

Влияние вида глины на модифицирующий эффект синтетического диопсида в керамических материалах

Алла Германовна Соколова¹✉, Елена Михайловна Готлиб², Илья Дмитриевич Твердов³

¹ Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва, Россия

² Казанский национальный исследовательский технологический университет, г. Казань, Россия

³ АНО ВО «Университет Иннополис», Республика Татарстан, г. Иннополис, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Состав глинистой шихты в современной керамической промышленности корректируется введением полифункциональных добавок, среди которых распространены силикатные наполнители на основе крупнотоннажных промышленных отходов. Синтетический диопсид на основе золы рисовой шелухи и доломита, обладая рядом ценных характеристик, представляет несомненный интерес в качестве основной кристаллической фазы при производстве разных видов керамики.

Цель. Изучение модифицирующего действия синтетического диопсида (СД) на основе золы рисовой шелухи (ЗРШ) и доломита в составе керамической шихты на основе различных видов глинистого сырья.

Материалы и методы. В работе были исследованы глины Башкирского и Яушского месторождений, немодифицированные композиции на их основе, а также составы, наполненные синтетическим диопсидом. Стандартными экспериментальными методами были исследованы фазовый и гранулометрический составы глин, пластичность, истинная плотность и водостойкость базовой и модифицированных композиций, определена огневая, полная и воздушная усадка.

Результаты и обсуждение. Различия в фазовом и гранулометрическом составе глин незначительно влияют на пластичность глиняной шихты, но обуславливают разную истинную плотность. Установлено, что водостойкость и общая прочность немодифицированной керамики на основе этого глинистого сырья отличаются в среднем на 10 %.

Выводы. Синтетический диопсид показал свою эффективность как модifikатор глинистого сырья, снижающий усадку керамических материалов и пластичность, при этом более перспективной для применения является глина Яушского месторождения.

Ключевые слова: зола рисовой шелухи; усадка; модификация; фазовый состав; водостойкость; керамическая шихта; кальций-магниевые силикаты; водостойкость; воздушная усадка; огневая усадка

Для цитирования: Соколова А.Г., Готлиб Е.М., Твердов И.Д. Влияние вида глины на модифицирующий эффект синтетического диопсида в керамических материалах // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2025. Т. 34. № 2. С. 42–49. DOI: 10.22227/0869-7493.2025.34.02.42-49

✉ Соколова Алла Германовна, e-mail: as.falconi@yandex.ru

Influence of clay type on the modifying effect of synthetic diopside in ceramic materials

Alla G. Sokolova¹✉, Elena M. Gotlib², Ilya D. Tverdov³

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

² Kazan National Research Technological University, Kazan, Russian Federation

³ ANO HE “Innopolis University”, Republic of Tatarstan, Innopolis, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. In the modern ceramic industry, the composition of the clay charge is adjusted by the introduction of polyfunctional additives, among which silicate fillers on the base of large-tonnage industrial waste are widespread. Synthetic diopside derived from rice husk ash and dolomite, having a number of valuable characteristics, is of undoubted interest as the main crystalline phase in the production of different types of ceramics.

The aim. To investigate the modifying effect of synthetic diopside (SD) derived from rice husk ash (RHA) and dolomite in the composition of ceramic charge based on different types of clay raw materials.

Materials and methods. In this study, there were investigated the clays of Bashkir and Yaush deposits, unmodified compositions based on them, as well as compositions filled with synthetic diopside. Standard experimental methods were used to study the phase and particle size distribution of clays, plasticity, true density and water resistance of base and modified compositions, fire, total and air shrinkage were determined.

Results and discussion. Differences in the phase and particle size distribution of clays do not significantly affect the plasticity of the clay charge, but cause different true density. It was found that water resistance and overall unmodified ceramics based on these clay raw materials differ on average by 10 %.

Conclusions. Synthetic diopside has shown its effectiveness as a modifier of clay raw materials, reducing the shrinkage of ceramic materials and plasticity, with the clay of the Yaush deposit being more promising for application.

Keywords: rice husk ash; shrinkage; modification; phase composition; water resistance; ceramic charge; calcium magnesium silicates; water resistance; air shrinkage; fire shrinkage

For citation: Sokolova A.G., Gotlib E.M., Tverdov I.D. Influence of clay type on the modifying effect of synthetic diopside in ceramic materials. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2025; 34(2):42-49. DOI: 10.22227/0869-7493.2025.34.02.42-49 (rus).

