

Свойства и фазовый состав силикатных наполнителей, полученных на основе различных продуктов переработки рисовой шелухи

Алла Германовна Соколова¹✉, Камиль Радикович Габдулхаев², Елена Михайловна Готлиб²

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

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Утилизация рисовой шелухи (РШ), многотоннажного отхода сельскохозяйственного производства, имеет практический интерес, поскольку на ее основе перспективно синтезировать волластонит- и диопсид-содержащие наполнители. Фазовый состав и свойства этих кальций-магниевых силикатов (КМС), получаемых методом твердофазного синтеза, будут зависеть от содержания в производных рисовой шелухи аморфного диоксида кремния, их пористости, кислотно-основных характеристик поверхности и других показателей.

Цель исследования. Оценить влияние способа получения диоксида кремния из рисовой шелухи на состав и свойства синтезируемых на его основе силикатов.

Материалы и методы исследования. В работе исследованы производные переработки рисовой шелухи: зола рисовой шелухи, полученная при 500 °С в лабораторных условиях, и промышленная карбонизированная рисовая шелуха. Рентгенографический количественный анализ (РКФА) проводился на дифрактометре Rigaku SmartLab. Удельную площадь поверхности пор определяли по методу низкотемпературной адсорбции азота на приборе Quantachrome Nova 1200e. pH водной вытяжки образцов определяли с помощью комбинированного измерителя «SevenMulti» по ГОСТ 21119.3–91. Содержание углерода оценивали на элементном анализаторе «СКИС 5Е-СНН 2200».

Результаты и обсуждение. Зола рисовой шелухи, полученная в лабораторных условиях, и промышленная карбонизированная РШ существенно отличаются по пористости, и КМС на их основе имеют различный фазовый состав. Большой выход диопсида при применении обоих производных РШ имеет место при избытке доломита. Однако при использовании промышленного образца в составе полученного силиката, помимо диопсида, содержится волластонит, и этот КМС отличается повышенной пористостью структуры.

Выводы. При применении более пористого промышленного диоксида кремния синтезированный твердофазным методом силикат содержит волластонит, который отсутствует в составе конечного продукта на основе полученной в лабораторных условиях золы рисовой шелухи. Все синтезированные силикаты содержат кристаллические диоксиды кремния, концентрация которых выше при большей доле кремнийсодержащего компонента в шихте.

Ключевые слова: фазовый состав; пористость; синтетический диопсид; волластонит; рисовая шелуха; твердофазный синтез; кристобалит

Для цитирования: Соколова А.Г., Габдулхаев К.Р., Готлиб Е.М. Свойства и фазовый состав силикатных наполнителей, полученных на основе различных продуктов переработки рисовой шелухи // Пожаровзрывобезопасность/ Fire and Explosion Safety. 2025. Т. 34. № 1. С. 32–39. DOI: 10.22227/0869-7493.2025.34.01.32-39

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

Properties and phase composition of silicate fillers obtained on the basis of different rice husk processing products

Alla G. Sokolova¹✉, Kamil R. Gabdulkhayev², Elena M. Gotlib²

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

² Kazan National Research Technological University, Kazan, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Utilization of rice husk (RH), a multi-tonnage waste product of agricultural production, is of practical interest as synthesis of wollastonite and diopside-containing fillers on its base has great prospects. Phase

composition and properties of these calcium and magnesium silicates (CMS) obtained by the method of solid phase synthesis will depend on the content of amorphous silicon dioxide in the products, their porosity, acid-base properties of surface, and others.

The aim of the research. To evaluate the impact of the method of obtaining silicon dioxide from RH on the properties and phase composition of silicates synthesized on its base.

Materials and methods of the research. In the work, the derivatives of rice husk processing were investigated: rice husk ash obtained in the laboratory conditions at 500 °C and industrial carbonized rice husk. X-ray diffraction quantitative analysis was carried out on the Rigaku SmartLab diffractometer. Specific pore surface was assessed by the method of low-temperature adsorption on the Quantachrome Nova 1200e apparatus. The pH of the aqueous extract of the specimens was evaluated by the combined measuring device solutions "SevenMulti" under the no GOST 21119.3–91. The carbon content was estimated on the element analyzer "CKIS 5E-CHN 2200".

