

Е. М. Готлиб, Т. Р. Шакиров

СРАВНЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ ПОЛУЧЕНИЯ ВОЛЛАСТОНИТ И ДИОПСИД СОДЕРЖАЩИХ НАПОЛНИТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ ПРОДУКТОВ ПЕРЕРАБОТКИ РИСОВОЙ ШЕЛУХИ

Ключевые слова: волластонит, диопсид, зола рисовой шелухи, диоксид кремния, твердофазный синтез, карбонаты кальция и магния, фазовый состав, пористость, технологическая схема.

Использование волластонита и диопсида в различных отраслях, включая строительство и биоинженерию является актуальным на сегодняшний день. Синтез этих минералов из отходов, таких как рисовая шелуха, представляет собой не только экономически выгодный, но и экологически рациональный подход. Импортозамещение в области минеральных наполнителей может значительно снизить зависимость от зарубежных поставок и способствовать развитию отечественной промышленности. Использование сельскохозяйственных отходов для получения полезных материалов также соответствует современным тенденциям в области устойчивого развития и переработки ресурсов. Сравнительный анализ процессов твердофазного синтеза волластонита и диопсида, может помочь в оптимизации технологий и улучшении экономических показателей. Важно учитывать не только содержание целевых минералов, но и затраты на энергию, сырье и время обработки. Волластонит и диопсид содержащие наполнители успешно применяются для производства полимерных и строительных материалов, и как основа биокерамики. Из-за преимущественного импорта этих минералов, перспективным является твердофазный синтез их на основе кремнийсодержащих производных рисовой шелухи. При синтезе силиката кальция с использованием известняка и диоксида кремния из рисовой шелухи, содержание β -волластонита в фазовом составе полученного продукта существенно ниже, чем в природном Миволл 30-97. Поэтому, предложено предварительно получать оксид кальция из известняка, что существенно увеличивает содержание игольчатой структуры минерала в продукте твердофазной реакции. В случае получения кальций магниевого силиката для обеспечения высокого содержания в них диопсида достаточно термобработки рисовой шелухи при 500⁰С и взаимодействия ее с доломитом в присутствии борной кислоты, как плавня. Таким образом, оптимальный технологический процесс твердофазного синтеза диопсид содержащих наполнителей, существенно проще, чем волластонит содержащих, он менее трудозатратный, хотя и требует несколько более высоких (на 200⁰С) температур. Сравнительный анализ процессов твердофазного синтеза этих минералов может выявить оптимальные условия для их получения, что, в свою очередь, может привести к снижению затрат и повышению эффективности производства кальций магниевого силиката.

Е. М. Gotlib, T. R. Shakirov

COMPARISON OF OPTIMAL PROCESS MODES FOR PRODUCING WOLLASTONITE AND DIOPSIDE-CONTAINING FILLERS BASED ON RICE HUSK PROCESSING PRODUCTS

Keywords: wollastonite, diopside, rice husk ash, silicon dioxide, solid-phase synthesis, calcium and magnesium carbonates, phase composition, porosity, process diagram.

The use of wollastonite and diopside in various industries, including construction and bioengineering, is relevant today. Synthesis of these minerals from waste, such as rice husk, is not only an economically advantageous, but also an environmentally sustainable approach. Import substitution in the field of mineral fillers can significantly reduce dependence on foreign supplies and promote the development of domestic industry. The use of agricultural waste to obtain useful materials also corresponds to modern trends in the field of sustainable development and resource recycling. Comparative analysis of the processes of solid-phase synthesis of wollastonite and diopside can help in optimizing technologies and improving economic indicators. It is important to take into account not only the content of target minerals, but also the cost of energy, raw materials and processing time. Wollastonite and diopside containing fillers are successfully used for the production of polymer and building materials, and as a basis for bioceramics. Due to the predominant import of these minerals, their solid-phase synthesis based on silicon-containing derivatives of rice husk is promising. When synthesizing calcium silicate using limestone and silicon dioxide from rice husk, the content of β -wollastonite in the phase composition of the resulting product is significantly lower than in natural Mivall 30-97. Therefore, it is proposed to preliminarily obtain calcium oxide from limestone, which significantly increases the content of the acicular structure of the mineral in the product of the solid-phase reaction. In the case of obtaining calcium magnesium silicates, to ensure a high content of diopside in them, it is sufficient to heat treat rice husks at 500⁰С and interact with dolomite in the presence of boric acid as a flux. Thus, the optimal technological process of solid-phase synthesis of diopside-containing fillers is significantly simpler than wollastonite-containing ones, it is less labor-intensive, although it requires somewhat higher (by 200⁰С) temperatures. Comparative analysis of solid-phase synthesis processes of these minerals can reveal optimal conditions for their production, which in turn can lead to cost reduction and increased production efficiency.

