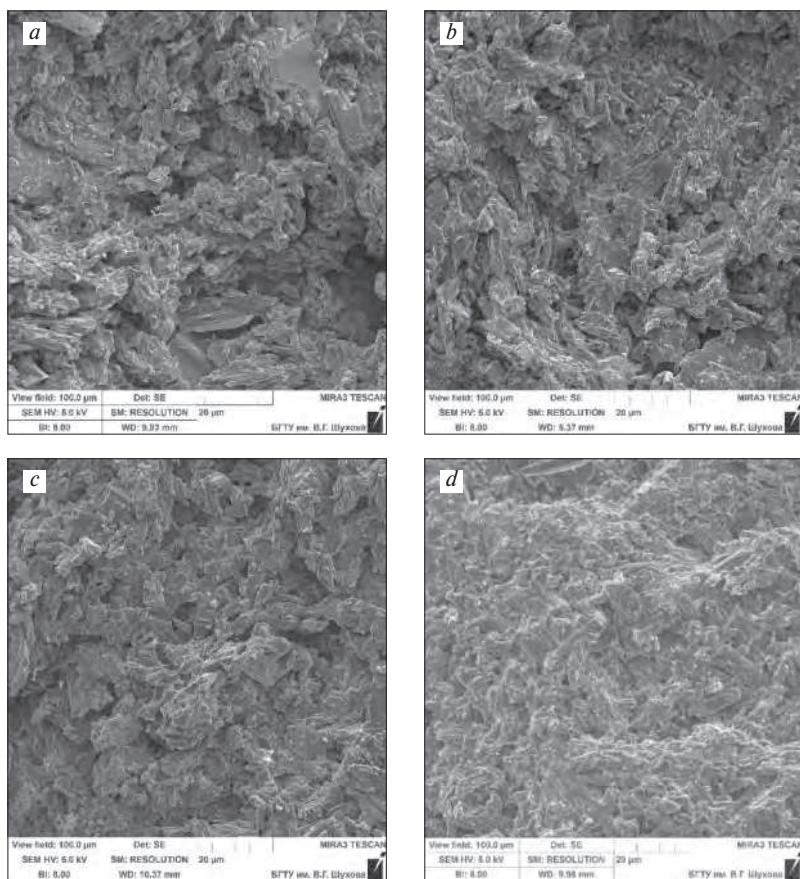


Рис. 5. Микроструктура образцов в зависимости от материала формирующей поверхности и содержания пенообразователя в смеси, %: *a* – металл, 0% пенообразователя; *b* – металл, 0,19% пенообразователя; *c* – пластик, 0% пенообразователя; *d* – пластик, 0,095% пенообразователя

Fig. 5. The dependence of the microstructure of the samples on the material of the forming surface and the foaming agent content in the raw mix: *a* – metal, 0% of foaming agent; *b* – metal, 0,19% of foaming agent; *c* – plastic, 0% of foaming agent; *d* – plastic, 0,095% of foaming agent

2. Получение формовочной массы путем введения сырьевой смеси в воду и последующего тщательного перемешивания. Вода бралась в количестве 15% от массы смеси.

3. Формование изделий путем прессования в металлической пресс-форме с цилиндрической поверхностью (рис. 1, *a*) при давлении прессования 3 МПа с помощью лабораторного гидравлического пресса с усилием прессования 10 т; выдерживание образца при заданном давлении осуществлялось в течение 30 с, после чего давление снималось и образец выдавливался из формы в ручном режиме (рис. 1, *b*). На выходе получались образцы-цилиндры с диаметром 31 мм и высотой 30–40 мм.

После изготовления образцы хранились в естественных условиях лаборатории (влажность воздуха 14–18%, температура $20 \pm 2^\circ\text{C}$) в течение 2 сут до достижения ими равновесной влажности, затем определялась их средняя плотность и предел прочности при сжатии. Для оценки внешнего вида из серии образцов отбирались два – с наилучшим и наихудшим качеством поверхности.

Также в исследованиях использовался синтетический пенообразователь «Пеностром».

Испытание образцов на прочность осуществлялось с помощью лабораторного пресса с усилием 10 т.