Results and discussion. Rice husk ash produced in the laboratory conditions at the temperature 500 °C and industrial carbonized RH are substantially different in porosity, while CMS on their base have different phase composition. Considering both derivatives of RH, the largest yield of diopside occurs at the excess amount of dolomite. However, when the industrial specimen is used, the composition of obtained silicate also contains wollastonite, apart from diopside, and such CMS is characterized by the increased porosity of structure.

Conclusions. At the application of more porous industrial silicon dioxide synthesized by solid phase method, the silicate contains wollastonite, which is absent in the composition of the final product on the base of rice husk ash obtained in the laboratory conditions. All synthesized silicates contain crystalline silicon dioxides. The higher the content of silicon components in the stock charge, the greater the concentration of silicon dioxides.

Keywords: phase composition; porosity; synthetic diopside; wollastonite; rice husk; solid phase synthesis; cristobalite

For citation: Sokolova A.G., Gabdulkhayev K.R., Gotlib E.M. Properties and phase composition of silicate fillers obtained on the basis of different rice husk processing products. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2025; 34(1):32-39. DOI: 10.22227/0869-7493.2025.34.01.32-39 (rus).

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

Введение

Одним из путей снижения материалоемкости производства продукции и улучшения его экологичности является повышение степени утилизации различных видов крупнотоннажных отходов, что экономически выгодно и технически осуществимо [1]. Данная задача соответствует новой модели производства и потребления — экономике замкнутого цикла, которая подразумевает переработку, повторное использование и восстановление материалов и продуктов. В этой связи становится актуальным использование в том числе продуктов «зеленой» химии, которые сокращают или полностью исключают использование и образование опасных веществ и применяют устойчивые и эффективные реакции, минимизирующие отходы, использование энергии и уменьшающие воздействие на окружающую среду.

В частности, практический интерес имеет грамотная утилизация рисовой шелухи или лузги (РШ), основой которой должен быть анализ путей ее переработки и регулирования свойств получаемых продуктов [2]. В 2024 г. российские производители добились рекордного урожая риса в 1,2 млн тонн, что на 17 % превышает уровень 2023 г. Следует отметить, что за последние два десятилетия сбор рисовой культуры в Российской Федерации возрос в 2,7 раза. Поскольку рисовая шелуха составляет около 20 % от массы производимого зерна, объемы отходов представляют собой серьезную проблему для экономики. Рисовая шелуха состоит из целлюлозы (50 %), лигнина (25–30 %), кремне-

зема (15–20 %) и влаги (10–15 %). Ввиду высокого содержания кремнезема рисовая шелуха практически не подвергается естественному биологическому разложению, накапливаясь в полигонах, становится серьезным загрязнителем окружающей среды и превращается в трудноразлагаемый отход [3].

В последние годы отходы рисового производства привлекают большое внимание исследователей [4, 5]. Рисовая шелуха и продукты ее переработки используются как заполнители и наполнители для бетона в качестве более дешевой альтернативы мелкого кремнезема, абсорбента для масел и синтетических веществ, мелиорантов почвы, в качестве изоляционных материалов при производстве холодильников, а также в сталелитейной отрасли в виде изоляционного порошка.

Однако влияние метода получения конечного продукта из отходов рисового производства на свойства и эффективность получаемых силикатов недостаточно изучено [6]. Основным способом переработки рисовой шелухи является ее сжигание с получением золы рисовой шелухи (ЗРШ), а также синтетического волластонита и диопсида на ее основе [7, 8]. Их фазовый состав и свойства при использовании твердофазного метода получения будут зависеть от содержания в производных рисовой шелухи аморфного диоксида кремния и их других характеристик. Нагревание золы до достаточно высоких температур приводит к удалению несгоревшего углерода и ее кристаллизации, сопровождающейся переходом диоксида кремния в кристобалит или тридимит.

В этой связи была поставлена **цель исследования** — оценить влияние способа получения диоксида кремния из рисовой шелухи на состав и свойства синтезируемых на его основе кальций-магнєвых силикатов (КМС).