Введение

Волластонит и диопсид содержащие наполнители успешно применяются при производстве керамиче-

ской плитки, пенобетона, покрытий кирпича, вулканизаторов синтетических и натурального каучуков, полимерных материалов и т.д. [1-5]. Они также интересны для биоинженерии костной ткани [6].

Отечественные природные волластонит и диопсид содержащие наполнители практически отсутствуют на рынке, несмотря на наличие месторождений этих минералов в нашей стране. Это связано с трудоемкостью добычи и измельчения данных твердых пород [7]. Поэтому синтез описанных кальций магниевых силикатов (КМС) представляет практический интерес. Так, более трети мирового потребления волластонита приходится на синтетический силикат кальция

β -волластонит можно получить из смеси мела и опоки твердофазным методом [8], по принципиальной схеме, которая включает следующие операции: смешивание компонентов в соотношении $\text{CaO}:\text{SiO}_2 \sim 0,7:1 \rightarrow$ их совместный помол (до размеров частиц менее 80 мкм) \rightarrow увлажнение смеси \rightarrow получение образцов методом пластического формования \rightarrow сушка (при 100 °С) \rightarrow обжиг (с выдержкой 3 часа при конечной температуре 1120 – 1150 °С) \rightarrow дробление \rightarrow измельчение

КМС особенно перспективно получать на основе отходов сельского хозяйства и промышленности. Так, известен [9] гидротермальный синтез волластонита на основе взятых в стехиометрическом соотношении побочного продукта получения борной кислоты (борогипса) и раствора гидроксида калия, который проводили в лабораторном автоклаве при температуре 220 °С и давлении 20 – 23 атм в течение 3 часов. Затем, промывали осадок, нагретой до 60–70 °С дистиллированной водой, отделяли от раствора фильтрованием и сушили при температуре 85 °С в течение 4 часов. и далее обжигали при температуре 900 °С 3 часа.

В работе [9] этот силикат кальция был синтезирован на основе золы, содержащей 79 % диоксида кремния, полученной обжигом рисовой соломы при 950°С в течение одного часа, и оксида кальция, полученного, путём прокаливания известняка при 1100 °С в течение 5 часов, при соотношении этих компонентов 45:55. Смесь золы и CaO вымачивали в дистиллированной воде и перемешивали вручную в течение 10 минут. Далее эту смесь автоклавились при 135 °С в течение 8 часов, после чего ее охлаждали при комнатной температуре. Полученный белый осадок сушили при 90 °С в течение 24 часов, измельчали и спекали при 950 °С 3 часа.

Твердофазный синтез кальций магниевых силикатов (КМС) более простой и менее трудозатратный, чем гидротермальный, что делает его более привлекательным для промышленного применения, из-за возможности снижения затрат на производство и повышение его эффективности.

Поэтому, мы провели сравнительный анализ процессов получения диопсид и волластонит содержащих наполнителей, который может способствовать оптимизации технологии их синтеза и улучшению экономических показателей [10,11].

Экспериментальная часть

Процесс синтеза диопсида и волластонита проводился твердофазным методом. Эти КМС были синтезированы в муфельной печи при температурах 900 °С

и 1100 °С. Исходные материалы включали золу рисовой шелухи (ЗРШ) и доломит, а также диоксид кремния из рисовой шелухи и известняка в соотношении 1:1,2. Для диопсида использовалась 5% борная кислота в качестве плавня [9].

ЗРШ и доломит соответствуют стандартам (ГОСТ 23672-2020 и ГОСТ 26826-86), а волластонит марки Миволл 10-97 - ТУ 577-006-40705684-2003.

