

DOI: 10.17516/1998-2836-0302

EDN: JUEVDZ

УДК 662.73, 662.613

## **Aerodynamic Separation of Dispersed Microspheres PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub> from Fly Ash of Lignite Combustion for Production of New Materials**

**Galina V. Akimochkina<sup>\*a</sup>, Elena S. Rogovenko<sup>a</sup>,  
Alexandra S. Gareeva<sup>a, b</sup> and Elena V. Fomenko<sup>a</sup>**

*<sup>a</sup>Institute of Chemistry and Chemical Technology SB RAS  
Federal Research Center “Krasnoyarsk Scientific Center of the SB RAS”*

*Krasnoyarsk, Russian Federation*

*<sup>b</sup>Siberian Federal University*

*Krasnoyarsk, Russian Federation*

Received 05.04.2022, received in revised form 16.06.2022, accepted 27.07.2022

**Abstract:** Using the method of aerodynamic classification in the air flow, narrow fractions of dispersed microspheres, related to environmentally hazardous suspended particles PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub>, were separated from high-calcium fly ash from the combustion of lignite coals of the Kansk-Achinsk basin. As a result of a combination of different separation modes, differing in air flow rate, classifier rotor speed and material feed rate, morphologically homogeneous fractions of spherical particles with a narrow distribution  $d_{av} - 1, 2, 3, 4$  and  $10 \mu\text{m}$  were obtained. The characterized fractions of dispersed microspheres are necessary for assessing the risks of anthropogenic impact on the environment associated with the industrial combustion of coal, and can be used to obtain new materials for various purposes.

**Keywords:** aerodynamic classification, high-calcium fly ash, dispersed narrow fractions, microspheres, ceramic materials.

**Acknowledgements:** The study was supported by the grant of the Russian Science Foundation No. 22–27–20039, <https://rscf.ru/project/22–27–20039/>, Krasnoyarsk Regional Science Foundation. The authors are grateful to staff member of the Institute of Chemistry and Chemical Technology of the

---

© Siberian Federal University. All rights reserved

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0).

\* Corresponding author E-mail address: [agv3107@mail.ru](mailto:agv3107@mail.ru)

Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Krasnoyarsk) A. V. Antonov for performing investigation on a scanning electron microscope TM-3000 of the Krasnoyarsk Regional Research Equipment Centre of SB RAS (FRC KSC SB RAS).

*Citation:* Akimochkina G. V., Rogovenko E. S., Gareeva A. S., Fomenko E. V. Aerodynamic separation of dispersed microspheres PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub> from fly ash of lignite combustion for production of new materials. J. Sib. Fed. Univ. Chem., 2022, 15(3), 387–397. DOI: 10.17516/1998-2836-0302



## **Аэродинамическое выделение дисперсных микросфер PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub> из зол-уноса от сжигания бурых углей с целью получения новых материалов**

**Г. В. Акимочкина<sup>а</sup>, Е. С. Роговенко<sup>а</sup>,  
А. С. Гареева<sup>а, б</sup>, Е. В. Фоменко<sup>а</sup>**

*<sup>а</sup> Институт химии и химической технологии СО РАН,  
Федеральный исследовательский центр  
«Красноярский научный центр СО РАН»,  
Российская Федерация, Красноярск  
<sup>б</sup>Сибирский федеральный университет  
Российская Федерация, Красноярск*

**Аннотация.** Методом аэродинамической классификации в воздушном потоке осуществлено выделение узких фракций дисперсных микросфер, относящихся к экологически опасным взвешенным частицам PM<sub>2.5</sub> и PM<sub>10</sub>, из высококальциевой летучей золы от сжигания бурых углей Канско-Ачинского бассейна. В результате комбинации различных режимов разделения, отличающихся скоростью воздушного потока, частотой вращения ротора классификатора и скоростью подачи материала, получены морфологически однородные фракции сферических частиц с узким распределением  $d_{cp}$  – 1, 2, 3, 4 и 10 мкм. Охарактеризованные фракции дисперсных микросфер необходимы для оценки рисков антропогенного воздействия на окружающую среду, связанных с промышленным сжиганием угля, и могут быть использованы для получения новых материалов различного назначения.

**Ключевые слова:** аэродинамическая классификация, высококальциевая летучая зола, дисперсные узкие фракции, микросферы, керамические материалы.

**Благодарности.** Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22–27–20039, <https://rscf.ru/project/22-27-20039/>, Красноярского краевого фонда науки. Авторы выражают благодарность сотруднику ИХХТ СО РАН (г. Красноярск) А. В. Антонову за выполнение работ на сканирующем электронном микроскопе TM-3000 Красноярского регионального центра коллективного пользования ФИЦ КНЦ СО РАН.

