

## Механохимическая обработка природного сырья и техногенных отходов для получения теплоизоляционных материалов

А.Е. Матен<sup>1,2\*</sup>, Б.С. Садыков<sup>1</sup>, А.Б. Артықбаева<sup>1,2</sup>,  
А.С. Әділхан<sup>2</sup>, А.О. Жапекова<sup>1,3</sup>, А.Е. Баққара<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Институт проблем горения, ул. Богенбай батыра, 172, Алматы, Казахстан

<sup>2</sup>Казахский национальный университет им. аль-Фараби, пр. аль-Фараби, 71, Алматы, Казахстан

<sup>3</sup>Казахский национальный женский педагогический университет, ул. Гоголя, 114, Алматы, Казахстан

### Информация о статье

Получено  
04.06.2025

Получено в исправленном виде  
01.07.2025

Принято  
15.08.2025

#### Ключевые слова:

диатомит; золошлак;  
теплоизоляционные  
материалы; механохимическая  
обработка; композитная  
структура; графит;  
утилизация отходов;  
переработка отходов

### АННОТАЦИЯ

Разработка энергоэффективных и экологически безопасных строительных материалов на основе природного и техногенного сырья представляет собой актуальную задачу современных материаловедческих исследований. В данной работе представлены составы теплоизоляционных материалов на основе диатомита и золошлака, активированных методом механохимической обработки. Исследовано влияние содержания графита (10%, 20 %) на теплопроводность, прочность и водопоглощение композитов. Наилучшие характеристики зафиксированы для золошлака с добавлением 10% графита: теплопроводность – 0,1136 Вт/(м·К), прочность – 19,86 МПа. Минимальное значение теплопроводности для диатомита составило 0,157 Вт/(м·К), при этом наблюдалось ухудшение прочностных характеристик. Полученные материалы обладают сбалансированными эксплуатационными свойствами и могут быть применены в строительстве с целью повышения энергоэффективности и рационального использования минеральных ресурсов.

## 1. Введение

Низкоэнергетические и экологически безопасные теплоизоляционные материалы являются ключевым элементом стратегии углеродной нейтральности строительного сектора [1]. Среди минеральных ресурсов, пригодных для этой цели, диатомит выделяется развитой микропористой структурой (удельная поверхность 20-35 м<sup>2</sup>·г) и малой объемной массой (120-300 кг/м<sup>3</sup>), что обеспечивает низкий коэффициент теплопроводности без применения органических вспенивателей [2]. Потенциальным минеральным наполнителем-партнером для диатомита служат золошлаковые отходы тепловых электростанций, содержащие до 60% реакционноспособного аморфного SiO<sub>2</sub> и Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> [3]. Использование техногенных алюмосиликатов позволяет снизить себестоимость композиции и одновременно решить задачу утилизации промышленных отходов.

Главными ограничениями природного диатомита и золошлака остаются недостаточная механическая прочность и высокая гигроскопичность, что препятствует их применению во влажных средах [4]. Перспективным путем устранения этих недостатков является механохимическая обработка (МХО) – высокоэнергетическое тонкое измельчение, сопровождаемое дефектогенезом, аморфизацией и генерацией активных поверхностных центров без высокотемпературного обжига [5]. Применение центробежно-планетарной мельницы «NXQM-2A» (Китай) обеспечивает удельную энергоемкость воздействия до 8-10 кДж·г и допускает точное регулирование времени, скорости и массового соотношения «порошок/шаровая загрузка», что критически важно для воспроизводимости фазо-морфологических преобразований [6]. Дополнительная модификация активированного сырья путем введения графита (5-10%) рассматривается как способ уменьшения инфра-

\*Corresponding author: A.E. Maten; E-mail address: maten02@list.ru

красного компонента теплопередачи за счет эффекта экранирования, повышения гидрофобных свойств материала, обусловленных низкой поверхностной энергией углерода, стабилизации дисперсного состояния за счет образования углеродной нанопленки на гранулах [7]. Публикуемые данные указывают, что синергия МХО и углеродного модифицирования позволяет снижать коэффициент теплопроводности композитов до 0,10–0,12 Вт/м·К при росте предела прочности до 20–40 МПа [8–12]. Однако систематических исследований влияния дозы графита и режимов активации на структурные и эксплуатационные характеристики природно-техногенных алюмосиликатов в настоящее время не представлено.

Новизна работы заключается в разработке составов шихты и условий синтеза в режиме СВЧ теплоизоляционных материалов на основе модифицированных компонентов шихты. Модифицирование сырьевых материалов проводилось в режиме МХО, обеспечивающем высокий уровень активности получаемых смесей на основе минерального и техногенного сырья. Впервые были разработаны составы для изготовления теплоизоляционного материала на основе модифицированных частиц диатомита и золотшлака, что подтверждено патентом [13].

Цель настоящего исследования – разработать высокоэффективный теплоизоляционный композиционный материал на основе модифицированного природного диатомита и золотшлаковых отходов путем их механохимической активации в планетарной мельнице, а также установить взаимосвязь между режимами обработки, содержанием графита, фазо-морфологическими преобразованиями активированной алюмосиликатной матрицы и тепло- и прочностными характеристиками полученных образцов, что позволит обосновать технологические параметры, обеспечивающие минимальную теплопроводность, повышенную прочность и низкое водопоглощение материала.

## 2. Экспериментальная часть

В качестве исходных материалов использовались обожженная диатомитовая крошка марки «А» (фракция 0–0,2 мм) и золотшлак ТЭЦ-2 (г. Алматы). Перед использованием диатомит и золотшлак (ЗШ) подвергались просеву для удаления посторонних включений и выравнивания гранулометрического состава. Согласно данным рентгенофазового анализа, диатомит содержит 88,5%

SiO<sub>2</sub>, 5,8% NaAl<sub>3</sub>Si<sub>3</sub>O<sub>11</sub> и 2,8% (Fe<sub>4</sub>Si)<sub>0.4</sub>; золотшлак представлен в основном муллитом (70%) и кварцем (29,1%).

Механохимическая обработка осуществлялась в планетарной шаровой мельнице «NXQM-2A» (Китай) со стальными шарами диаметром 5 мм при скорости вращения 400 об/мин, ускорении 40g и потребляемой мощности 1,5 кВт·ч. Продолжительность обработки составляла 10, 20 и 30 мин при соотношении массы порошка к массе шаров Мп/Мш = 1/2 и 1/4. В состав вводился графит (10%, 20%) в качестве модифицирующей добавки.