Рентгенографический количественный фазовый анализ (РКФА) синтезированных материалов проводился с использованием порошкового рентгеновского дифрактометра POWDIX 600. Параметры съемки включали угловой интервал от 3 до 65 ° и шаг сканирования 0,02.

Данные о размерах областей когерентного рассеяния были получены методом Паули и проанализированы с использованием общепринятых формул [10]. Расчеты и диаграммы были выполнены с помощью Microsoft Excel.

Пористость силикатов определялась на анализаторе удельной поверхности и размеров пор «TOP 200» (Altamira Instruments, LLC) статическим волюметрическим методом низкотемпературной адсорбции азота, общий объем и средний диаметр пор считывались по методу ВЖН.

Обсуждение результатов

Диоксид кремния (ДК) из рисовой шелухи получали [12] по следующей схеме (рис.1.) Рисовая шелуха подвергалась прокаливанию при $T=500^{\circ}\text{C}$ в течение 3 часов в муфельной печи. В емкостной реактор с механическим перемешивающим устройством подавалась зола рисовой шелухи и 12% масс. раствор гидроксида натрия при соотношении их 1:3 и температуре 25°С. Суспензия перемешивалась в течение 24 часов, а затем, силикат натрия отделялся на пресс-фильтре и смешивался с 12% раствором соляной кислоты. Осадок после кислотной обработки промывался, обезвоживался и прокаливался при 550°С в течение 3 часов в трубчатой печи.

Далее диоксид кремния из рисовой шелухи был использован для получения силиката кальция путем твердофазной реакции с известняком.

Полученный продукт (рис.2) содержал 30 мас. % β -волластонита, 64 мас. % волластонита I A, 4 мас. % кристобалита и 2 мас. % ларнита.

Кристобалит – высокотемпературная модификация кристаллического диоксида кремния.

Ларнит – островной силикат кальция Ca_2SiO_4 .

β -волластонит имеет игольчатую структуру, наличие которой, согласно литературным данным [7], обеспечивает высокую эффективность модифицирующего действия этого силиката кальция, поэтому он является для нас главным целевым продуктом.

У природного минерала Миволл 10-97 содержащий β -волластонита составляет порядка 80 мас. % [13].

Все фазы в исследованных образцах хорошо окристаллизованы, так как пики на дифрактограммах достаточно выражены (рис.2), что позволило провести полно профильный анализ и определить размер

кристаллитов наполнителей, через вычисление области когерентного рассеяния.

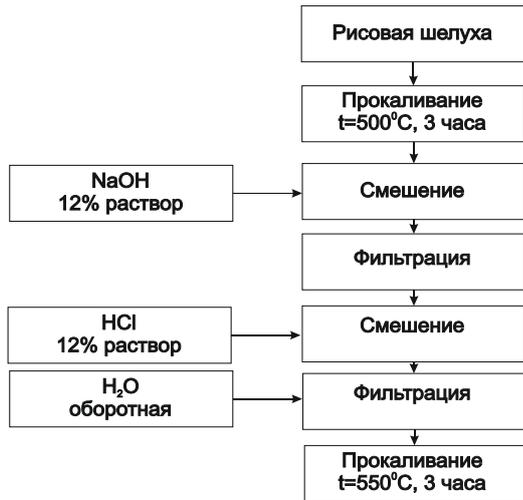


Рис. 1 – Схема получения диоксида кремния из рисовой шелухи
Fig. 1 – Diagram of silicon dioxide production from rice husks

Синтетический волластонит имеет меньший общий объем пор, по сравнению с Миволл 10-97, а средний размер их примерно на одном уровне. (табл. 1). Размер кристаллитов природного волластонита больше, чем у синтетического силиката кальция (табл. 1).

Небольшое количество β-волластонита в фазовом составе наполнителя, синтезированного на основе ДК и карбоната кальция (30 масс. %), по сравнению с природным минералом (80 масс. %), свидетельствует о не оптимальном технологическом режиме и неэффективных компонентах для его получения.

Первым этапом твердофазного синтеза КМС является декарбонизация кальций и магниевых карбонатов [3]. Поэтому, мы на следующем этапе исследования использовали вместо карбоната кальция его оксид, для чего предварительно прогревали известняк в течение 2 часов при 900 °С [13].