Для достижения указанной цели были поставлены следующие задачи:

- определить фазовый состав золы рисовой шелухи, полученной в лабораторных условиях сжиганием при температуре 500 °С, и промышленной карбонизированной рисовой шелухи и произвести сравнительный анализ содержания в них аморфного кремнезема и углерода;
- оценить показатели пористости и кислотно-основные характеристики поверхности производных рисовой шелухи;
- синтезировать кальций-магнєвые силикаты на основе доломита и производных рисовой шелухи методом изотермической выдержки с различным составом шихты;
- оценить фазовый состав и показатели пористости синтезированных кальций-магнєвых силикатов высокоинформативными методами и выявить зависимость данных свойств от состава шихты;
- на основе полученных данных определить возможные области применения кальций-магнєвых силикатов в производстве строительных материалов.

Материалы и методы исследования

В качестве источника аморфного диоксида кремния изучались: зола рисовой шелухи (ЗРШ₅₀₀), полученная в лабораторных условиях термообработкой РШ в течение 3 ч при 500 °С, и промышленная карбонизированная рисовая шелуха (ПКРШ), производимая на установке по ТУ 38.21.40-003-42457266–2021¹ [9].

При получении ПКРШ рисовая шелуха с помощью конвейеров направляется в пиролизные печи, в которых она перемещается по каналам с помощью транспортировочного механизма при нагреве до 600 °С без доступа кислорода с активным выделением пиролизных газов, которые отводятся через специальный канал. Далее зола РШ транспортируется на установку дожигания [9].

В качестве источника оксидов кальция и магния применялся доломит (ГОСТ 23672–2020²), а для

¹ ТУ 38.21.40-003-42457266–2021. Установка получения золошлаковой смеси при утилизации золы и остатков от термической деструкции (сжигания) отходов. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1300836738>

² ГОСТ 23672–2020. Межгосударственный стандарт. Доломит для стеклольной промышленности. Технические условия (дата введения: 01.03.2021).

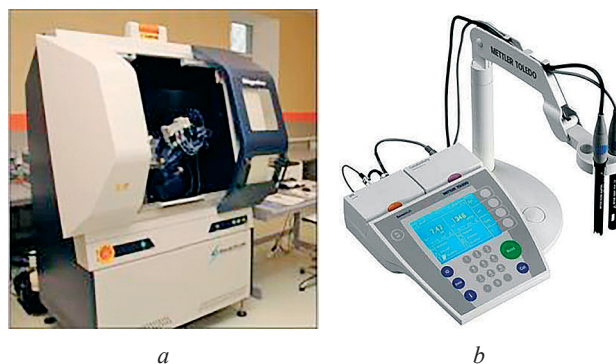


Рис. 1. Измерительное оборудование Комплексной лаборатории «НаноАналитика», КНИТУ, Казань: *a* — дифрактометр Rigaku SmartLab; *b* — измеритель комбинированный SevenMulti S47-K с модулями pH/OBП и УЭП

Fig. 1. Measuring equipment of the Integrated Laboratory “NanoAnalytics”, KNITU, Kazan: *a* — Rigaku SmartLab diffractometer; *b* — SevenMulti S47-K combination meter with pH/ORP and SEC modules

уменьшения энергоемкости процесса твердофазного синтеза КМС, в качестве плавня [10] использована 5%-ная борная кислота (ГОСТ 18704–78³).

Кальций-магнєвые силикаты получали [11] при изотермической выдержке исходных компонентов при температуре 1100 °С в течение 3 ч.

Рентгенографический количественный анализ (РКФА) проводился на многофункциональном дифрактометре Rigaku SmartLab Комплексной лаборатории «НаноАналитика» (рис. 1, *a*) при параметрах съемки: угловой интервал 2θ от 3 до 65 ° с шагом сканирования 0,02, с экспозицией 1 с в точке.

pH водной вытяжки образцов определяли с помощью комбинированного измерителя «SevenMulti» (рис. 1, *b*) по ГОСТ 21119.3–91⁴.

Определение удельной площади поверхности проводилось с применением метода низкотемпературной адсорбции азота на приборе Quantachrome Nova 1200e (рис. 2). Пробоподготовка образцов проводилась при температуре 150 °С, 3 ч, при давлении в вакууме 2 Па. При определении удельной площади поверхности по методу BET использовалось ISO 9277:2010⁵, при анализе распределения мезопор ISO 15901-2:2006⁶.