✉ Alla Germanovna Sokolova, e-mail: as.falconi@yandex.ru

Введение

Нетрадиционные сырьевые материалы приобретают все большую распространенность в технологии производства керамических изделий ввиду недостатка ископаемого сырья высокого качества и растущей потребности в нем, вызванной строительным бумом на новых Российских территориях. Экономическая ситуация в РФ, сложившаяся в последние годы, вызвана ограниченной локализацией крупных месторождений высококачественного сырья, ростом железнодорожных тарифов на доставку сырьевых материалов из отдаленных районов, трудностью измельчения минеральных пород, наличием в их составе большого количества примесей.

В современной керамической промышленности, оснащенной автоматизированными линиями, состав шихты корректируется путем введения добавок, многие из которых являются полифункциональными. Так, например, более «жирные» глины вводят для улучшения пластических свойств шихты, отдающие добавки — в суглинки, кварцевый песок добавляют для улучшения сушильных свойств сырца и т.д. В результате получается многокомпонентная шихта с долей добавок, доходящей до 50 %, что приводит к удешевлению себестоимости получаемых изделий и сокращению доли местного глинистого сырья. Вышеперечисленные факторы требуют расширения минеральной сырьевой базы и делают актуальным применение в составе керамических материалов силикатных наполнителей на основе промышленных отходов, в том числе сельскохозяйственного производства, например рисовой крупы [1, 2].

Для получения качественных керамических материалов, особенно крупноразмерных изделий, ключевым технологическим параметром является низкая усадка, которую, согласно данным [3], может обеспечить наполнение цепочечным кальций-магниевым силикатом — диопсидом. Особенно важно учитывать параметры воздушной и огне-

вой усадки при расчете размеров изделий в процессе формования, в особенности изделий сложной формы.

Диопсид характеризуется высокими прочностными характеристиками, электрофизическими свойствами, кислотостойкостью, что делает его незаменимым в качестве основной кристаллической фазы при производстве различных видов керамики.

Разработка месторождений природного диопсида требует больших трудо- и энергозатрат. Так, в частности, слюдянское месторождение природного диопсида в Иркутской области разработано недостаточно, в связи с чем на отечественном рынке наблюдается дефицит этого материала [4]. Представляется рациональным синтезировать диопсид на основе доломита и золы рисовой шелухи (ЗРШ).

На характер модифицирующего действия этого кальций-магниевого силиката (КМС) существенное влияние может оказывать фазовый и минеральный состав глинистого компонента керамики [5].

Цель данного исследования — изучить модифицирующее действие синтетического диопсида (СД) в составе керамической шихты на основе различных видов глинистого сырья. Для достижения данной цели исследования были поставлены следующие задачи:

- изучить фазовый состав глин Башкирского и Яушского месторождений;
- определить гранулометрический состав глин обоих месторождений и число пластичности базовой и модифицированных композиций;
- определить истинную плотность и водостойкость базовой и модифицированных композиций;
- провести экспериментальные исследования по определению огневой, полной и воздушной усадки модифицированных композиций и сделать выводы о модифицирующем действии синтетического диопсида в составе керамической шихты.

Материалы и методы исследования

В качестве основы керамических материалов использованы глины Яушского (Чувашия) и Башкирского месторождений.

Синтетический диопсид, содержащий наполнитель (СД), был получен авторами твердофазным методом [6, 7] при температуре 1100 °C в течение 3 ч на основе карбонизированной при 500 °C рисовой шелухи и доломита (ГОСТ 23672–2020¹), при содержании этих компонентов в шихте 38 и 57 %, соответственно, и добавлении 5 % плавня — борной кислоты (ГОСТ 18704–78²).

Обжиг образцов для получения керамики проводился при температуре 1080 °C в лабораторной электрической печи типа КЭП 14/1250–П.

Для проведения физико-химических исследований образцы глин отбирали методом квартования.

Рентгенографический количественный фазовый анализ глин проводился на многофункциональном дифрактометре Rigaku SmartLab.

Гранулометрический состав глин определялся по Рутковскому [8]. Пластичность оценивалась согласно ГОСТ 21216–2014³. Водопоглощение глиняного сырья оценивалось по ГОСТ 7025–91⁴.

Определение истинной плотности глиняного сырья производилось пикнометрическим методом согласно ГОСТ 2211–2020⁵.

Воздушная, огневая и полная усадка определялись методом, описанным в работе [9].