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

Результаты и обсуждения

На первом этапе с целью рассмотрения возможности снижения негативного воздействия пристенного трения при формовании путем прессования изделий из сырьевой смеси, состоящей из ФЦГ и ЦГВ, было принято решение ввести в состав формовочной массы добавку ПАВ.

Выбор вида добавки был обусловлен анализом результатов ранее проведенных исследований, в которых установлено, что ПАВ снижают силы поверхностного натяжения воды, создают эффект смазки между частицами (шарикообразный эффект), облегчая их перемещение друг относительно друга, что повышает формуемость и, как следствие, положительно сказывается на физико-механических характеристиках изделий [17–20]. Также в работе [21] было отмечено, что при введении ПАВ наблюдалось снижение адгезии свежетоформованного бетона к формирующему устройству.

Авторы объясняют это тем, что поверхностно-активные вещества, в силу своих свойств, концентрируются у формирующей поверхности, которая контактирует с бетоном через водную прослойку. При этом ПАВ обеспечивает снижение силы адгезии тонких пленок к поверхности форм, это способствует частичному или полному исключению налипания цементного раствора и облегчает его отрыв с формирующей поверхности, что, в свою очередь, положительно отражается не только на всем процессе формования, но и на качестве поверхности конечных изделий.

В качестве ПАВ была выбрана добавка «Пеностром», выбор производителя добавки был обусловлен соотношением «цена–качество» и наличием опыта ее использования [22]. Предварительные исследования влияния пенообразователя «Пеностром» на процессы изготовления изделий методом прессования осуществлялись на составе, который отличался максимальной дефектностью поверхности [15]. Добавка, предварительно разведенная в воде для затворения, вводилась в состав формовочной массы в количестве 0,095 и 0,19% от сырьевой смеси. Физико-механические характеристики и внешний вид полученных образцов представлены в табл. 1 и на рис. 2.

Анализ полученных результатов показал, что введение в состав формовочной массы пенообразовате-

ля способствовало улучшению физико-механических характеристик образцов. Так, при введении в состав сырьевой смеси 0,095% пенообразователя средняя плотность образцов увеличилась на 8,9%, предел прочности при сжатии – на 41,6% (табл. 1, состав 2), а при введении 0,19% пенообразователя прирост составил 7,9 и 50,2% для средней плотности и предела прочности при сжатии соответственно (табл. 1, состав 3).

Повышение средней плотности и предела прочности при сжатии образцов свидетельствует о том, что использование добавки пенообразователя, при прочих равных условиях, способствует снижению пристенного трения смеси о форму, обеспечивая ее лучшее уплотнение. Однако анализ внешнего вида образцов показал, что полностью избавиться от дефектов на поверхности даже при двойной дозировке пенообразователя (0,19%) (рис. 2, *c*), не удалось.

Так как основным препятствием на пути улучшения внешнего вида образцов является высокая адгезия цитрогипсового вяжущего к поверхности металлической формы, на втором этапе исследований было принято решение о замене материала формующей поверхности. Для этих целей на 3D-принтере был напечатан пластиковый цилиндрический сердечник (рис. 3, *a*), в качестве материала для печати использовался полиэтилентерефталат гликоль-модифицированный (PETG). Сердечник был закреплен в металлическом корпусе (рис. 3, *b*).

Исследование влияния материала формы на качество поверхности образцов проводилось с использованием тех же рецептурно-технологических параметров. Физико-механические характеристики и внешний вид полученных образцов представлены в табл. 2 и на рис. 4 соответственно.

Анализ полученных результатов показал, что замена материала формующей поверхности способствовала устранению дефектов, а также улучшению физико-механических характеристик образцов (табл. 2): предел прочности при сжатии увеличился на 43,8%, средняя плотность – на 3,5% (табл. 2, состав 1) по отношению к значениям образцов, изготовленных с использованием металлической формы без пенообразователя (табл. 1, состав 1). Введение в состав формовочной смеси пенообразователя (0,095% от массы формовочной смеси) в данном случае способствовало дополнительному повышению физико-механических характеристик изделий (табл. 2, состав 2), а именно предел прочности при сжатии увеличился на 60,6% при росте средней плотности на 10% по отношению к значениям образца, изготовленного с использованием металлической формы без пенообразователя (табл. 1, состав 1).