Содержание углерода оценивали на элементном анализаторе «СКIS 5E-CHN 2200».

³ ГОСТ 18704–78. Кислота борная. Технические условия (дата введения: 01.01.80).

⁴ ГОСТ 21119.3–91. Общие методы испытаний пигментов и наполнителей. Определение pH водной суспензии (дата введения: 01.01.93).

⁵ ISO 9277:2010. Международный стандарт. Определение удельной площади поверхности дисперсных и пористых материалов методом газовой адсорбции. Метод Брунауэра, Эммета и Теллера (BET метод).

⁶ ISO 15901-2:2006. International standard. Pore size distribution and porosity of solid materials by mercury porosimetry and gas adsorption.



Рис. 2. Анализатор размера пор и площади поверхности NOVA 1200 (QUANTACHROME)
Fig. 2. NOVA 1200 pore size and surface area analyzer (QUANTACHROME)

Результаты и обсуждение

В результате проведенных исследований были установлены фазовые составы золы рисовой шелухи, полученной в лабораторных условиях путем обжига РШ при 500 °С, и промышленной карбонизированной рисовой шелухи (табл. 1).

Таким образом, ЗРШ, полученная из рисовой шелухи (РШ) при 500 °С, содержит 97 % аморфного диоксида кремния, а ПКРШ является полностью аморфной (табл. 1).

Эти силикаты несколько отличаются содержанием органической фазы (табл. 1), которая у ПКРШ немного больше, чем у золы, полученной при 500 °С, что также может оказывать определенное влияние на процесс обжига их с доломитом. Зола рисовой шелухи, как и ПКРШ, имеет щелочную природу поверхности (табл. 2). В то же время эти силикаты существенно отличаются по пористости. У ПКРШ общий объем пор почти в 3 раза больше, она имеет средний диаметр пор, в 3,6 раза больший,

Таблица 1. Фазовый состав продуктов переработки рисовой шелухи и содержание в них углерода
Table 1. Phase composition of rice husk products and their carbon content

Фазовый состав, % Phase composition, %	Силикат / Silicate	
	ЗРШ ₅₀₀ RHA ₅₀₀	ПКРШ ICRH
Рентгеноаморфная фаза X-ray amorphous phase	97	100
Кристобалит Cristobalite	2	0
Кварц Quartz	1	0
Содержание углерода, % Carbon content, %	3,94	4,64

и в 2,1 раза большую удельную поверхность пор (табл. 2) по сравнению с ЗРШ₅₀₀.

При использовании всех производных РШ больший выход диоксида наблюдается при избытке доломита в шихте (табл. 3) вследствие распада этого кальций-магниевого карбоната с выделением углекислого газа [12, 13] в процессе высокотемпературного обжига компонентов.

Силикаты, полученные на основе ПКРШ, имеют достаточно однородный фазовый состав и независимо от соотношения аморфного диоксида кремния и доломита содержат только диопсид, волластонит и кристобалит (табл. 3). Содержание кристобалита в конечном продукте закономерно снижается с ростом концентрации доломита в шихте, так как аморфная ПКРШ расходуется на реакцию с ним.

Содержание волластонита в продукте твердофазной реакции больше при равном содержании ПКРШ и кальций-магниевого карбоната (табл. 3).

При использовании полученной в лабораторных условиях золы рисовой шелухи фазовый состав продуктов твердофазного синтеза существенно отличается от применения ПКРШ (табл. 4). Так, КМС не содержит волластонит, и наибольшее содержание в нем диоксида выше, чем при применении ЗШР₅₀₀.

Таблица 2. Характеристики пористости структуры и pH водных дисперсий производных РШ
Table 2. Characteristics of porosity structure and pH of aqueous dispersions of RH derivatives

Силикат Silicate	Общий объем пор по ВЖН, см³/г Total pore volume by ВЖН, cm³/g	Средний диаметр пор по ВЖН, нм Average pore diameter by ВЖН, nm	Удельная поверхность пор по БЭТ, м²/г BET specific pore surface, m²/g	pH водной суспензии pH of aqueous suspension
ЗРШ ₅₀₀ RHA ₅₀₀	0,08	4,1	27,8	9,1
ПКРШ ICRH	0,22	14,8	59,3	9,9