Выбор диапазона времени обусловлен тем, что при обработке свыше 30 мин наблюдается агломерация частиц, приводящая к ухудшению дисперсности и снижению эффективности модификации. Для исключения перегрева реакционной смеси использовался прерывистый режим работы с охлаждением камеры между циклами. Обработка проводилась в сухих условиях, влияние влажности не зафиксировано. Структурные изменения оценивались методами рентгенофазового анализа и сканирующей электронной микроскопии.

Выбор модификатора обоснован анализом литературных данных относительно изменений в структуре частиц при разрушении и потенциальных возможностях их модификации.-

Рентгенофазовый анализ (РФА) проводился на дифрактометре DW-27 mini (Drawell, Китай) с использованием CuKα-излучения ( $\lambda = 1,5406 \text{ \AA}$ ). Сканирование выполнялось в диапазоне  $2\theta = 10\text{--}80^\circ$  при шаге  $0,02^\circ$  и скорости сканирования  $2^\circ/\text{мин}$ .

Для идентификации фаз использовалась база данных PDF-4+ (ICDD, 2023) с применением программного обеспечения, входящего в комплект поставки прибора.

Проведена полуколичественная фазовая оценка на основе анализа относительных интенсивностей характеристических дифракционных пиков.

Микроструктурные исследования порошков проводились с использованием сканирующего электронного микроскопа Quanta 3D 200i Dual System (FEI, США). Съемка осуществлялась в режиме высокого вакуума при ускоряющем напряжении 20 кВ с использованием детектора вторичных электронов (SE). Предварительное покрытие образцов проводилось без напыления, поскольку исследуемые материалы обладали достаточной проводимостью для получения качественного сигнала.

**Таблица 1.** Насыпная плотность диатомита и техногенных отходов в зависимости от параметров МХО

|          | Насыпная плотность, г/см <sup>3</sup> |      |      |      |      |      |      |
|----------|---------------------------------------|------|------|------|------|------|------|
|          | Время активации, мин                  |      |      |      |      |      |      |
|          | 0                                     | 10   | 20   | 30   |      |      |      |
| Мп/Мш    | -                                     | ½    | ¼    | ½    | ¼    | ½    | ¼    |
| диатомит | 0,34                                  | 1,14 | 1,19 | 1,26 | 1,20 | 1,11 | 1,18 |
| золошлак | 0,81                                  | 1,00 | 1,20 | 0,95 | 1,15 | 0,91 | 1,09 |

## 2. Результаты и обсуждение

В результате механохимической обработки были получены данные по насыпной плотности диатомита и техногенного отхода при различных режимах воздействия (табл. 1).

После 20 мин обработки диатомит характеризуется повышенной насыпной плотностью, при этом наблюдается тенденция к снижению плотности при увеличении количества размольных шаров. В случае золошлака, напротив, увеличение времени механохимической обработки приводит к снижению его насыпной плотности.

Полученные результаты указывают на существенные изменения структуры исследуемых порошков под действием механохимического воздействия, что, в свою очередь, отражается на их активности.

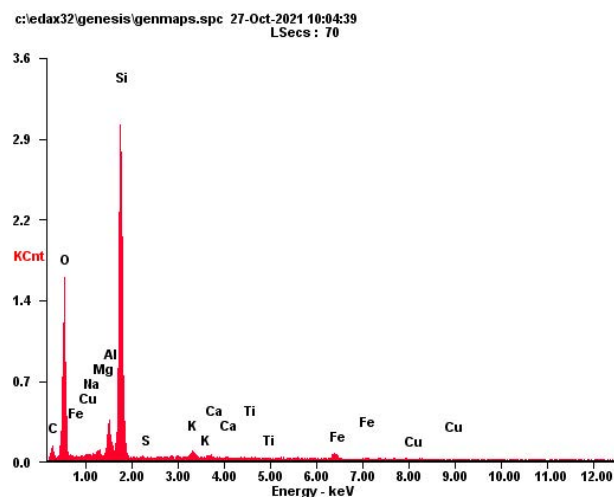
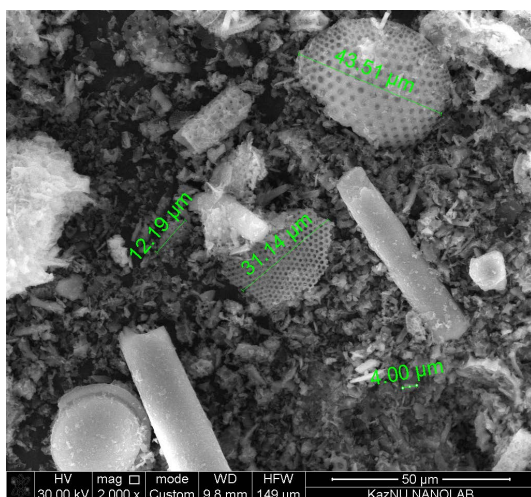
Эффективность модификации порошков зависит от морфологических особенностей частиц, полученных в результате механохимической обработки. После обработки происходит не только измельчение диатомита, но и более глубокое разрушение поверхностного слоя частиц изучаемого материала.