Результаты и обсуждение

Диопсид представляет особый интерес при использовании его в качестве кристаллической фазы в технологии получения керамических материалов, так как в процессе обжига глинистых смесей частицы этого КМС претерпевают лишь незначительные физико-химические превращения [7, 10].

Применяемый авторами для модификации СД содержит 97 % диопсида и в качестве побочной фазы кристаллические оксиды кремния (кристобалит и тридимит). У этого высокодисперсного кальций-магниевого силиката средний размер частиц составляет порядка 3 мкм [11], при этом частицы характеризуются невысокой пористостью (общий объем пор — 0,001 см³/г).

¹ ГОСТ 23672–2020. Доломит для стекольной промышленности. Технические условия.

² ГОСТ 18704–78. Кислота борная. Технические условия.

³ ГОСТ 21216–2014. Сырье глинистое. Методы испытаний.

⁴ ГОСТ 7025–91. Кирпич и камни керамические и силикатные. Методы определения водопоглощения, плотности и контроля морозостойкости.

⁵ ГОСТ 2211–2020. Огнеупоры и огнеупорное сырье. Методы определения истинной плотности.

Качество керамических изделий значительно зависит от свойств глинистых материалов [12], которые определяются их минералогическим, гранулометрическим и фазовым составом, влияющим на технологические характеристики сырья, предопределяющие эффективность его использования.

Исследования, проведенные методом РКФА, показали (табл. 1), что в фазовом составе глины обоих месторождений основным компонентом является кварц (полиморфная модификация диоксида кремния), содержание которого вдвое больше у Яушской глины.

В составе применяемых глин также имеется заметное количество альбита (особенно у Башкирской глины) и каолинита, которые относятся к классу алюмосиликатов. Оба типа глинистого сырья содержат порядка 10 % мусковита — силиката калия и алюминия, и 7–13 % монтмориллонита, который относится к подклассу слоистых силикатов. В составе глин обнаружен также хлорит — слюдоподобный железосодержащий силикат (табл. 1).

В Башкирской глине также присутствует карбонат кальция — кальцит, отсутствующий в фазовом составе глины Яушского месторождения. Из всех содержащихся в составе глин минералов он обладает наименьшей водостойкостью. Таким образом, глины

Таблица 1. Фазовый состав Башкирской и Яушской глин
Table 1. Phase composition of Bashkir and Yaush clays

Образец Specimen	Состав Composition	Содержание, Content, %
Башкирская глина Bashkir clay	Кварц Quartz	32
	Кальцит Calcite	7
	Альбит Albite	24
	Монтмориллонит Montmorillonite	13
	Хлорит Chlorite	9
	Каолинит Kaolinite	5
	Мусковит Muscovite	10
Яушская глина Yaush clay	Кварц Quartz	65
	Альбит Albite	4
	Тальк Talc	1
	Монтмориллонит Montmorillonite	7
	Хлорит Chlorite	6
	Каолинит Kaolinite	8
	Мусковит Muscovite	9

Таблица 2. Гранулометрический состав глин по Рутковскому
Table 2. Granulometric composition of clays according to Rutkovskii

Содержание фракций, % по объему Fractional content, % by volume		
Песчаные частицы размером 1–0,05 мм Sand particles 1–0,05 mm in size	Песчаные частицы размером 0,05–0,005 мм Sand particles 0,05–0,005 mm in size	Глинистые частицы размером менее 0,005 мм Clay particles smaller than 0,005 mm
63,0/70,0	16,6/2,7	20,4/27,3

Примечание: в числителе даны показатели для Яушской глины, а в знаменателе — для Башкирской.

Note: in the numerator are given indicators for Yaush clay, and in the denominator — for Bashkir clay.

обоих месторождений имеют примерно одинаковый качественный состав, отличающийся только соотношением минералов, особенно кварца.

Исследуемые глинистые породы относятся к суглинкам, так как содержат преимущественно песчаные частицы, причем у Яушской глины число песчаных частиц меньших размеров значительно выше (более чем в 6 раз) (табл. 2). Следует отметить, что у Башкирского сырья наблюдается более высокое содержание глинистых частиц.

Пластичность глины из Башкирии несколько ниже, чем Яушской (рис. 1), однако характер влияния на этот показатель СД практически не отличается. По числу пластичности оба вида исследуемого глинистого сырья относятся к среднепластичному сырью [10]. Пластичность обоих глинистых материалов закономерно снижается при росте концентрации диопсида, причем в большей степени для глины из Чувашского месторождения при 15 % диопсида. Таким образом, синтетический диопсид положительно влияет на технологические свойства сырьевых шихт из обоих видов глин.