Таблица 3. Фазовый состав и пористость образцов КМС в зависимости от соотношения ПКРШ и доломита в шихте
Table 3. Phase composition and porosity of CMS specimens depending on the ratio of ICRH and dolomite in the charge

Состав шихты, % Charge composition, %	Фазовый состав, % Phase composition, %	Средний диаметр пор, нм Average pore diameter, nm	Удельная поверхность пор (БЭТ), м ² /г Specific pore surface area (BET), m ² /g	Удельный объем пор, см ³ /г Specific pore volume, cm ³ /g
Доломит — 52,0; ПКРШ — 43,0 Dolomite — 52.0; ICRH — 43.0	Диопсид — 81,5; Кристаллит — 4,7; Волластонит — 13,8 Diopside — 81.5; Cristobalite — 4.7; Wollastonite — 13.8	12,93	5,50	0,017
Доломит — 47,0; ПКРШ — 47,5 Dolomite — 47.0; ICRH — 47.5	Диопсид — 70,5; Кристаллит — 12,7; Волластонит — 16,8 Diopside — 70.5; Cristobalite — 12.7; Wollastonite — 16.8	11,33	6,05	0,017
Доломит — 43,0; ПКРШ — 52,0 Dolomite — 43.0; ICRH — 52.0	Диопсид — 66,2; Кристаллит — 18,4; Волластонит — 15,4 Diopside — 66.2; Cristobalite — 18.4; Wollastonite — 15.4	7,77	10,46	0,020

Таблица 4. Фазовый состав синтетического диопсид содержащего наполнителя, полученного при разных соотношениях ЗРШ₅₀₀:Доломит
Table 4. Phase composition of synthetic diopside containing filler obtained at different ratios of RHA₅₀₀:Dolomite

Состав шихты, % Charge composition, %	Фазовый состав, % Phase composition, %	Средний диаметр пор, нм Average pore diameter, nm	Удельная поверхность (БЭТ), м ² /г Specific pore surface area (BET), m ² /g	Удельный объем пор, см ³ /г Specific pore volume, cm ³ /g
Доломит — 52,0; ЗРШ ₅₀₀ — 43,0 Dolomite — 52.0; RHA ₅₀₀ — 43.0	Диопсид — 95; Кристаллит — 4; Тридимит — 1 Diopside — 95; Cristobalite — 4; Tridymite — 1	4,11	1,86	0,001
Доломит — 47,5; ЗРШ ₅₀₀ — 47,5 Dolomite — 47.5; RHA ₅₀₀ — 47.5	Диопсид — 65; Тридимит — 35 Diopside — 65; Tridymite — 35	3,29	1,34	0,003
Доломит — 43,0; ЗРШ ₅₀₀ — 52,0 Dolomite — 47.5; RHA ₅₀₀ — 47.5	Диопсид — 61; Кристаллит — 14; Тридимит — 24 Diopside — 61; Cristobalite — 14; Tridymite — 24	3,96	1,47	0,0025

В то же время при недостатке доломита в шихте происходит кристаллизация аморфного диоксида кремния. Следовательно, фиксируется большее количество его кристаллических модификаций (до 30 % доли получаемого силиката). Обращает внимание существенно меньшая пористость КМС на основе ЗРШ₅₀₀, чем ПКРШ (табл. 3, 4). Объем пор получаемого силиката в случае применения лабораторного образца золы рисовой шелухи на порядок меньше, как и их удельная поверхность и средний размер пор.

В научной литературе отсутствуют данные о влиянии пористости компонентов на вязкость их расплава в процессе твердофазной реакции. Однако можно предположить, что более высокая пористость ПКРШ будет оказывать влияние на эффективность ее взаимодействия с доломитом [14, 15].

Кальций-магниевые силикаты, полученные на основе двух описанных продуктов переработки рисовой шелухи, представляют интерес как наполнители полимеров и бетона, керамической плитки, фар-

фора и т.д. [16–18]. При этом есть сведения [19, 20] о синергическом эффекте волластонита и диопсида при применении их в качестве наполнителей строительных материалов.