Цитирование: Акимочкина Г.В. Аэродинамическое выделение дисперсных микросфер  $PM_{2.5}$ ,  $PM_{10}$  из зол-уноса от сжигания бурых углей с целью получения новых материалов / Г.В. Акимочкина, Е.С. Роговенко, А.С. Гареева, Е.В. Фоменко // Журн. Сиб. федер. ун-та. Химия, 2022, 15(3). С. 387–397. DOI: 10.17516/1998-2836-0302

## Введение

Обеспечение экологической безопасности территории любого субъекта Российской Федерации является одной из ключевых задач развития страны. В последние годы Красноярский край, представляя собой второй по площади из субъектов РФ и крупнейший из краёв, отличается ухудшением экологической обстановки. В приоритетный список городов РФ с наибольшим уровнем загрязнения атмосферного воздуха включены г. Норильск, Канск, Минусинск, Красноярск [1]. Существенный вклад в уровень загрязнения атмосферного воздуха на территории Красноярского края вносят взвешенные вещества  $PM_{2.5}$  и  $PM_{10}$  ( $PM$  – “*particulate matter*” диаметром менее 2,5 или 10 мкм соответственно). Среди основных источников выбросов находятся предприятия топливно-энергетического комплекса [2].

В связи с острой необходимостью снижения экологической нагрузки в регионе от деятельности ТЭС и минимизации загрязнения дисперсными компонентами стоит задача установления составов дисперсных микросфер энергетических зол от сжигания углей Канско-Ачинского бассейна, анализа перспективных областей их потенциального использования, определения маршрутов образования экологически опасных зольных частиц  $PM_{2.5}$ ,  $PM_{10}$ , оценки их вклада в антропогенное загрязнение и степени воздействия на окружающую среду. Для проведения такого рода научных исследований необходимо выделить дисперсные частицы летучей золы в виде морфологически однородных фракций с узким распределением по размеру и определённого состава.

*Целью работы* являлось выделение из золы-уноса от пылевидного сжигания углей Канско-Ачинского бассейна узких фракций дисперсных микросфер с  $d_{cp} < 10$  мкм методом аэродинамической классификации путем комбинации технологических режимов разделения, определение возможности получения на основе зольных фракций керамических материалов.

## Экспериментальная часть

В качестве сырья для получения узких фракций дисперсных микросфер с  $d_{cp} < 10$  мкм использовали летучую золу от сжигания бурого угля марки Б2 Ирша-Бородинского разреза Канско-Ачинского угольного бассейна. Сжигание угля осуществлялось в котлоагрегате типа БКЗ-420 на Красноярской ТЭЦ-2: температура в топке – 1400–1500 °С, жидкое шлакоудаление, доля летучей золы – 65 %, доля шлака – 35 %. Отбор золы был осуществлен с 4 поля электрофильтра типа УГ-2–4–74–04 с коэффициентом золоулавливания 98 %.

Выделение дисперсных узких фракций осуществлялось с использованием метода аэродинамического разделения, реализованного на центробежном лабораторном классификаторе 50 АТР (*Hosokawa ALPINE, Германия*). Подробно схема классификатора и принцип его действия описаны в работе [3].

Схема системы разделения дисперсных материалов на аэродинамическом классификаторе представлена на рис. 1. Партию золы массой  $m = 1–2$  кг помещали в загрузочный бункер (1), затем с помощью шнекового дозатора (2) со скоростью  $v = 10–22$  мин<sup>-1</sup> подавали на колесо класси-

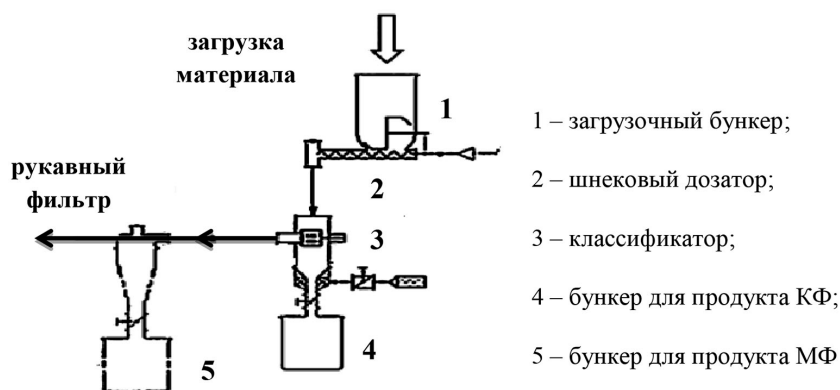


Рис. 1. Схема системы разделения аэродинамического классификатора 50 ATP («HOSOKAWA ALPINE AG», Германия)