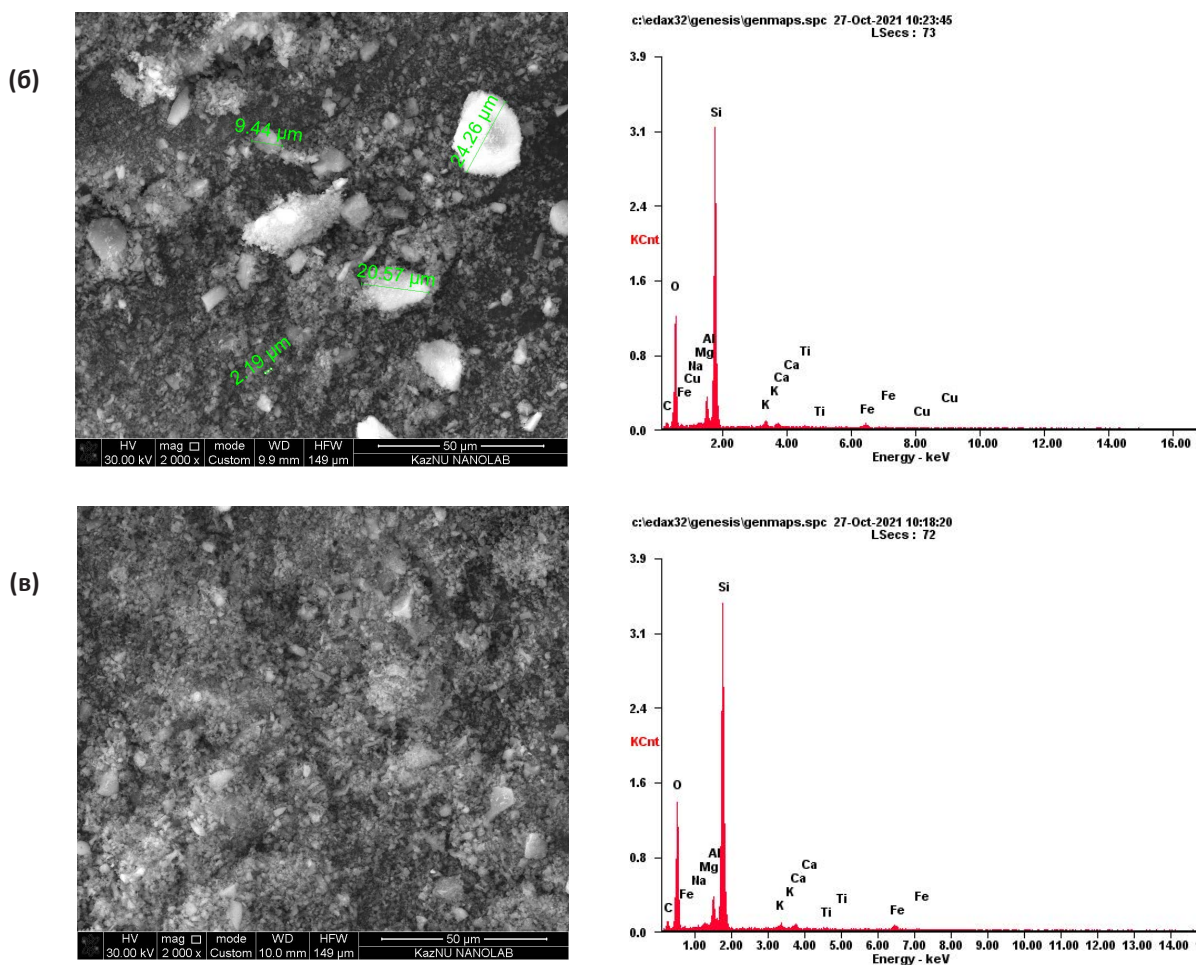
На рис. 1 представлены СЭМ-изображения диатомита при Мп/Мш = ¼, 20 мин МХО. На

СЭМ-снимке исходных порошков (рис. 1а) наблюдаются характерные пористые фрустулы округлой и продолговатой формы (4-44 мкм) с чистой поверхностью и выраженной микропористостью. После МХО (рис. 1б) наблюдаются изменения морфологии частиц: частичная деструкция фрустул, уменьшение их размеров до 2-20 мкм, поверхность стала рыхлой и неоднородной, что указывает на активацию поверхности. На рис. 1в видно, что добавление графита усиливает разрушение структуры и уменьшает размеры частиц, что свидетельствует об эффективной механоактивации и увеличении удельной поверхности.

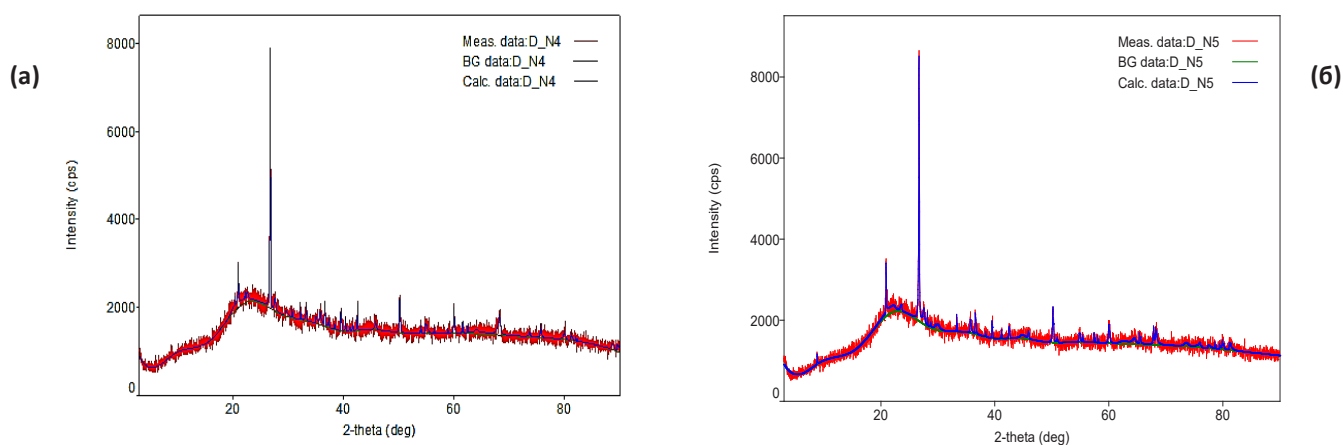
На рис. 2 представлены дифрактограммы образцов диатомита после механохимической обработки (20 мин) с введением графита и без него. Анализ результатов показывает отсутствие значительных различий в фазовом составе: основные дифракционные пики соответствуют аморфной и слабокристаллической форме диоксида кремния (SiO<sub>2</sub>) с признаками кристобалита и кварца. Такая стабильность фазового состава свидетельствует о преимущественно физической природе взаимодействия между компонентами при МХО, обусловленную диспергированием без химической модификации.

(a)





**Рис. 1.** СЭМ-снимки и элементный анализ природного сырья: (а) исходный диатомит; (б) диатомит после 20 мин МХО; (в) диатомит+графит после 20 мин МХО.