Заключение

Изученные в работе силикаты — продукты переработки рисового производства — преимущественно состоят из аморфного диоксида кремния, но отличаются по составу органической фазы. Обе золы рисовой шелухи, промышленная карбонизированная и полученная в лабораторных условиях, имеют щелочную природу поверхности, но существенно отличаются по показателю пористости. Соответственно, данные различия в свойствах основного компонента шихты оказывают влияние на свойства синтезированных кальций-магниевого силикатов.

Так, установлено, что при использовании обоих изученных производных РШ больший выход диопсида наблюдается при избытке доломита в шихте вследствие распада этого кальций-магниевого карбоната с выделением углекислого газа. В случае применения существенно более пористого промышленного диоксида кремния синтезированный твердофазным методом силикат содержит волластонит, который отсутствует в составе конечного продукта на основе полученной в лабораторных условиях золы рисовой шелухи. Все синтезированные силикаты содержат кристаллические диоксиды кремния, концентрация которых выше при большей доле кремнийсодержащего компонента в шихте.

Кальций-магневые силикаты, синтезированные методом твердофазного синтеза из доломита и золы рисовой шелухи, могут быть использованы как наполнители бетона, композитных полимерных материалов, в производстве керамических изделий и т.д.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Лобачева Г.К., Желтобрюхов В.Ф. Состояние вопроса об отходах и современных способах их переработки : уч. пособие. Волгоград : Изд-во ВолГУ, 2005. 176 с.
2. Suhot M.A., Hassan M., Aziz S.A., Daud M.Yu.M. Recent Progress of Rice Husk Reinforced Polymer Composites // *Polymers (Basel)*. 2021. No. 13 (15). P. 2391. DOI: 10.3390/polym13152391
3. Morimoto K., Tsuda K., Mizuno D. Literature review on the utilization of rice husks: focus on application of materials for digital fabrication // *Materials*. 2023. No. 16 (16). P. 5597. DOI: 10.3390/ma16165597
4. Rohani A.B., Rosiyah Y., Seng N.G. Production of High Purity Amorphous Silica from Rice Husk // *Procedia Chemistry*. 2016. Vol. 19. Pp. 189–195. DOI: 10.1016/j.proche.2016.03.092
5. Готлиб Е.М., Зенитова Л.А. Отходы рисопереработки — перспективное сырье для химической промышленности : монография. Ч. 2. Полимерные композиционные материалы, наполненные продуктами рисопереработки. Казань : Отечество, 2023. 100 с.
6. Gotlib E.M., Sokolova A.G., Zenitova L.A., Galimov E.R., Valeeva A.R. Epoxy and polyvinylchloride materials with fillers derived from rice waste // *E3S Web of Conferences*. 2024. Vol. 533. P. 01001. DOI: 10.1051/e3sconf/202453301001
7. Nicoara A.I., Alecu A.E., Balaceanu G.C., Puscasu E.M., Vasile B.S., Trusca R. Fabrication and characterization of porous diopside/akermanite ceramics with prospective tissue // *Engineering Applications Materials*. 2023. Vol. 16 (16). P. 5548. DOI: 10.3390/ma16165548
8. Hamisah I., Roslinda S., Muhammad A.H., Azman J. Synthesis and characterization of nano — wollastonite from rice husk ash and limestone // *Materials Science Forum*. 2013. Vol. 756. No. 5. Pp. 43–47. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.756.43
9. Ramphueiphad S., Homchat K. The continuous carbonisation of rice husk for high yield charcoal production // *SSRN Electronic Journal*. 2022. DOI: 10.2139/ssrn.4052344
10. Козубов М.П., Хохлов Е.В., Исламова Г.Г., Готлиб Е.М., Габдулхаев К.Р. Получение аморфного диоксида кремния в промышленных условиях на базе рисовой шелухи // *Технологии переработки отходов с получением новой продукции : мат. V Всеросс. науч.-практ. конф. Киров, 2023. С. 86–89. EDN QOHQGI*.
11. Твердов И.Д., Готлиб Е.М., Нузму Р.Ш., Ямалеева Е.С. Диопсид как наполнитель эпоксидных полимеров // *Южно-Сибирский научный вестник*. 2023. № 4. С. 11–15. DOI: 10.25699/SSSB.2023.50.4.017. EDN JYNKJY.
12. Твердов И.Д., Готлиб Е.М., Ямалеева Е.С., Холин К.В., Султанов Т.П. Изучение фазовых превращений в процессе твердофазного синтеза диопсида на основе золы рисовой шелухи // *Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий (ВГУИТ)*. 2024. Т. 86. № 2. С 55–58. DOI: 10.20914/2310-1202-2024-2-277-283
13. 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.