Fig. 1. Schematic diagram of a 50 ATP aerodynamic classifier (HOSOKAWA ALPINE, Germany): (1) feed bin, (2) screw conveyor, (3) classifier, (4) bunker for the gross product, (5) bunker for the fine product

классификатора (3) для разделения. При вращении ротора возникает центробежная сила, а вентилятором генерируется противоположно направленная ей сила воздушного потока. За счёт действия на частицы противоположно направленных сил осуществляется разделение зольного уноса на два продукта. Наиболее тяжелые и крупные зольные частицы выталкиваются центробежной силой и, не проходя через ротор классификатора, собираются в бункере для крупной фракции (4). Более легкие и мелкие частицы зольного уноса проходят через ротор классификатора и уносятся воздушным потоком в бункер для мелкой фракции (5).

В данной работе варьирование скорости воздушного потока осуществлялось в интервале от 40 до 50 м<sup>3</sup>/ч, скорости вращения ротора – от 4000 до 21 950 мин<sup>-1</sup>. В результате комбинации режимов разделения были выделены зольные фракции, отличающиеся распределением частиц, с определённым средним диаметром  $d_{ср}$ , указанным цифрой в маркировке образца.

Распределение частиц по размеру для зольных фракций определяли на лазерном анализаторе MicroTec 22 (Fritsch, Германия). Величину среднего диаметра глобул  $d_{ср}$ , а также  $d_{10}$  и  $d_{90}$ , определяли по трем независимым измерениям. Абсолютная погрешность измерений не превышала  $\pm 0,3$  мкм. Определение насыпной плотности проводили на автоматизированном анализаторе Autotap (Quantachrome Instruments, США). Исследование морфологии глобул выполняли на порошковых образцах, закрепленных углеродным скотчем (Ted Pella Inc.) на плоской подложке, с применением сканирующего электронного микроскопа TM-3000 (Hitachi, Japan).

Химический состав зольных фракций, включающий содержание оксидов кремния, алюминия, железа, кальция, магния, калия, натрия, титана и серы, а также потери при прокаливании определяли методами химического анализа согласно ГОСТ 5382–91 [4].

Для получения образцов керамики на основе зольных фракций использовали метод компактирования порошковых образцов путем холодного статического одноосного прессования в закрытой жесткой пресс-форме [5]. При давлении 50 МПа были получены таблетки цилиндрической формы диаметром 16 мм и высотой 8–12 мм. Перед спеканием в муфеле спрессованные образцы сушили при температуре 90 °С в течение 2 ч для удаления влаги. Обжиг в муфельной печи проводили при температуре 900 и 1100 °С с выдержкой в течение 3 ч. Водопоглощение

образцов определяли путем вакуумирования, рассчитывая в процентах по отношению массы воды, поглощенной при полном насыщении, к массе сухого образца [6,7].

### Результаты и обсуждение

ТЭЦ-2 в Красноярске использует в качестве сырья бурый уголь с момента ее запуска в 1979 году. Котлы ТЭЦ-2 изначально были рассчитаны на низкую зольность около 4–8 %, среднее значение за год составляет 4,5 %. Но даже при этих показателях из 60 тонн угля, которые котёл сжигает ежедневно, образуется 270 кг золы. Несмотря на высокий КПД установленных на котлах электрофильтров, в атмосферу выбрасывается около 1000 тонн в год дисперсных зольных частиц [8].

В качестве сырья для выделения узких фракций дисперсных зольных частиц, относящихся к экологически опасным взвешенным частицам  $PM_{2,5}$  и  $PM_{10}$ , использовалась зола-уноса, отобранная из 4 поля электрофильтра Красноярской ТЭЦ-2. В 4 поле электрофильтра концентрируются более мелкие зольные частицы – содержание частиц размером  $< 10$  мкм достигает 80 %. В 1 поле электрофильтра их содержание не превышает 30 %, во 2 поле составляет около 40 %, а в 3 поле – 65 %.