**Рис. 2.** Дифрактограмма порошков диатомита: (а) исходный диатомит; (б) диатомит + графит после 20 мин МХО.

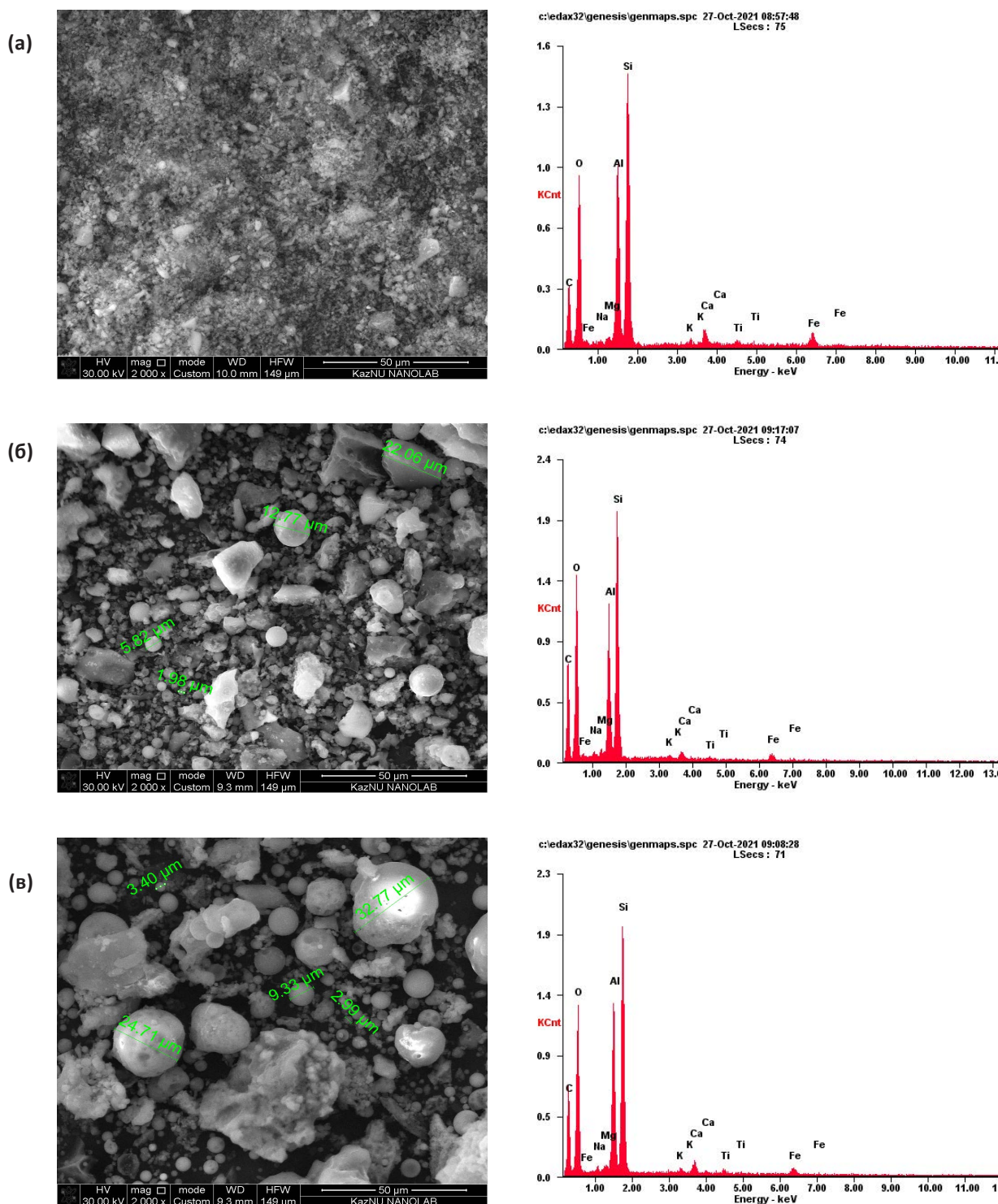
Для исходных техногенных отходов проведены аналогичные исследования с использованием электронной микроскопии, состояние до и после МХО. СЭМ-изображения показывают, что в исходном состоянии частицы золошлака имеют размеры до 30 мкм и характеризуются сферической, пористой структурой (рис. 3а). После МХО

наблюдалось структурное изменение поверхности частиц с одновременным уменьшением их размера. На рис. 3б отчетливо видно, что поверхность частиц после МХО приобрела более пластинчатую структуру. Проведенная обработка привела к разрушению поверхности частиц, что проявилось в изменениях их формы и текстуры.

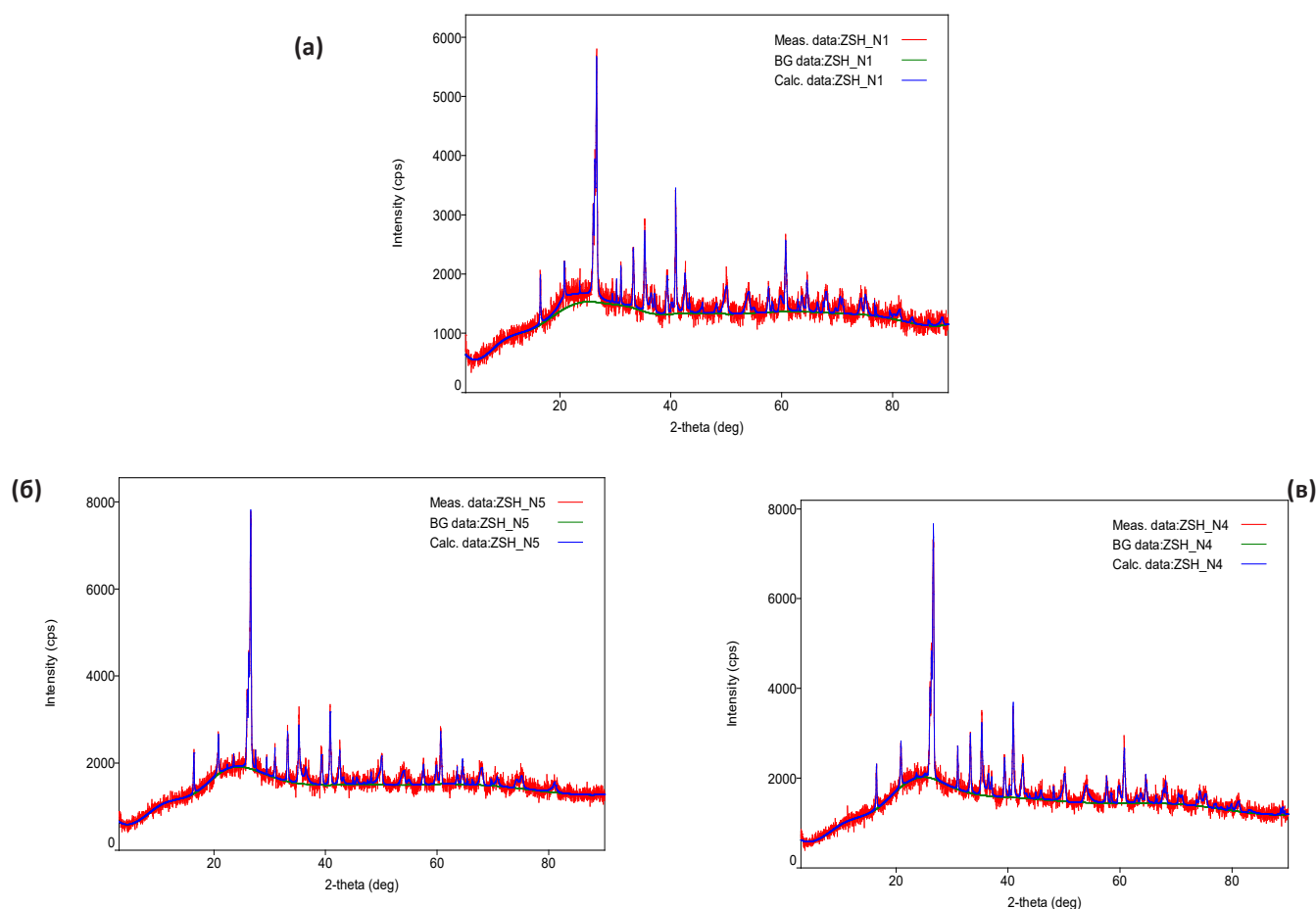
На рис. 4 представлены результаты исследования методом рентгенофазового анализа (РФА). Согласно данным РФА, после МХО (рис. 4б) в образце наблюдается появление новых фаз –  $\text{Al}_{4-66}\text{Si}_{1-39}\text{O}_{9-75}$  и  $\text{SiO}_2$ , а также аморфного углерода, что свидетельствует о фазовых преобразованиях, вызванных активацией. Это указывает не только на увеличение дисперсности и разрушение исход-