14. Mukri B.D., Krushnamurty K., Chowdhury A., Suryakala D., Subrahmanyam C. Alkali-treated carbonized rice husk for the removal of aqueous Cr(IV) // *BioResources*. 2016. No. 11 (4). Pp. 9175–9189.
15. Soltani N., Bahrami A., Pech-Canul M.I., Gonzalez L.A. Review on the physicochemical treatments of rice husk for production of advanced materials // *Chemical Engineering Journal*. 2015. Vol. 264. Pp. 899–935. DOI: 10.1016/j.cej.2014.11.056
16. Вережанин Г.К., Меньшикова А.Е., Бурученко А.Е., Могилевская Н.В. Керамические материалы на основе диопсида // *Стекло и керамика*. 2010. Т. 83. № 11. С. 13–16. EDN NBKRMB.
17. Меньшикова В.К., Демина Л.Н. Модификация керамических составов сырьевыми материалами Сибирского региона // *Вестник Евразийской науки*. 2020. Т. 12. № 4. С. 1–9. URL: <https://esj.today/PDF/02SAVN420.pdf>
18. Вережанин 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.
19. Nguyen M., Sokolar R. The influence of the raw materials mixture on the properties of forsterite ceramics // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2018. Vol. 385 (1). P. 012039. DOI: 10.1088/1757-899X/385/1/012039
20. Tzong-Horng Liou, Yuan Hao Liou. Utilization of rice husk ash in the preparation of graphene-oxide-based mesoporous nanocomposites with excellent adsorption performance // *Materials (Basel)*. 2021. No. 14 (5). P. 1214. DOI: 10.3390/ma14051214

REFERENCES

1. Lobacheva G.K., Zheltobryukhov V.F. *The State of Issue Regarding By-products and the Modern Methods of Their Processing : teaching aid*. Volgograd, Editing House VolGU, 2005; 176. (rus).
2. Suhot M.A., Hassan M., Aziz S.A., Daud M.Yu.M. Recent progress of rice husk reinforced polymer composites. *Polymers (Basel)*. 2021; 13:2391. DOI: 10.3390/polym13152391
3. Morimoto K., Tsuda K., Mizuno D. Literature review on the utilization of rice husks: focus on application of materials for digital fabrication. *Materials*. 2023; 16(16):5597. DOI: 10.3390/ma16165597
4. Rohani A.B., Rosiyah Y., Seng N.G. Production of high purity amorphous silica from rice husk. *Procedia Chemistry*. 2016; 19:189-195. DOI: 10.1016/j.proche.2016.03.092
5. Gotlib E.M., Zenitova L.A. *Rice processing waste — promising raw material for the chemical industry : monograph. Part 2. Polymer composite materials filled with rice processing products*. Kazan, Otechestvo, 2023; 100. (rus).
6. Gotlib E.M., Sokolova A.G., Zenitova L.A., Galimov E.R., Valeeva A.R. Epoxy and polyvinylchloride materials with fillers derived from rice waste. *E3S Web of Conferences*. 2024; 533:01001. DOI: 10.1051/e3sconf/202453301001
7. Nicoara A.I., Alecu A.E., Balaceanu G.C., Puscasu E.M., Vasile B.S., Trusca R. Fabrication and characterization of porous diopside/akermanite ceramics with prospective tissue. *Engineering Applications Materials*. 2023; 16(16):5548. DOI: 10.3390/ma16165548
8. Hamisah I., Roslinda S., Muhammad A.H., Azman J. Synthesis and Characterization of Nano — Wollastonite from Rice Husk Ash and Limestone. *Materials Science Forum*. 2013; 756(5):43-47. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.756.43
9. Ramphueiphad S., Homchat K. The continuous carbonisation of rice husk for high yield charcoal production. *SSRN Electronic Journal*. 2022. DOI: 10.2139/ssrn.4052344
10. Kozubov M.P., Khokhlov E.V., Islamova G.G., Gotlib E.M., Gabdulkhayev K.R. Obtaining of Amorphous Silicon Dioxide in Industrial Conditions on the Base of Rice Husk. *Technologies of Waste Processing with Obtaining of New Products. Proceedings of V All-Russian Scientific and Practical conference*. Kirov, 2023; 86-89. EDN QOHQJ. (rus).
11. Tverdov I.D., Gotlib E.M., Ntsoumou R.Sh., Yamaleeva E.S. Diopside as a filler of epoxy polymers. *South-Siberian Scientific Bulletin*. 2023; 4:11-15. DOI: 10.25699/SSSB.2023.50.4.017. EDN JYNKJY. (rus).
12. Tverdov I.D., Gotlib E.M., Yamaleeva E.S., Kholin K.V., Sultanov T.P. The study of phase transitions in the process of solid phase synthesis of diopside on the base of rice husk ash. *Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies*. 2024; 86(2):55-58. DOI: 10.20914/2310-1202-2024-2-277-283 (rus).
13. 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.
14. Mukri B.D., Krushnamurty K., Chowdhury A., Suryakala D., Subrahmanyam C. Alkali-treated carbonized rice husk for the removal of aqueous Cr(IV). *BioResources*. 2016; 11(4):9175-9189.
15. Soltani N., Bahrami A., Pech-Canul M.I., Gonzalez L.A. Review on the physicochemical treatments of rice husk for production of advanced materials. *Chemical Engineering Journal*. 2015; 264:899-935. DOI: 10.1016/j.cej.2014.11.056