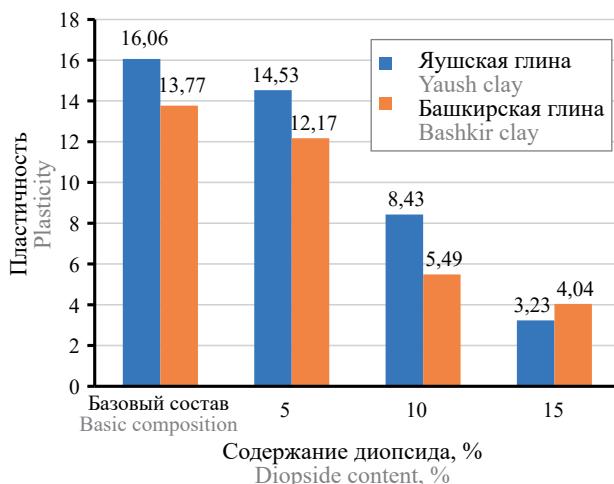


Рис. 1. Пластичность модифицированных диопсидом глин
Fig. 1. Plasticity of diopside-modified clays

Таблица 3. Истинная плотность модифицированных СД глин
Table 3. True density of SD modified clays

Содержание диопсида, % Diopside content, %	Базовый состав Basic composition	5	10	15
Истинная плотность, г/см ³ True density, g/cm ³	5,1/36,34	5,0/5,8	4,2/2,65	3,8/2,55

Примечание: в числителе даны показатели для Яушской глины, а в знаменателе — для Башкирской глины.

Note: in the numerator are given indicators for Yaush clay, and in the denominator — for Bashkir clay.

Истинная плотность Яушской глины не существенно зависит от концентрации диопсида в керамических массах (табл. 3). В то же время Башкирская глина имеет значительно большую плотность (примерно в 7 раз) (табл. 3), и данный показатель резко уменьшается при ее модификации СД (примерно на 90 %). Следует отметить, что пластичность модифицированных диопсидом композиций, при содержании данного КМС 10 и 15 %, ниже для Башкирской глины по сравнению с сырьем Чувашского месторождения.

Водостойкость керамики на основе обоих видов исследуемых глин не существенно отличается, она примерно на 10 % выше при использовании сырья Яушского месторождения (табл. 4).

Водопоглощение керамики (табл. 4) на основе Яушской глины при модификации СД значительно снижается (почти на 70 %), особенно в области низкого содержания данного модификатора. Это может происходить [13] за счет микроармирующего эффекта диопсида, выполняющего роль центра кристаллизации для новообразований, что обеспечивает прочный контакт этого КМС с минералами глинистого сырья.

Таблица 4. Водостойкость керамики на основе Башкирской и Яушской глин

Table 4. Water resistance of ceramics based on Bashkir and Yaush clay

Содержание СД, % SD content, %	Водопоглощение, % Water absorption, %
Базовый состав Basic composition	20,2/18,06
5	7,6/19,42
10	10,4/19,41
15	12,1/19,95

Примечание: в числителе даны показатели для Яушской глины, а в знаменателе — для Башкирской глины.

Note: in the numerator are given indicators for Yaush clay, and in the denominator — for Bashkir clay.

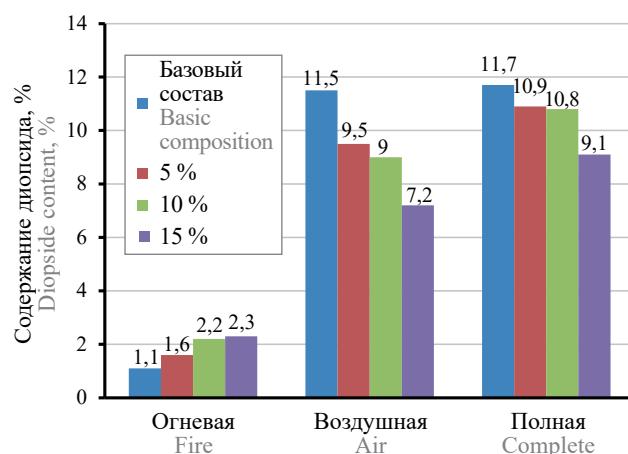


Рис. 2. Зависимость усадки керамики на основе Яушской глины от содержания диопсида

Fig. 2. Dependence of shrinkage of ceramics based on Yaush clay on diopside content

В то же время описываемый КМС незначительно (примерно на 10 %) повышает показатель водопоглощения у керамических материалов, полученных с использованием Башкирского глинистого сырья (табл. 4).