ной структуры, но и на модификацию поверхности частиц при обработке с добавлением графита.

Для получения теплоизоляционных материалов на основе диатомита и золотлака был применен метод самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) — энергоэффективная технология, основанная на локализованной экзотермической реакции между компонентами.



**Рис. 3.** СЭМ-снимки и элементный анализ ЗШ: (а) исходный ЗШ; (б) ЗШ после 20 мин МХО; (в) ЗШ+графит после 20 мин МХО.



**Рис. 4** Рентгенограмма ЗШ: (а) в исходном состоянии; (б) ЗШ после 20 мин МХО; (в) после 20 мин МХО с добавлением графита.

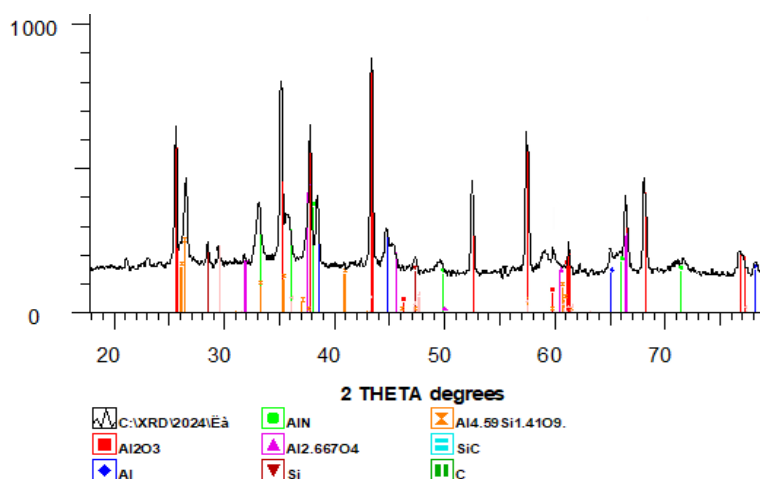
В процессе горения диатомита в исходном состоянии максимальный тепловой эффект достигает  $\sim 1150^\circ\text{C}$ . После МХО происходит снижение температуры  $T_{\text{max}}$  до  $1090^\circ\text{C}$ , что связано с измельчением, дефектообразованием и увеличением теплоотвода. При добавлении 20% графита температура вновь повышается до  $\sim 1120^\circ\text{C}$ , что, вероятно, обусловлено экзотермическими взаимодействиями углерода с активными компонентами матрицы и фазовой рекристаллизацией, сопровождающейся дополнительным тепловыделением. Укороченный период загорания в модифицированных образцах связан с тепловыми потерями на разрушение карбидной оболочки алюминиевых частиц и перераспределением тепла по углеродной фазе.

В отличие от диатомитовых композиций, для золошлака добавление графита оказывает противоположный эффект: наблюдается повышение температуры  $T_{\text{max}}$  до  $\sim 1170^\circ\text{C}$  при 10% С и до  $\sim 1250^\circ\text{C}$  при 20% С. При этом образец, подвергшийся МХО без графита, демонстрирует наименьшую термостойкость ( $\sim 1100^\circ\text{C}$ ). Это указывает на

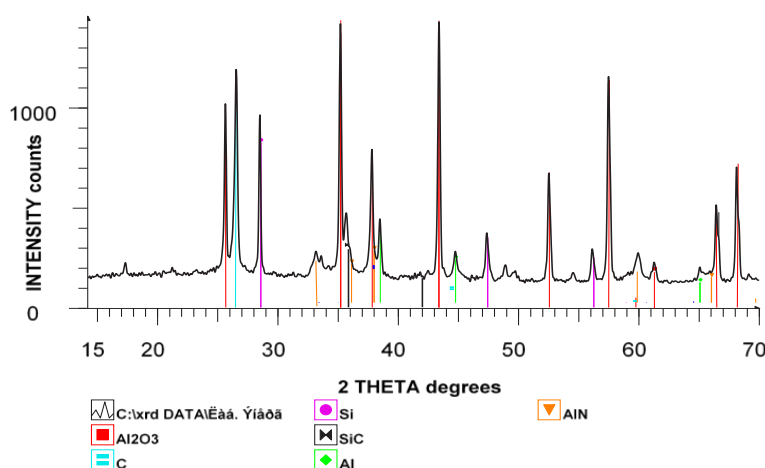
то, что в золошлаковой матрице основным механизмом повышения огнестойкости является экранирующее действие графита, которое снижает тепловое излучение, замедляет локальный перегрев и способствует сохранению структурной целостности.