Анализ микроструктуры образцов полностью коррелируется с данными, полученными при исследовании влияния материала формы и содержания в смеси пенообразователя на физико-механические показатели изделий. Наибольшая однородность и плотность структуры с наименьшим количеством пор характер-

на для образцов с содержанием в смеси 0,095% добавки пенообразователя, изготовленного с использованием формы с пластиковой формующей поверхностью. Также необходимо отметить, что микроструктура образцов, изготовленных с использованием формы с пластиковым сердечником, значительно плотнее и однороднее структуры образцов, изготовленных с использованием металлической формы как без введения в сырьевую смесь пенообразователя (рис. 5, *a*), так и с пенообразователем (рис. 5, *b*).

Вывод

На основе представленных результатов исследования можно сделать вывод, что использование форм с пластиковой формующей поверхностью, в совокупности с добавкой пенообразователя способствует снижению величины пристенного трения и оптимизации процесса уплотнения при прессовании сырьевой смеси, состоящей из цитрогипсового вяжущего и фракционированного цитрогипса. При прочих равных параметрах это позволяет получать изделия с более высоким качеством поверхности и физико-механическими характеристиками (предел прочности при сжатии увеличивается на 60,6%, средняя плотность – на 10%) по отношению к изделиям, изготовленным в металлической форме без пенообразователя.

Список литературы / References

1. Гипсовые материалы и изделия (производство и применение): Справочник / Под общ. ред. А.В. Ферронской. М.: АСВ, 2004. 488 с.
1. Gipsovye materialy i izdeliya (proizvodstvo i primeneniye) Spravochnik. Pod obshhey redakciyey A.V. Ferronskoy [Gypsum materials and products (production and use)]. Moscow: ASV, 2004. 488 p. (In Russian).
2. Kamarou M., Korob N., Kwapinski W., Romanovski V. High-quality gypsum binders based on synthetic calcium sulfate dihydrate produced from industrial waste. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. 2021. Vol. 100, pp. 324–332. DOI: 10.1016/j.jiec.2021.05.006
3. Lushnikova N., Dvorkin L. 25 – Sustainability of gypsum products as a construction material. *Sustainability of Construction Materials (Second Edition)*. 2016, pp. 643–681. DOI: 10.1016/B978-0-08-100370-1.00025-1
4. Wan Y., Hui X., He X., Li J., Xue J., Feng D., Liu X., Wang S. Performance of green binder developed from flue gas desulfurization gypsum incorporating Portland cement and large-volume fly ash. *Construction and Building Materials*. 2022. Vol. 348. 128679. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.128679
5. Calderón-Morales B.R.S., García-Martínez A., Pineda P., García-Tenório R. Valorization of phosphogypsum in cement-based materials: Limits and potential in eco-efficient construction. *Journal of Building Engineering*. 2021. Vol. 44. 102506. DOI: 10.1016/j.job.2021.102506