Полученный на основе смеси ДК : СаО наполнитель содержит (рис. 3) преимущественно β-волластонит (78 мас.%) и, в качестве примесного компонента- ларнит (22 мас.%).

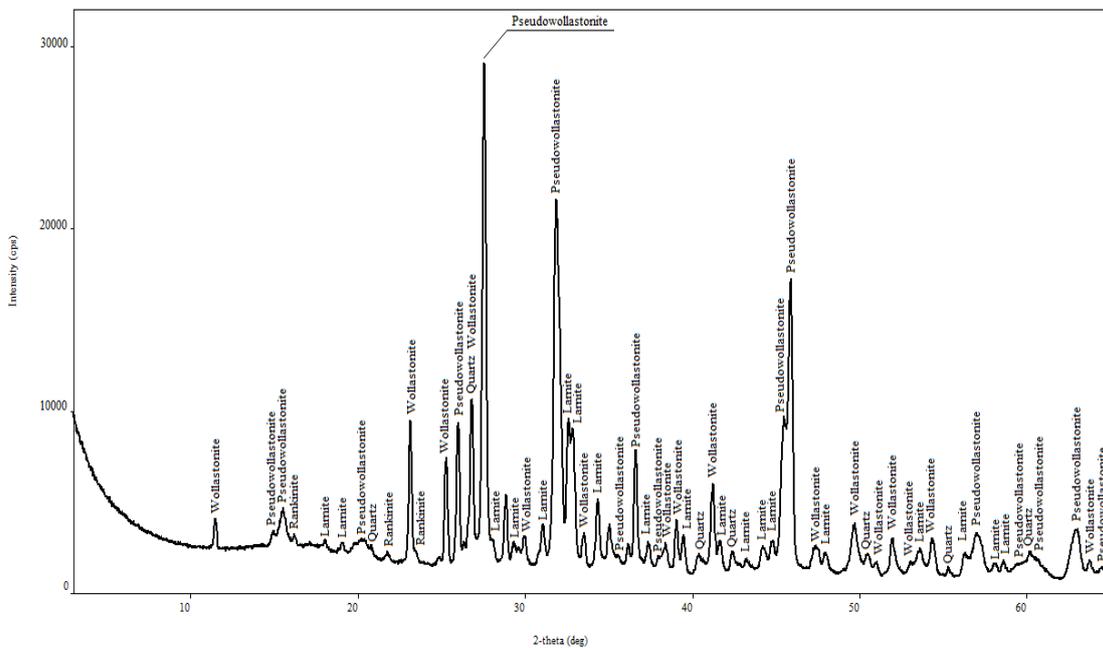


Рис. 2 – РКФА – спектр образца силиката кальция на основе смеси CaCO₃ и SiO₂ - 1,2:1
Fig. 2 – X-rayFA – spectrum of a calcium silicate sample based on a mixture of CaCO₃ and SiO₂ - 1.2:1

Таблица 1 - Характеристики пористости и размер кристаллитов природного и синтетического волластонита

Table 1 - Porosity characteristics and crystallite size of natural and synthetic wollastonite

Тип наполнителя	Размер кристаллитов, нм	Общий объем пор по ВЖ, см ³ /г	Средний диаметр пор по ВЖ, нм
Синтетический волластонит	4340	0,010	3,673
Миволл 10-97	5850	0,017	3,491

Размер кристаллитов β-волластонита -2790 нм. Общий объем пор образца этого синтетического волластонита - 0,081 см³/г, а средний размер пор -4,12 нм. Таким образом, у полученного с применением оксида кальция наполнителя выше пористость, чем при использовании известняка (табл. 1).

Оптимальная схема (рис. 4) получения силиката кальция с высоким содержанием β-волластонита (78 %) следующая[13]. Известняк прокаливается в муфельной печи при T=900°С в течении 2 часов, затем в смесителе гомогенизируется с золой рисовой шелухи и истирается в шаровой мельнице до 0,5 мкм. В шихту вводят 20% масс. воды и термостатируют при

$T=35^{\circ}\text{C}$ в течении 24 часов. После стабилизации и вылеживания полученная масса прокаливается $T=900^{\circ}\text{C}$ в течении 3 часов. После прокаливания силикат каль-

ция подвергается истиранию до необходимой степени дисперсности в планетарной шаровой мельнице со скоростью 800 об/мин.