Таким образом, результаты термических испытаний демонстрируют, что для диатомитовых систем ключевым фактором является механохимическая активация, обеспечивающая равномерное воспламенение и понижение  $T_{\text{max}}$ , в то время как для золошлаковых композиций решающим фактором выступает графитовое модифицирование (оптимально  $\geq 10\%$ ), повышающее термостойкость за счет экранирования тепловых потоков. Недостаточное или избыточное содержание графита в обеих системах приводит к перераспределению пористости, образованию теплопроводящих каналов и, как следствие, снижению огнестойкости.

На рентгенограмме (рис. 5) представлены результаты фазового анализа диатомитового образца, подвергнутого механохимической обработке



**Рис. 5.** Дифрактограмма теплоизоляционных материалов на основе диатомита после механохимической обработки с добавлением графита.



**Рис.6.** Дифрактограмма теплоизоляционных материалов на основе 3Ш после МХО с добавлением графита.

с добавлением графита. В составе идентифицированы следующие фазы: AlN,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , Si, SiC, C, а также комплексное соединение  $\text{Al}_{4.003}\text{Si}_{1.4109}$ . Образование нитридов и карбидов свидетельствует об интенсивных химических взаимодействиях в условиях МХО. Наличие остаточного графита указывает на неполное протекание реакций и присутствие примесей. Полученные данные подтверждают формирование многофазной системы с новыми функциональными свойствами.

Рентгенофазовый анализ образца золотлака после механохимической обработки с добавлением графита (рис. 6) выявил формирование фаз  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , AlN, Si, C, Al, а также соединений SiC. Их присутствие свидетельствует о протекании интенсивных химических взаимодействий в процессе СВС с участием графит-модификатора и азота в воздухе, приводящих к образованию карбидных и нитридных соединений. Формирование данных фаз указывает на развитие термостойкой

многофазной структуры с потенциально электроактивными свойствами, что подчеркивает роль графита как активного модификатора в создании функциональных композитных материалов.

В табл. 2 представлены значения водопоглощения, прочности и теплопроводности СВС-материалов на основе диатомита и техногенного золотлака. Результаты исследования показывают, что МХО способствует снижению теплопроводности и водопоглощения диатомита, сопровождаясь повышением прочности (с 5,6 до 23,2 МПа). Активированный диатомит демонстрирует максимальную прочность на сжатие – 23,2 МПа, коэффициент теплопроводности – 0,203 Вт/м·К, водопоглощение – 23,32%. В то же время теплоизоляционные материалы на основе диатомита с добавлением 10% графита обладают пониженной теплопроводностью (0,157 Вт/(м·К)), уменьшенным водопоглощением (17,17 %) и прочностью на сжатие 13,4 МПа.

**Таблица 2.** Показатели водопоглощаемости, прочности и теплопроводности СВС-материалов на основе диатомита и техногенного золошлака

| № | Название         | Теплопроводимость, (Вт/м·К) | Прочность, (МПа) | Водопоглощение, (%) |
|---|------------------|-----------------------------|------------------|---------------------|
| 1 | Диатомит исх     | 0,337                       | 5,60             | 33,07               |
| 2 | Диатомит МХО     | 0,203                       | 23,2             | 23,32               |
| 3 | Диатомит +10% С  | 0,157                       | 13,4             | 17,17               |
| 4 | Диатомит + 20% С | 0,315                       | 4,90             | 32,62               |
| 5 | ЗШ исх           | 0,175                       | 7,63             | 14,70               |
| 6 | ЗШ МХО           | 0,126                       | 25,08            | 10,26               |
| 7 | ЗШ + 10% С       | 0,114                       | 19,86            | 16,16               |
| 8 | ЗШ + 20% С       | 0,120                       | 14,63            | 19,04               |

Теплоизоляционные материалы на основе золошлака обладают показателями прочности в диапазоне от 7,63 до 25,08 МПа. Образцы с исходными частицами золошлака характеризуются коэффициентом теплопроводности 0,175 Вт/м·К, прочностью 7,63 МПа и водопоглощением 14,70%. Образцы на основе ЗШ после МХО имеют коэффициент теплопроводности 0,126 Вт/м·К, наивысший показатель прочности – 35,53 МПа и водопоглощение 10,26%. Теплоизоляторы на основе 10% графита обладают следующими показателями: коэффициент теплопроводности – 0,114, прочность – 19,86 МПа. Теплоизоляторы на основе ЗШ + 20% графита демонстрируют следующие характеристики: коэффициент теплопроводности – 0,120 Вт/м·К, прочность – 14,63 МПа, водопоглощение – 19,04%. Таким образом, МХО оказывает положительное влияние на структуру и термостойкость золошлака, обеспечивая формирование эффективного теплоизоляционного материала с оптимальным сочетанием прочностных и теплофизических характеристик.

Таким образом, механохимическая активация и углеродное модифицирование оказывают разнонаправленное влияние на свойства диатомитовой и золошлаковой матриц. Углерод способствует формированию устойчивой пористой структуры и снижает теплопроводность. Полученные теплоизоляционные материалы подходят для высокотемпературных условий.

### 3. Заключение

Разработаны составы теплоизоляционных материалов на основе природного диатомита и техногенного золошлака, активированных методом механохимической обработки. Установлено,

что введение 10% графита в золошлаковую систему приводит к снижению теплопроводности до 0,114 Вт/(м·К), сохранив высокую прочность – 19,86 МПа и умеренное водопоглощение – 16,16%. Для диатомита минимальное значение теплопроводности достигается при добавлении 10% графита (0,157 Вт/(м·К)), однако прочность в этом случае снижается до 13,4 МПа. Таким образом, механохимическая обработка в сочетании с модифицированием графитом позволяет целенаправленно регулировать теплофизические и прочностные характеристики композиционных материалов, что подтверждает эффективность предложенного подхода для создания теплоизоляционных изделий на основе природного и техногенного сырья.

### Благодарность

Работа выполнена при поддержке Комитета науки МНВО РК, AP19680089 «Разработка технологии получения теплоизоляционных кирпичей на основе природного сырья и техногенных отходов для промышленного и гражданского строительства».