Очевидно, данное различие связано с разной степенью дисперсности исследуемых глин. Так, общеизвестно, что водостойкость керамики выше при использовании глин с меньшим размером частиц.

Воздушная усадка керамики на основе как Яушской, так и Башкирской глины находится примерно на одном уровне у немодифицированных материалов и закономерно уменьшается при увеличении концентрации СД (рис. 2, табл. 4).

Показатели огневой усадки керамики, изготовленной из Яушской глины, и при применении сырья из Башкирии находятся примерно на одном уровне. Однако СД различным образом влияет на этот показатель керамических материалов, увеличивая его при применении Яушской глины и оставляя примерно на одном уровне для керамики с сырьем из Башкирии (рис. 2, табл. 5). В то же время полная усадка керамики закономерно снижается с ростом содержания исследуемого КМС при применении обоих видов исследуемой глины.

Это связано с повышенной кристаллизационной способностью расплава модифицированных систем за счет растворения в нем Ca и Mg, источником которых является диопсид, как правило, распределяющийся в глинистой составляющей между пылеватыми и песчаными частицами [14].

Причиной снижения усадки является то, что диопсид, растворяясь в расплаве, сохраняет свой структурный пироксеновый каркас, препятствуя изменению первоначального объема керамического изделия [10, 15].

Таблица 5. Усадка керамики на основе Башкирской глины в зависимости от содержания СД

Table 5. Shrinkage of ceramics based on Bashkir clay depending on the content of SD

Содержание СД, %, SD content, %	Усадка, % Shrinkage, %		
	Огневая Fire	Полная Complete	Воздушная Air
Базовый состав Basic composition	0,98	11,68	10,74
5	1,09	9,25	8,35
10	0,95	8,15	7,22
15	0,86	7,46	6,62

Различие фазового состава глин Яушского и Башкирского месторождений заключается в основном в разном содержании кристаллических модификаций диоксида кремния, что влияет преимущественно на количество мелких песчаных частиц и истинную плотность. Согласно литературным данным [16], зерна кварца могут частично растворяться в расплаве. Их нерастворившиеся остатки выполняют роль инертных наполнителей. В результате полиморфных превращений кварца возможно образование кристобалита и тридимита. Эти разновидности кристаллического кремнезема способны разрыхлять структуру керамического материала, что может быть причиной несколько большего водопоглощения керамики на основе Яушской глины (табл. 4).

Полная усадка керамики меньше в случае применения Башкирской глины как для немодифицированных составов, так и для составов, содержащих синтетический диопсид (рис. 2, табл. 5).

Вид кристаллических новообразований в процессе спекания керамических масс определяется свойствами сырья. Так, в глинах с избытком кремнезема преобладают кварц, тридимит, кристобалит [17, 18]. Это влияет на общую структуру обожженного материала [19, 20] и, вероятно, является причиной большей полной усадки керамики на основе глины Яушского месторождения.

Заключение

Фазовый состав глин Яушского и Башкирского месторождений отличается, в основном, содержанием кварца, что отражается в разном количестве мелких песчаных частиц, обуславливает различия в истинной плотности, при этом незначительно влияя на пластичность глины. Было установлено, что оба вида глинистого сырья являются среднепластичными, добавление в шихту диопсида снижает

пластичность сырьевой шихты, что улучшает ее технологические свойства.

Глина Башкирского месторождения имеет истинную плотность, значительно превышающую плотность Яушской глины (в 7 раз), модификация синтетическим диопсидом снижает данный показатель на 90 %.

Благодаря микроармирующему эффекту диопсида водопоглощение керамики на основе Яушской глины снижается до 70 %, особенно при низком содержании модификатора. В то же время водостойкость и общая усадка немодифицированной керамики на основе глинистого сырья Башкирского месторождения отличаются в среднем на 10 %.

Установлено, что диопсид, синтезированный твердофазным методом на основе золы рисовой шелухи, является достаточно эффективным модификатором глинистого сырья, уменьшающим усадку керамических материалов на основе обоих видов сырьевых материалов и одновременно снижающим их пластичность.