6. Pirieva S.Yu., Alfimova N.I., Levickaya K.M. Citrogypsum as a raw material for gypsum binder production. *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2022. No. 2 (100). 10007. DOI: 10.4123/CUBS.100.7
7. Алфимова Н.И., Пириева С.Ю., Елистраткин М.Ю., Кожухова Н.И., Титенко А.А. Обзорный анализ способов получения вяжущих из гипсосодержащих отходов промышленных производств // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2020. № 11. С. 8–23. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-11-8-23
7. Alfimova N.I., Pirieva S.Yu., Elistratkin M.Yu., Kozhuhova N.I., Titenko A.A. Production methods of binders containing gypsum-bearing wastes: a review. *Vestnik of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2020. No. 11, pp. 8–23. (In Russian) DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-11-8-23
8. Rashad A.M. Phosphogypsum as a construction material. *Journal of Cleaner Production*. 2017. Vol. 166, pp. 732–743. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.08.049
9. Petropavlovskii K., Novichenkova T., Petropavlovskaya V., Sulman M., Fediuk R., Amran M. Faience waste for the production of wall. *Materials*. 2021. Vol. 14 (21). 6677. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma14216677>
10. Zhou J., Li X., Zhao Y., Shu Z. Preparation of paper-free and fiber-free plasterboard with high strength using phosphogypsum. *Construction and Building Materials*. 2020. Vol. 243. 118091. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118091
11. Петропавловская В.Б., Бурьянов А.Ф., Петропавловский К.С., Новиченкова Т.Б. Высокопрочные гипсовые материалы // *Химия, физика и механика материалов*. 2019. № 1 (20). С. 3–13.
11. Petropavlovskaya V.B., Buryanov A.F., Petropavlovskii K.S., Novichenkova T.B. High strength gypsum materials. *Khimiya, fizika i mexanika materialov*. 2019. No. 1 (20), pp. 3–13. (In Russian).
12. Петропавловская В.Б., Образцов И.В., Коровицын Д.А., Петропавловский К.С. Программный комплекс для проектирования составов безобжиговых мономинеральных композитов // *Программные продукты и системы*. 2018. № 1. С. 199–203. DOI: 10.15827/0236-235X.031.1.199-203
12. Petropavlovskaya V.B., Obrazczov I.V., Korovicyn D.A., Petropavlovskij K.S. A software complex for designing unburned monomineral composites. *Programmnye produkty i sistemy*. 2018. Vol. 31. No. 1, pp. 199–203. (In Russian). DOI: 10.15827/0236-235X.031.1.199-203
13. Мирсаев Р.Н., Ахмадулина И.И., Бабков В.В., Недосеко И.В., Гайтова А.Р., Кузьмин В.В. Гипсошлаковые композиции из отходов промышленности в строительных технологиях // *Строительные материалы*. 2010. № 7. С. 4–6.
13. Mirsaev R.N., Axmadulina I.I., Babkov V.V., Nedoseko I.V., Gaitova A.R., Kuzmin V.V. Gypsum-slag compositions from industrial waste in construction technologies. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2010. No. 7, pp. 4–6. (In Russian).
14. Халиков Р.М., Синицина Е.А., Силантьева Е.И., Пудовкин А.Н., Недосеко И.В. Модифицирующее усиление твердения пресованных строительных гипсовых нанокompозитов // *Нанотехнологии в строительстве: научный интернет-журнал*. 2019. Т. 1. № 5. С. 549–560. DOI: 10.15828/2075-8545-2019-11-5-549-560
14. Khalikov R.M., Sinitsina E.A., Silant'yeva E.I., Pudovkin A.N., Nedoseko I.V. Modifying intensification of the hardening of extruded construction gypsum nanocomposites. *Nanotekhnologii v stroitel'stve*. 2019. Vol. 11. No. 5, pp. 549–560. (In Russian). DOI: 10.15828/2075-8545-2019-11-5-549-560
15. Алфимова Н., Пириева С., Левиккая К., Кожухова Н., Елистраткин М. Производство гипсовых материалов с переработанным цитрогипсом с использованием полусухого прессования. *Recycling*. 2023. Vol. 8 (2). 34. DOI: 10.3390/recycling8020034
15. Alfimova N., Pirieva S., Levickaya K., Kozhukhova N., Elistratkin M. The production of gypsum materials with recycled citrogypsum using semi-dry pressing technology. *Recycling*. 2023. Vol. 8 (2). 34. DOI: 10.3390/recycling8020034
16. Хасанов О.Л., Двилис Э.С., Качаев А.А. Метод коллекторного компактирования нано- и полидисперсных порошков: учебное пособие. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2008. 102 с.