16. Vereshchagin G.K., Men'shikova A.E., Buruchenko A.E., Mogilevskaya N.V. Ceramic materials on the diopside base. *Glass and Ceramics*. 2010; 83(11):13-16. EDN NBKRMB. (rus).
17. Men'shikova V. K., Dyomina L.N. Modification of ceramic compositions with raw materials of the Siberian region. *The Eurasian Scientific Journal*. 2020; 12(4):1-9. URL: <https://esj.today/PDF/02SAVN420.pdf> (rus).
18. Vereshchagin V.I., Mogilevskaya N.V., Safonova T.V. Clinkering and strength of wall ceramics and semi-porcelain of compositions from clayey and diopside-containing raw materials. *Journal of Construction and Architecture*. 2019; 21(6):122-131. DOI: 10.31675/1607-1859-2019-21-6-122-133. EDN TFUCTT. (rus).
19. Nguyen M., Sokolar R. The influence of the raw materials mixture on the properties of forsterite ceramics. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*. 2018; 385(1):012039. DOI: 10.1088/1757-899X/385/1/012039
20. Tzong-Horng Liou, Yuan Hao Liou. Utilization of rice husk ash in the preparation of graphene-oxide-based mesoporous nanocomposites with excellent adsorption performance. *Materials (Basel)*. 2021; 14(5):1214. DOI: 10.3390/ma14051214

Поступила 08.01.2025, после доработки 02.02.2025;

принята к публикации 04.02.2025

Received January 8, 2025; Received in revised form February 2, 2025;

Accepted February 4, 2025

Информация об авторах

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; Scopus AuthorID: 57202822282; e-mail: as.falconi@yandex.ru

ГАБДУЛХАЕВ Камиль Радикович, аспирант кафедры технологии синтетического каучука, Казанский национальный исследовательский технологический университет, 420015, Россия, г. Казань, ул. Карла Маркса, 68; Scopus AuthorID: 59485045700; e-mail: 19gkraikido99@mail.ru

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

Вклад авторов:

Соколова А.Г. — идея; обработка материала; написание статьи.

Габдулхаев К.Р. — сбор и обработка материала.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about authors

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

Kamil R. GABDULKHAYEV, PhD student of the Department of the Syntetic Rubber Technology, Kazan National Research Technological University, Karl Marx st., 68, Kazan, 420015, Russian Federation; Scopus AuthorID: 59485045700; e-mail: 19gkraikido99@mail.ru

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

Contribution of the authors:

Sokolova A.G. — idea; processing of the material; writing the article.

Gabdulkhayev K.R. — collection of the data; processing of the data.

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

The authors declare that there is no conflict of interest.