Более перспективно использовать исследуемый кальций-магниевый силикат для керамики на основе глины Яушского месторождения вследствие значительного роста водостойкости этого материала при модификации, что позволяет применять его, например, для изготовления сантехнических керамических изделий, а также отделочной и напольной плитки для бассейнов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Mishagin K.A., Yamaleeva E.S., Gotlib E.M., Sokolova A.G., Pirogova N.N. The impact of calcium silicate obtained from zeolite-siliceous rock on properties of ceramic materials // Construction Economics. 2024. No. 10. Pp. 433–435.
2. Готлиб Е.М., Соколова А.Г., Гимранова А.Р. Исследование влияния волластонита на свойства керамических изделий // Экономика строительства. 2023. № 9. С. 149–152. EDN NMMXTN.
3. Верещагин В.И., Меньшикова В.К., Бурученко А.Е., Могилевская Н.В. Керамические материалы на основе диопсида // Стекло и керамика. 2010. № 11. С. 13–16. EDN NBKRM.
4. Ghosh S., Koizumi S., Hiraga T. Diffusion creep of diopside // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 2022. No. 126 (1). DOI: 10.1029/2020JB019855
5. Верещагин В.И., Бурученко А.Е., Меньшикова В.К. Безусадочный облицовочный керамический материал на основе диопсидового сырья // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 1–1. С. 13. EDN VIDTCB.
6. Nazzareni S., Skogby H., Hålenius U. Crystal chemistry of Sc-bearing synthetic diopsides // Physics And Chemistry Of Minerals. 2013. Issue 40. Pp. 789–798. DOI: 10.1007/s00269-013-0613-5
7. Твердов И.Д., Ямалеева Е.С., Готлиб Е.М., Холин К.В., Султанов Т.П. Изучение фазовых превращений в процессе твердофазного синтеза диопсида на основе золы рисовой шелухи // Вестник ВГУИТ. 2024. Т. 86. № 2. С. 277–283. DOI: 10.20914/2310-1202-2024-2-277-283
8. Ступников В.С., Данчук Е.М., Черкасова Л.И. Методы определения типа и состава грунта // Международный журнал прикладных наук и технологий «Интеграл». 2019. № 1. С. 22–27. EDN FMMFSI.
9. Мошняков М.Г., Орлова Т.А. Реология и исследование текучести глин российских месторождений для производства керамики // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия Технические науки. 2016. № 4 (52). С. 147–157.
10. Бурученко А.Е., Меньшикова В.К., Верещагин В.И. Облицовочная строительная керамика на основе диопсида // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2011. № 3. С. 145–152.
11. Габдулхаев К.Р., Валеева А.Р., Твердов И.Д., Готлиб Е.М. Сравнение состава, свойств и модифицирующего действия в эпоксидных композициях природного и синтетического диопсидодержащих наполнителей // Вопросы материаловедения. 2024. № 3 (119). С. 147–155. DOI: 10.22349/1994-6716-2024-119-3-145-152. EDN ENUXGX.
12. Твердов И.Д., Готлиб Е.М., Габдулхаев К.Р., Ямалеева Е.С. Керамические материалы, модифицированные синтетическим диопсидом на основе золы рисовой шелухи // Вестник технологического университета. 2024. Т. 27. № 2. С. 63–67.
13. Лазарева Я.В., Лапунова К.М., Орлова М.Е., Котляр А.В. Взаимосвязь водопоглощения и водонепроницаемости керамической черепицы из аргиллитоподобных глин // Строительные материалы. 2018. № 5. С. 36–39.
14. Казьмина О.В., Верещагин В.И., Абияка А.Н. Влияние предварительной подготовки стекольной шихты и степени ее дисперсности на процессы силикато- и стеклообразования // Техника и технология силикатов. 2009. Т. 16. № 3. С. 2–7. EDN JTIAWT.