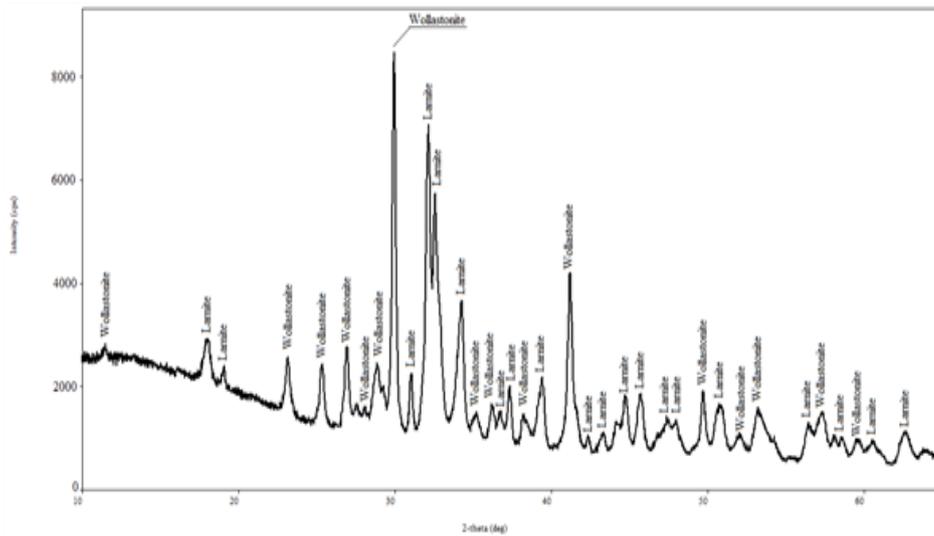


Рис. 3 – РКФА-спектр образца волластонита, синтезированного твердофазным методом при температуре 900°C в течении 2 часов на основе ДК : CaO
 Fig. 3 – X-rayFA spectrum of a wollastonite sample synthesized by the solid-phase method at a temperature of 900°C for 2 hours based on SiO_2 : CaO

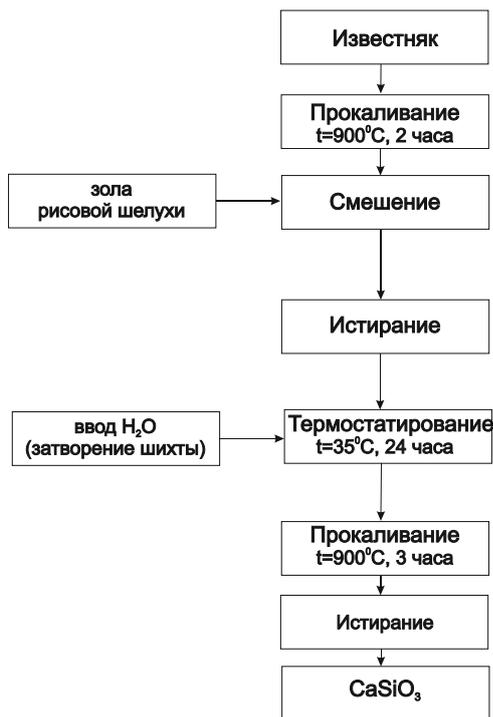


Рис. 4 – Оптимальная схема получения синтетического волластонита из ДК на основе рисовой шелухи и известняка

Fig. 4 – Optimal scheme for obtaining synthetic wollastonite from SiO_2 based on rice husks and limestone

При синтезе КМС на основе ЗРШ и CaMgCO_3 , содержание диопсида в продукте твердофазной реакции составляет 97 масс.% [14,15]. Хвостовыми компонентами являются кристаллические диоксиды кремния; кристобалит и тридимит (рис.5).

Оптимальная технологическая схема твердофазного синтеза кальций магниевого силиката представлена на рис 6.

Интересно отметить, что технология получения диопсид содержащего наполнителя [16,17]. на основе продукта переработки отхода рисового производства намного проще, чем волластонита (рис.4 и б).