16. Khasanov O.L., Dvilis E.S., Kachaev A.A. Metod kolektornogo kompaktirovaniya nano- i polidispersnykh poroshkov: uchebnoe posobie [The method of collector compaction of nano- and polydisperse powders]. Tomsk: Publishing House of Tomsk Polytechnic University. 2008. 102 p.
17. Tunstall L.E., Ley M.T., Scherer G.W. Air entraining admixtures: Mechanisms, evaluations, and interactions. *Cement and Concrete Research*. 2021. Vol. 150. 106557. DOI: 10.1016/j.cemconres.2021.106557
17. Tunstall L.E., Ley M.T., Scherer G.W. Air entraining admixtures: Mechanisms, evaluations, and interactions. *Cement and Concrete Research*. 2021. Vol. 150. 106557. DOI: 10.1016/j.cemconres.2021.106557
18. Aïtcin P.-C. Entrained air in concrete: Rheology and freezing resistance. Editor(s): Pierre-Claude Aïtcin, Robert J Flatt. *Science and Technology of Concrete Admixtures*. Woodhead Publishing, 2016, pp. 87–95.
18. Aïtcin P.-C. Entrained air in concrete: Rheology and freezing resistance. Editor(s): Pierre-Claude Aïtcin, Robert J Flatt. *Science and Technology of Concrete Admixtures*. Woodhead Publishing, 2016, pp. 87–95.
19. Shah H.A., Yuan Q., Zuo S. Air entrainment in fresh concrete and its effects on hardened concrete—a review. *Construction and Building Materials*. 2021. Vol. 274. 121835. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121835
19. Shah H.A., Yuan Q., Zuo S. Air entrainment in fresh concrete and its effects on hardened concrete—a review. *Construction and Building Materials*. 2021. Vol. 274. 121835. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121835
20. Hewlett P.C., Justnes H., Edmeades R.M. Cement and concrete admixtures. *Butterworth-Heinemann*. 2019, pp. 641–698. DOI: 10.1016/B978-0-08-100773-0.00014-9
20. Hewlett P.C., Justnes H., Edmeades R.M. Cement and concrete admixtures. *Butterworth-Heinemann*. 2019, pp. 641–698. DOI: 10.1016/B978-0-08-100773-0.00014-9
21. Батыновский Э.И., Бондарович А.И. Вибропресованный бетон: технология и свойства. Минск: БНТУ, 2018. 263 с.
21. Batorynovskiy E.I., Bondarovich A.I. Vibropressovanniy beton: tekhnologiya i svoystva [Vibropressed concrete: technology and properties]. Minsk: BNTU. 2018. 263 p.
21. Батыновский Э.И., Бондарович А.И. Вибропресованный бетон: технология и свойства [Vibropressed concrete: technology and properties]. Минск: БНТУ. 2018. 263 с.
21. Batorynovskiy E.I., Bondarovich A.I. Vibropressovanniy beton: tekhnologiya i svoystva [Vibropressed concrete: technology and properties]. Minsk: BNTU. 2018. 263 p.
22. Шаталова С.В., Чернышева Н.В., Лесовик В.С., Елистраткин М.Ю., Шермет А.А. Разработка комплексного решения для 3D-печати стеновых конструкций // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2022. № 10. С. 8–19. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-10-8-19
22. Shatalova S.V., Chernysheva N.V., Lesovik V.S., Elistratkin M.Yu., Sheremet A.A. Development of a comprehensive solution for 3D printing of wall structures. *Vestnik of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2022. No. 10, pp. 8–19. (In Russian). DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-10-8-19
22. Shatalova S.V., Chernysheva N.V., Lesovik V.S., Elistratkin M.Yu., Sheremet A.A. Development of a comprehensive solution for 3D printing of wall structures. *Vestnik of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2022. No. 10, pp. 8–19. (In Russian). DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-10-8-19

Where Innovations Thrive



CERAMICS
CHINA
2023

**The 37th Edition of China Int'l Exhibition for
Ceramics Technology, Equipment & Product**

June 19-22, 2023

Area A, Canton Fair Complex, Guangzhou



China Ceramic
Industrial Association



UNIFAIR
EXHIBITION SERVICE

Tel: 0086 – 20 – 8327 6369 / 6389
Facebook: @Ceramics China
Twitter: @ceramics_china

Email: ceramicschina@unifair.com
Web: www.ceramicschina.com.cn

SOLID IDEAS

Bongioanni Macchine интегрирует концепцию «умной фабрики», внедряя технологии ИНДУСТРИИ 4.0 в производственные и энергетические системы своего оборудования



BONGIOANNI
HEAVY CLAY TECHNOLOGY



www.bongioannimacchine.com