### Список литературы (ГОСТ)

- [1]. Liu M., Zhu P., Yan X., Li H., Chen X. The application of solid waste in thermal-insulation materials: a review // J. Renew. Mater. – 2024. – Vol. 12, No 2. – P. 329–347.
- [2]. Raza M., Farhan A., Abu-Jdayil B. Lignocellulose-based insulation materials: sustainable solutions for energy efficiency // Int. J. Innov. Food Technol. – 2024. – Vol. 24. – P. 100844.
- [3]. Lee M.G., Huang Y., Shih Y.F. и др. Mechanical

- and thermal insulation performance of waste-diatomite cement mortar // *J. Mater. Res. Technol.* – 2023. – Vol. 25. – P. 4739–4748.
- [4]. Martínez V., Stolar T., Karadeniz B. и др. Advancing mechanochemical synthesis by combining milling with different energy sources // *Nat. Rev. Chem.* – 2023. – Vol. 7. – P. 51–65.
  - [5]. Bakkara A., Sadykov B., Artykbaeva A. и др. Energy-intensive materials with mechanically activated components // *ChemEngineering.* – 2023. – Vol. 7, № 5. – P. 97.
  - [6]. Xu H., Wang H., Zhang Z. и др. High-efficiency Al-based multicomponent composites for low-temperature hydrogen production // *Int. J. Hydrogen Energy.* – 2023. – Т. 48, № 67. – С. 26260–26275.
  - [7]. Dudina D.V., Bokhonov B.B. Materials development using high-energy ball milling: a review // *J. Compos. Sci.* – 2022. – Vol. 6, № 7. – P. 188.
  - [8]. Adeniyi A.G., Abdulkareem S.A., Adeyanju C.A., Ighalo J.O. Recycling biochar and aluminium filings into thermally conducting polystyrene composites // *J. Polym. Environ.* – 2022. – Vol. 30. – P. 3150–3162.
  - [9]. Liu Z.H., Wang F., Deng Z.P. Thermal-insulation composite based on SiO<sub>2</sub> aerogel // *Constr. Build. Mater.* – 2021. – Vol. 286. – P. 122921.
  - [10]. Медведева Г.А., Ахметова Р.Т., Юсупова А.А. Утилизация золошлаковых отходов в производстве серобетона // *Соврем. наукоемкие технол.* – 2021. – № 11. – С. 43–47.
  - [11]. Делицын Л.М., Власов А.С., Рябов Ю.В. Инновационная технология комплексной переработки золы ТЭС // В кн.: *Комплексное освоение техногенных образований.* – Челябинск: ЮУрГУ, 2021. – С. 103–108.
  - [12]. Мофа Н.Н., Мансуров З.А. Механохимический синтез поверхностных наноструктур для композиционных материалов // *Материалы Междунар. конф. по механохимическому синтезу и спеканию.* – 2021. – С. 67–68.
  - [13]. Патент на полезную модель РК №9822. Композиция для изготовления теплоизоляционного материала / Баққара А.Е., Садыков Б.С., Хайруллина А.С., Матен А.Е., Жапекова А.О. Based Insulation Materials: Sustainable Solutions for Energy Efficiency. *Int. J. Innov. Food Tech.* 24 (2024) 100844. <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2024.100844>.
  - [3]. M.G. Lee, Y. Huang, Y.F. Shih, et al. Mechanical and Thermal Insulation Performance of Waste-Diatomite Cement Mortar. *J. Mater. Res. Technol.* 25 (2023) 4739–4748. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.06.246>.
  - [4]. V. Martínez, T. Stolar, B. Karadeniz, et al. Advancing Mechanochemical Synthesis by Combining Milling with Different Energy Sources. *Nat. Rev. Chem.* 7 (2023) 51–65. <https://doi.org/10.1038/s41570-022-00442-1>.
  - [5]. A. Bakkara, B. Sadykov, A. Artykbaeva, et al. Energy-Intensive Materials with Mechanically Activated Components. *ChemEngineering* 7 (2023) 97. <https://doi.org/10.3390/chemengineering7050097>.
  - [6]. H. Xu, H. Wang, Z. Zhang, et al. High-Efficiency Al-Based Multicomponent Composites for Low-Temperature Hydrogen Production. *Int. J. Hydrogen Energy* 48 (2023) 26260–26275. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.03.338>.
  - [7]. D.V. Dudina, B.B. Bokhonov. Materials Development Using High-Energy Ball Milling: A Review. *J. Compos. Sci.* 6 (2022) 188. <https://doi.org/10.3390/jcs6070188>.
  - [8]. A.G. Adeniyi, S.A. Abdulkareem, C.A. Adeyanju, et al. Recycling Biochar and Aluminium Filings into Thermally Conducting Polystyrene Composites. *J. Polym. Environ.* 30 (2022) 3150–3162. <https://doi.org/10.1007/s10924-022-02413-5>.
  - [9]. Z.H. Liu, F. Wang, Z.P. Deng. Thermal-Insulation Composite Based on SiO<sub>2</sub> Aerogel. *Constr. Build. Mater.* 286 (2021) 122921. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122921>.
  - [10]. G.A. Medvedeva, R.T. Akhmetova, A.A. Yusupova. Utilization of Ash-and-Slag Waste in Sulfur Concrete Production. *Sovrem. Naukoyomk. Tekhnol.* 11 (2021) 43–47.
  - [11]. L.M. Delitsyn, A.S. Vlasov, Yu.V. Ryabov. Innovative Technology for Full-Scale Processing of TPP Ash Waste. In *Kompleksnoe Osvoenie Tekhnogennykh Obrazovaniy*, South Ural State University, Chelyabinsk, 2021, pp. 103–108.
  - [12]. N.N. Mofa, Z.A. Mansurov. Mechanochemical Synthesis of Surface Nanostructures for Composite Materials. In *Proc. Int. Conf. "Mechanochemical Synthesis and Sintering"*, 2021, pp. 67–68.
  - [13]. A.E. Bakkara, B.S. Sadykov, A.S. Khairullina, et al. Patent for Utility Model RK No. 9822. Composition for the Production of Thermal Insulation Material.