15. Rassokhin A.S., Ponomarev A.N., Figovsky O.L. Silica fumes of different types for high-performance fine-grained concrete // Magazine of Civil Engineering. 2018. No. 2 (78). Pp. 151–160. DOI: 10.18720/MCE.78.12
16. Chumachenko N.G. The use of phas.rule diagrams of aluminosilicate systems for calculating melt amount and constituents appearing in ceramic mixture under firing // Procedia Engineering. 2014. Vol. 91. Pp. 381–385. DOI: 10.1016/j.proeng.2014.12.079
17. Ушинецкая Н.Н., Местников А.Е. Исследование свойств глинистого сырья методами физико-химического анализа // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. Шухова. 2024. Т. 9. № 4. С. 16–25. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-4-16-25
18. Vakalova T.V., Govorova L.P., Reshetova A.A., Shvagruckova E., Tokareva A.Yu. Activation of synthesis and sintering of mullite aluminosilicate ceramics based on natural raw materials // Advanced Materials Research. 2014. Vol. 1040. Pp. 268–271. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.1040.268
19. Чумаченко Н.Г., Тюрников В.В., Недосеко И.В. К вопросу оптимизации структуры для получения высокопрочной керамики // Градостроительство и архитектура. 2023. Т. 13. № 1. С. 92–96. DOI: 10.17673/Vestnik.2023.01.12
20. Верещагин В.И., Могилевская Н.В., Сафонова Т.В. Спекание и прочность стеновой керамики и фаянса из композиций глинистого и диопсидсодержащего сырья // Вестник ТГАСУ. 2019. Т. 21. № 6. С. 122–131. DOI: 10.31675/1607-1859-2019-21-6-122-133. EDN TFUCTT.

REFERENCES

1. Mishagin K.A., Yamaleeva E.S., Gotlib E.M., Sokolova A.G., Pirogova N.N. The impact of calcium silicate obtained from zeolite-siliceous rock on properties of ceramic materials. *Construction Economics*. 2024; 10:433-435.
2. Gotlib E.M., Sokolova A.G., Gimranova A.R. Study of the effect of wollastonite on the properties of ceramic products. *Construction Economics*. 2023; 9:149-152. EDN NMMXTN. (rus).
3. Vereshchagin V.I., Men'shikova V.K., Buruchenko A.E., Mogilevskaya N.V. Ceramic materials on the diopside base. *Glass and Ceramics*. 2010; 11:13-16. EDN NBKRM. (rus).
4. Ghosh S., Koisumi S., Hiraga T. Diffusion creep of diopside. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2022; 126(1). DOI: 10.1029/2020JB019855
5. Vereshchagin V.I., Buruchenko A.E., Men'shikova V.K. Dimensionally stable ceramic facing material on the basis of diopside raw materials. *Modern Problems of Science and Education*. 2015; 1-1:13. EDN VIDTCB. (rus).
6. Nazzareni S., Skogby H., Hälenius U. Crystal chemistry of Sc-bearing synthetic diopsides. *Physics And Chemistry Of Minerals*. 2013; 40:789-798. DOI: 10.1007/s00269-013-0613-5
7. Tverdov I.D., Yamaleeva E.S., Gotlib E.M., Kholin K.V., Sultanov T.P. Study of phase transformations in the process of solid-phase synthesis of diopside based on rice husk ash. *Proceedings of VSUET*. 2024; 86(2):277-283. DOI: 10.20914/2310-1202-2024-2-277-283 (rus).
8. Stupnikov V.S., Danchuk E.M., Cherkasova L.I. The methods of determining type and composition of soils. *International Journal of Applied Sciences and Technology Integral*. 2019; 1:22-27. EDN FMMFSI. (rus).
9. Moshnyakov M.G., Orlova T.A. Rheology and the study of flowage of Russian deposit clay for ceramic manufacturing. *Bulletin of Samara State Technical University. Technical Sciences Series*. 2016; 4(52):147-157.
10. Buruchenko A.E., Men'shikova V. K., Vereshchagin V.I. Facing building ceramics on the basis of the diopside compositions with clay. *Journal of Construction and Architecture*. 2011; 3:145-152.
11. Gabdulkhayev K.R., Valeeva A.R., Tverdov I.D., Gotlib E.M. Comparison of composition, properties and modifying effect in epoxy compositions of natural and synthetic diopside-containing fillers. *Issues of Material Science*. 2024; 3(119):147-155. DOI: 10.22349/1994-6716-2024-119-3-145-152. EDN ENUXGX. (rus).
12. Tverdov I.D., Gotlib E.M., Gabdulkhayev K.R., Yamaleeva E.S. Ceramic materials modified by synthetic diopside on the base of rice husk ash. *Herald of Technological University*. 2024; 27(2):63-67. (rus).
13. Lazareva Ya.V., Lapunova K.M., Orlova M.E., Kotlyar A.V. Relationship of Water Absorption and Water Resistance of a Ceramic Tile from Argillith-Like Clays. *Construction Materials*. 2018; 5:36-39. (rus).
14. Kaz'mina O.V., Vereshchagin V.I., Abiyaka A.N. The impact of preliminary treatment of glass batch and the degree of its dispersiveness on the processes of silicates and glass formation. *Technique and Technology of Silicates*. 2009; 16(3):2-7. EDN JTIAWT. (rus.).
15. Rassokhin A.S., Ponomarev A.N., Figovsky O.L. Silica fumes of different types for high-performance fine-grained concrete. *Magazine of Civil Engineering*. 2018; 2(78):151-160. DOI: 10.18720/MCE.78.12
16. Chumachenko N.G. The use of phas.rule diagrams of aluminosilicate systems for calculating melt amount and constituents appearing in ceramic mixture under firing. *Procedia Engineering*. 2014; 91:381-385. DOI: 10.1016/j.proeng.2014.12.079