В последнем случае, для обеспечения высокого выхода целевого продукта (78 масс. %) требуется три стадии реакции: довольно трудоемкое получение диоксида кремния из рисовой шелухи, затем получение диоксида кальция из известняка, и только затем твердофазный синтез волластонита.

Твердофазная реакция синтеза диопсида таким образом, двухстадийная, хотя и требует более высоких температур, чем при получении волластонита, даже при применении плавня. Предварительно нужно только получить ЗРШ, термообработкой рисовой шелухи 3 часа при 500°C . Кроме того, в принципе можно использовать промышленную карбонизированную рисовую шелуху [18], что еще упростит процесс и сделает его одностадийным.

При получении диопсида нет необходимости в дополнительных технологических операциях, используемых при синтезе силиката кальция, увлажнении и прокаливании о известняка (рис. 4 и 6).

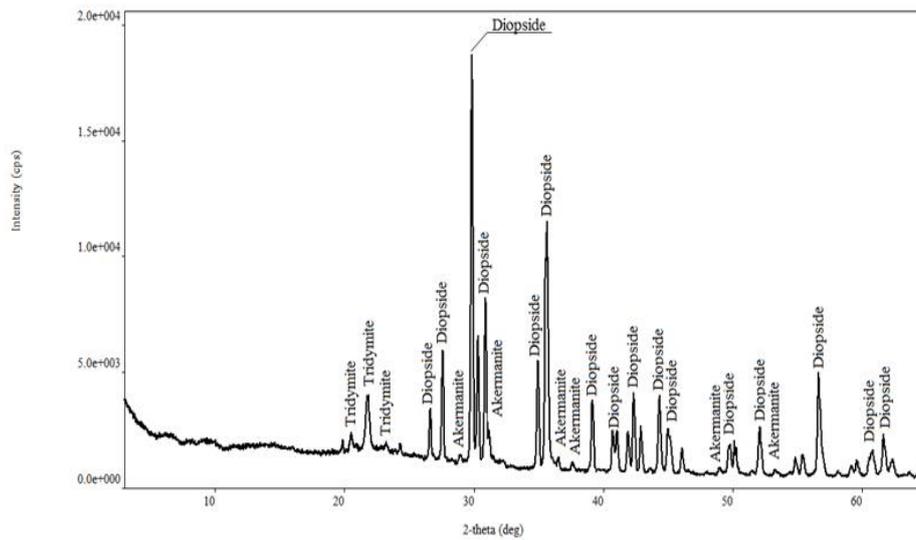


Рис. 5 – РКФА-спектр образца диопсид содержащего наполнителя, полученного из смеси ЗРШ: доломит
 Fig. 5 – X-rayFA spectrum of a diopside sample containing filler obtained from a mixture of rice husk ash (RHA) : dolomite



Рис. 6 – Оптимальная схема получения синтетического диопсида на основе рисовой шелухи и доломита

Fig. 6 – Optimal scheme for obtaining synthetic diopside based on rice husks and dolomite

Таблица 2 – Химизм процесса твердофазных диссоциаций карбонат содержащего сырья
 Table 2 – Chemistry of the solid-phase dissociation process of carbonate-containing raw materials

Температурный интервал	Химический процесс
600-650°C	$MgCO_3 \rightarrow MgO + CO_2\uparrow$
700-800°C	$CaCO_3 \cdot MgCO_3 \rightarrow (CaCO_3 + MgO) + CO_2\uparrow$
800-900°C	$[CaCO_3 + MgO] \rightarrow (CaO + MgO) + CO_2\uparrow$
900-1100°C	$CaCO_3 \rightarrow CaO + CO_2\uparrow$

Мы объясняем эти различия тем, что температура разложения углекислого магния ниже (в пределах

570–750 °С), чем для углекислого кальция (890–900°C) [19].

Реакции разложения карбонатов приведены в таблице 2 [20,21].

В тоже время, температура начала получения диопсида (900°C) выше, чем волластонита (800°C). Поэтому, до начала получения диопсида декарбонизация $CaMgCO_3$ успевает пройти полностью, в то время как этот процесс для карбоната кальция проходит параллельно с образованием β-волластонита.

Последнее может быть причиной низкой концентрации основного целевого продукта в случае применения известняка и необходимости его предварительной декарбонизации.