## References

- [1]. M. Liu, P. Zhu, X. Yan, et al. The Application of Solid Waste in Thermal-Insulation Materials: A Review. *J. Renew. Mater.* 12 (2024) 329–347. <https://doi.org/10.32604/jrm.2023.045381>.
- [2]. M. Raza, A. Farhan, B. Abu-Jdayil. Lignocellulose-

**Сведения об авторах**

**А.Е. Матен** – магистрант 2-го курса КазНУ им. аль-Фараби, кафедра химической физики и материаловедения, лаборант Института проблем горения, Алматы, Казахстан

E-mail: maten02@list.ru

ORCID: 0009-0000-2957-3329

**Б.С. Садыков** – PhD, внс Института проблем горения, Алматы, Казахстан

E-mail: sadykoff.baha89@gmail.com

ORCID: 0000-0002-4739-3636

**А.Б. Артықбаева** – докторант 2-го курса КазНУ им. аль-Фараби, кафедра химической физики и материаловедения, МНС Института проблем горения, Алматы, Казахстан

E-mail: aidaartykbayeva@gmail.com

ORCID: 0000-0001-5334-2379

**А.С. Әділхан** – студент 4-го курса КазНУ им. аль-Фараби, кафедра химической физики и материаловедения, Алматы, Казахстан

E-mail: aliyaadilkhan70@gmail.com

**А.О. Жапекова** – PhD, внс Института проблем горения, ст. преподаватель КазНацЖенПУ, Алматы, Казахстан

E-mail: anarazhapekova83@gmail.com

ORCID: 0000-0002-0842-3804

**А.Е. Баққара** – PhD, внс Института проблем горения, доцент КазНУ им. аль-Фараби, кафедра химической физики и материаловедения, Алматы, Казахстан

E-mail: bakkara\_ayagoz@mail.ru

ORCID: 0000-0001-7336-126X

## Mechanochemical Processing of Natural Raw Materials and Technogenic Wastes to Obtain Thermal Insulation Materials

A.E. Maten<sup>1,2\*</sup>, B.S. Sadykov<sup>1</sup>, A.B. Artykbayeva<sup>1,2</sup>, A.S. Adilkhan<sup>2</sup>, A.O. Zhapekova<sup>1,3</sup>, A.E. Bakkara<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Institute of Combustion Problems, Bogenbai Batyr st., 172, Almaty, Kazakhstan

<sup>2</sup>Al-Farabi Kazakh National University, Al-Farabi ave., 71, Almaty, Kazakhstan

<sup>3</sup>Kazakh National Women's Teacher Training University, Gogol st., 114, Almaty, Kazakhstan

### ABSTRACT

Re-using ash-slag waste from coal-fired power plants for thermal-insulation products offers a viable route to waste valorisation and energy saving. In this work, natural diatomite and ash-slag waste were jointly mechanochemically activated for 20 min in a «NXQM-2A» centrifugal planetary mill (powder-to-ball mass ratio 1:4) and simultaneously modified with graphite. High-energy milling destroyed residual crystalline phases, increased the amorphous aluminosilicate fraction and preserved an intrinsic pore network, which lowered the thermal conductivity of the composites to 0.10-0.12 W/m·K while raising bulk density and compressive strength (diatomite: 5.6-23.2 MPa; fly ash: 10.5-37.6 MPa). Addition of 10 wt % graphite further enhanced the hydrophobicity of diatomite – reducing water uptake by about 50% produced the minimum  $\lambda$ -value (0.11 W/m·K) for the ash-slag system. Conversely, 20 wt% graphite generated excessive macroporosity, lowering strength to 4-2 MPa and diminishing moisture resistance. Thus, mechanochemical activation combined with moderate graphite dosing markedly improves the thermal (lower  $\lambda$ ) and mechanical (higher strength) performance of diatomite- and ash-based composites while simultaneously decreasing water absorption. The results confirm the feasibility of upcycling ash-slag waste into high-efficiency insulation materials suitable for building envelopes and other thermal-barrier applications.

**Keywords:** diatomite, ash-slag, thermal insulation materials, mechanochemical treatment, composite structure, graphite, waste utilization, waste recycling.

## Табиғи шикізаттар мен техногендік қалдықтарды механохимиялық өңдеу арқылы жылу оқшаулағыш материалдар алу

A.E. Maten<sup>1,2\*</sup>, B.S. Садыков<sup>1</sup>, A.B. Артықбаева<sup>1,2</sup>, A.C. Әділхан<sup>2</sup>, A.O. Жапекова<sup>1,3</sup>, A.E. Баққара<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Жану проблемалары институты, Бөгенбай батыр к., 172, Алматы, Қазақстан

<sup>2</sup>Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, әл-Фараби д., 71, Алматы, Қазақстан

<sup>3</sup>Қазақ ұлттық қыздар педагогикалық университеті, Гоголь к., 114, Алматы, Қазақстан

### АҢДАТПА

ЖЭС-тің күл-қож қалдықтарын жылу оқшаулағыш материалдарда қайта пайдалану – қалдықтарды кәдеге жарату мен энергияны үнемдеудің тиімді жолы. Осы зерттеуде табиғи диатомит пен күл-қож қалдықтары «NXQM-2A» центрифугалық-планетарлық диірменінде 20 мин бойы (ұнтақ/шар массалық қатынасы 1/4) механохимиялық активтендіріліп, бір мезгілде 5-20 мас.% графитпен модификацияланды. Жоғары энергиялы ұнтақтау кристаллдық фазаларды бұзып, алюмосиликаттардың аморфты үлесін арттырды және түйірішілік кеуектік құрылымды сақтады. Нәтижесінде композициялардың жылуөткізгіштік коэффициенті 0,10-0,12 Вт/м·К дейін төмендеп, тығыздығы мен сығу беріктігі артты (диатомитте 5,6-дан 23,2 МПа-ға, ұшпа күлде 10,5-тен 37,6 МПа-ға дейін). 10 мас.% графит қосу диатомиттің гидрофобтығын күшейтіп, су сіңіргіштігін шамамен 2 есе азайтты және күл-қож композитында ең төменгі  $\lambda$  (0,11 Вт/м·К) мәнін қамтамасыз етті. Ал 20 мас.% графит шамадан тыс макрокеуектілік түзіп, беріктікті 4-12 МПа-ға дейін түсіріп, ылғалға төзімділікті әлсіретті. Осылайша, механохимиялық активтендіру мен орташа мөлшердегі графиттік модификация диатомит пен күл-қож негізіндегі материалдардың жылу өткізгіштік (төмен  $\lambda$ ) және механикалық (жоғары беріктік) қасиеттерін айтарлықтай жақсартып, су сіңіргіштігін азайтады. Алынған нәтижелер күл-қож қалдықтарын жоғары тиімді жылу оқшаулағыш бұйымдарға айналдырудың жүзеге асырылатынын дәлелдейді және әзірленген композициялар ғимарат конструкциялары мен басқа да жылу тосқауыл жүйелерінде қолдануға перспективалы екенін көрсетеді.

**Түйін сөздер:** диатомит, күл-қож қалдықтары, жылу оқшаулағыш материалдар, механохимиялық өңдеу, композитті құрылым, графит, қалдықтарды утилизациялау, қалдықтарды қайта өңдеу.