17. Ushnitskaya N.N., Mestnikov A.E. Investigation of the properties of clay raw materials by methods of physico-chemical analysis. *Bulletin of Belgorod State Technological University Named after V.G. Shukhov*. 2024; 9(4):16-25. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-4-16-25
18. Vakalova T.V., Govorova L.P., Reshetova A.A., Shvagruckova E., Tokareva A.Yu. Activation of synthesis and sintering of mullite aluminosilicate ceramics based on natural raw materials. *Advanced Materials Research*. 2014; 1040: 268-271. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.1040.268
19. Chumachenko N.G., Tyunikov V.V., Nedoseko I.V. Structure optimization for producing high-strength ceramics. *Urban Construction and Architecture*. 2023; 13(1):92-96. DOI: 10.17673/Bulletin.2023.01.12 (rus).
20. Vereshchagin V.I., Mogilevskaya N.V., Safonova T.V. Sintering and durability of clay- and diopside-containing ceramic and faience wall materials. *Bulletin of Tomsk State Architectural and Structural Engineering University — Journal of Construction and Architecture*. 2019; 21(6):122-131. DOI: 10.31675/1607-1859-2019-21-6-122-133. EDN TFUCTT. (rus).

Поступила 10.03.2025, после доработки 20.03.2025;

принята к публикации 28.03.2025

Received March 10, 2025; Received in revised form March 20, 2025;

Accepted March 28, 2025

Информация об авторах

ТВЕРДОВ Илья Дмитриевич, аналитик, АНО ВО «Университет Иннополис», Россия, 420500, Республика Татарстан, г. Иннополис, Университетская ул., 1; ORCID: 0000-0002-7524-3088, AuthorID: 57218419634; e-mail: idtverdov@gmail.com

СОКОЛОВА Алла Германовна, к.т.н., доцент кафедры строительного материаловедения, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; ORCID: 0000-0001-8425-1883; ResearcherID: F-3314-2017; AuthorID: 57202822282; e-mail: as.falconi@yandex.ru

ГОТЛИБ Елена Михайловна, д.т.н., профессор кафедры технологий синтетического каучука, Казанский национальный исследовательский технологический университет, Россия, 420015, г. Казань, ул. Карла Маркса, 68; ORCID: 0000-0003-1666-8702; AuthorID: 6603371638; e-mail: egotlib@yandex.ru

Вклад авторов:

Твердов И.Д. — идея; обработка материала; написание статьи.

Соколова А.Г. — сбор материала; обработка материала.

Готлиб Е.М. — концепция; научное редактирование текста; общее руководство.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors

Ilya D. TVERDOV, Research Associate, ANO HE “Innopolis University”, Universitetskaya street, 1, Innopolis, Republic of Tatarstan, 420500, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-7524-3088; AuthorID: 57218419634; e-mail: idtverdov@gmail.com

Alla G. SOKOLOVA, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Materials Science, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Yaroslavskoye Shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation; ORCID: 0000-0001-8425-1883; ResearcherID: F-3314-2017; AuthorID: 57202822282; e-mail: as.falconi@yandex.ru

Elena M. GOTLIB, Dr. Sci. (Eng.), Professor Synthetic Rubber Technology Department, Kazan National Research Technological, Karl Marx street, 68, Kazan, 420015, Russian Federation; ORCID: 0000-0003-1666-8702; AuthorID: 6603371638; e-mail: egotlib@yandex.ru

Contribution of the authors:

Tverdov I.D. — idea; processing of the material; writing the article.

Sokolova A.G. — collection of the data; processing of the data.

Gotlib E.M. — concept; scientific editing of the text; general guidance.

The authors declare no conflicts of interests.