Заключение

Содержание диопсида существенно выше, чем волластонита, в продуктах твердофазной реакции, при получении этих силикатов на базе рисовой шелухи. При этом, процесс синтеза диопсид содержащих наполнителей, существенно проще, чем волластонит содержащих, он менее трудозатратный, не нуждается во многих дополнительных реактивах и специальной обработке исходной шихты, хотя и требует несколько более высоких (на 200°C) температур, а также использования плавня.

Литература

1. Bartenieva E.A. *International Research Journal*, **9** (63), 56-63 (2017).
2. Sung H. *Polymers and Polymer Composites*, **9** (29), 1422–1429 (2020).
3. Верещагин В.И. Бурученко А.Е. Меньшикова В.К. *Современные проблемы науки и образования*, **1**, (2015).
4. He M., Zhang R., Zhou H., *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, **22**, 389-393 (2011).
5. V.I. Ovcharov, È.Ì. Sukhyy, L.À. Sokolova, V.L. Kalinyuk, O.A. Tertyshnyy, L.R. Yusupova, E.A. Belyanovskaya, *Voprosy khimii i khimicheskoi tekhnologii*, **3**, 79-89 (2018).
6. Roslinda Shamsudin, Farah Atiqah Abdul Azam, Muhammad Azmi Abdul Hamid, Hamisah Ismail, *Ash and Limestone Materials (Basel)*, **17** (2017).

7. Г.Г. Исламова Автореф. канд. техн. наук, Казанский нац. исслед. технол. ун-т, Казань, 2012. 20 с.
8. Ярусова С.Б., Буравлев И.Ю., Слепцова С.А., Игнатиева Е.Г., Ягофаров В.Ю., Годиев П.С., Охлопкова А.А. *Полимерные материалы и технологии*. Т. 7, **1**, 71–82 (2021). doi.org/10.32864/polymmattech-2021-7-1-71-82
9. Патент РФ 2595682. Способ получения синтетического волластонита. П. С. Гордиенко, С. Б. Ярусова, В. А. Степанова [и др.] 2012.
10. Arjmandi R., Hassan A., Majeed K., Zakaria Z. *International Journal of Polymer Science*, 32 (2015).
11. Tverdov I.D., Dutova V.S., Gotlib E.M., Galimov E.R. *Scientific research of the SCO countries: synergy and integration*, **6**, 119-124 (2024).
12. Твердов И.Д. *Южно-Сибирский научный вестник*, **4**, 11-15 (2023).
13. Ха Тхи Нья Фыонг. Дисс. канд. техн. наук, Казан. национальный исслед. технол. ун-т, Казань, 2021. 156 с.
14. Готлиб Е.М. *Вестник технологического университета*, **7**, Т. 22, 42–46 (2019).
15. Готлиб Е.М. *Вестник томского государственного университета. Химия*, **13**, 13–19 (2019).
16. Твердов И.Д., Готлиб Е.М., Ямалеева Е.С., Холин К.В., Султанов Т.П. *Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий*, 55-58 (2024).
17. Janaína Fernandes, Ramon Vieira Santosb, Emanuele Caroline Araujo dos Santosa, Tatiana Louise Avila Campos Rochac, Nei Sebastião Domingues Juniorb, Carlos Alberto Mendes Moraesd. *Ash in Epoxy Composites: A Comparative Analysis Materials Research*, **21**(3) (2018).
18. Готлиб Е.М., Козубов М.П., Хохлов Е.В. *Вестник ЮУрГУ. Серия Химия*, **4**, Т.16, 121–126 (2024). DOI: 10.14529/chem240411
19. Смирнская В.Н. *Химическая технология тугоплавких неметаллических и силикатных материалов*. Томск: ТПУ, 2006. 36 с.
20. Hamisah I. *Materials Science Forum*, **5**, 756 (2013).
21. В.И. Шишкина Автореф. дисс. техн. наук, Институт огнеупоров и стройматериалов, Алма-Ата, 1949. 11 с.
5. V.I. Ovcharov, È.Ì. Sukhyy, L.À. Sokolova, V.L. Kalinyuk, O.A. Tertyshnyy, L.R. Yusupova, E.A. Belyanovskaya, *Voprosy khimii i khimicheskoi tekhnologii*, **3**, 79-89 (2018).
6. Roslinda Shamsudin, Farah Atiqah Abdul Azam, Muhammad Azmi Abdul Hamid, Hamisah Ismail, Ash and Limestone Materials (Basel), 17 (2017).
7. G.G. Islamova, Author's abstract of candidate of technical sciences, Kazan National Research Technological University, Kazan, 2012. 20 p.
8. Yarusova S.B., Buravlev I.Yu., Sleptsova S.A., Ignatieva E.G., Yagofarov V.Yu., Godienko P.S., Okhlopkova A.A. *Polymer Materials and Technologies*. Vol. 7, **1**, 71–82 (2021). doi.org/10.32864/polymmattech-2021-7-1-71-82
9. Russian Federation Patent 2595682. Method for producing synthetic wollastonite. P. S. Gordienko, S. B. Yarusova, V. A. Stepanova [et al.]. 2012.
10. Arjmandi R., Hassan A., Majeed K., Zakaria Z. *International Journal of Polymer Science*, 32 (2015).
11. Tverdov I.D., Dutova V.S., Gotlib E.M., Galimov E.R. *Scientific research of the SCO countries: synergy and integration*, **6**, 119-124 (2024).
12. Tverdov I.D. *South Siberian Scientific Bulletin*, **4**, 11-15 (2023).
13. Ha Thi Nha Phuong. Dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences, Kazan National Research Technological University, Kazan, 2021. 156 p.
14. Gotlib E.M. *Herald of Technological University*, **7**, Т. 22, 42–46 (2019).
15. Gotlib E.M. *Bulletin of Tomsk State University. Chemistry*, **13**, 13–19 (2019).
16. Tverdov I.D., Gotlib E.M., Yamaleeva E.S., Kholin K.V., Sultanov T.P. *Bulletin of Voronezh State University of Engineering Technologies*, 55-58 (2024).
17. Janaína Fernandes, Ramon Vieira Santosb, Emanuele Caroline Araujo dos Santosa, Tatiana Louise Avila Campos Rochac, Nei Sebastião Domingues Juniorb, Carlos Alberto Mendes Moraesd. *Ash in Epoxy Composites: A Comparative Analysis Materials Research*, **21**(3) (2018).
18. Gotlib E.M., Kozubov M.P., Khokhlov E.V. *Bulletin of South Ural State University. Chemistry Series*, **4**, Vol. 16, 121–126 (2024). DOI: 10.14529/chem240411
19. Smirenskaya V.N. Chemical Technology of Refractory Non-Metallic and Silicate Materials. Tomsk: TPU, 2006. 36 p.
20. Hamisah I. *Materials Science Forum*, **5**, 756 (2013).
21. V.I. Shishkina Author's abstract of dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences, Institute of Refractories and Building Materials, Alma-Ata, 1949. 11 p.

References

1. Bartenieva E.A. *International Research Journal*, **9** (63), 56-63 (2017).
2. Sung H. *Polymers and Polymer Composites*, **9** (29), 1422–1429 (2020).
3. Vereshchagin V.I., Buruchenko A.E., Menshikova V.K. *Contemporary Problems of Science and Education*, **1**, (2015).
4. He M., Zhang R., Zhou H., *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, **22**, 389-393 (2011).

© **Е. М. Готлиб** - доктор технических наук, профессор кафедры Технологии синтетического каучука, Казанский национальный исследовательский технологический университет (КНИТУ), Казань, Россия, egotlib@yandex.ru; **Т. Р. Шакиров** – кандидат технических наук, доцент кафедры Технологии неорганических веществ и материалов, КНИТУ, timurtnvm@yandex.ru.

© **E. M. Gotlib** - Doctor of Sciences (Technical Sci.), Professor of the department of Synthetic Rubber Technologies, Kazan National Research Technological University (KNRTU), Kazan, Russia, egotlib@yandex.ru; **T. R. Shakirov** – PhD (Technical Sci.), Associate professor of the department of Technology of Inorganic Substances and Materials, KNRTU, timurtnvm@yandex.ru.

Дата поступления рукописи в редакцию – 19.03.25.

Дата принятия рукописи в печать – 21.04.25.