Распределение частиц по размеру исходной золы-уноса характеризуется следующими параметрами:  $d_{cp} = 5$  мкм,  $d_{10} = 1$  мкм и  $d_{90} = 14$  мкм (рис. 2.1). РЭМ-снимок на рис. 2.2 отражает вариацию размеров частиц и их морфологию

Изначально, на первом этапе разделения, подачу золы на колесо классификатора осуществляли при скорости шнекового дозатора  $22 \text{ мин}^{-1}$ . Для получения зольной фракции с наименьшим средним диаметром разделение проводили при максимальной скорости колеса классификатора –  $21\,950 \text{ мин}^{-1}$  и минимальной скорости воздушного потока –  $40 \text{ м}^3/\text{ч}$ . В результате в бункере для мелкой фракции (рис. 1–5) была получена фракция КА-1.3, выход которой в расчёте на исходную золу составил 9 мас.%. Распределение частиц по размеру для этой фракции приведено на рис. 3.1:  $d_{cp} = 1,3$  мкм,  $d_{10} = 0,3$  мкм и  $d_{90} = 2,3$  мкм.

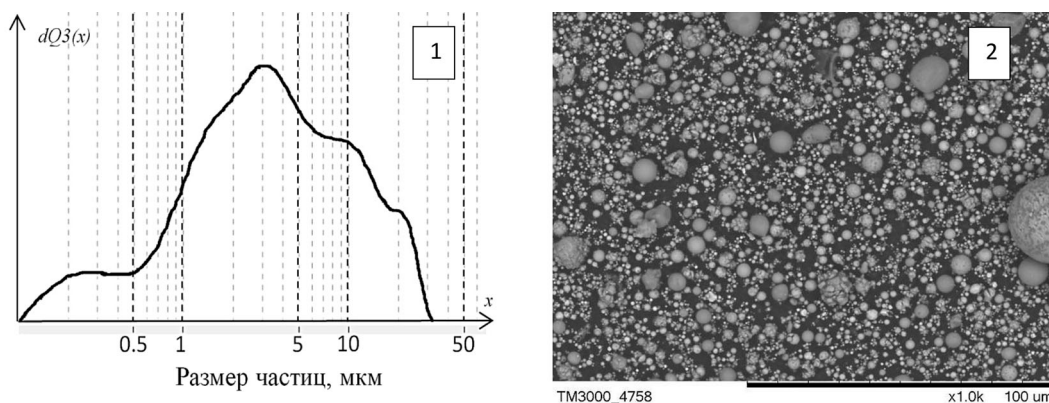


Рис. 2. Распределение частиц по размеру в дифференциальной форме  $dQ3(x)$  (1) и РЭМ снимок (2) для золы-уноса 4 поля электрофильтра Красноярской ТЭЦ-2

Fig. 2. Particle size distribution in the differential form  $dQ3(x)$  (1) and SEM image (2) for fly ash from field 4 of the electrostatic precipitator of the Krasnoyarsk HPP-2

Затем крупная фракция, которая не прошла через ротор классификатора и была собрана в специальном бункере для крупной фракции (рис. 1–4), вновь подавалась на разделение при увеличенной скорости воздушного потока  $50 \text{ м}^3/\text{ч}$ . Из этой фракции была выделена следующая по размеру мелкая фракция КА-1.8 с выходом 15 мас.%. Распределение частиц по размеру для этой фракции характеризуется следующими параметрами:  $d_{cp} = 1,8 \text{ мкм}$ ,  $d_{10} = 0,5 \text{ мкм}$  и  $d_{90} = 2,9 \text{ мкм}$  (рис. 3.2).

Последующее разделение крупных фракций происходило при скорости воздушного потока  $50 \text{ м}^3/\text{ч}$ . Скорость колеса классификатора последовательно уменьшалась с шагом  $3000 \text{ мин}^{-1}$ . Так, при скорости колеса  $19000 \text{ мин}^{-1}$  была получена мелкая фракция КА-2.1, выход которой составил 7 мас.%,  $d_{cp} = 2,1 \text{ мкм}$ ,  $d_{10} = 0,1 \text{ мкм}$  и  $d_{90} = 3,6 \text{ мкм}$  (рис. 4.1). Далее из крупной фракции при скорости колеса классификатора  $16000 \text{ мин}^{-1}$  была выделена узкая фракция КА-2.5, выход к исходной золе – 5 мас.%,  $d_{cp} = 2,5 \text{ мкм}$ ,  $d_{10} = 0,1 \text{ мкм}$  и  $d_{90} = 4,2 \text{ мкм}$  (рис. 4.2).

Последующий цикл разделения был осуществлен при скорости колеса классификатора  $10000 \text{ мин}^{-1}$ , в результате чего была получена мелкая фракция КА-4.2 с выходом 10 мас.%,  $d_{cp} = 4,2 \text{ мкм}$ ,  $d_{10} = 0,9 \text{ мкм}$  и  $d_{90} = 6,5 \text{ мкм}$  (рис. 5.1).

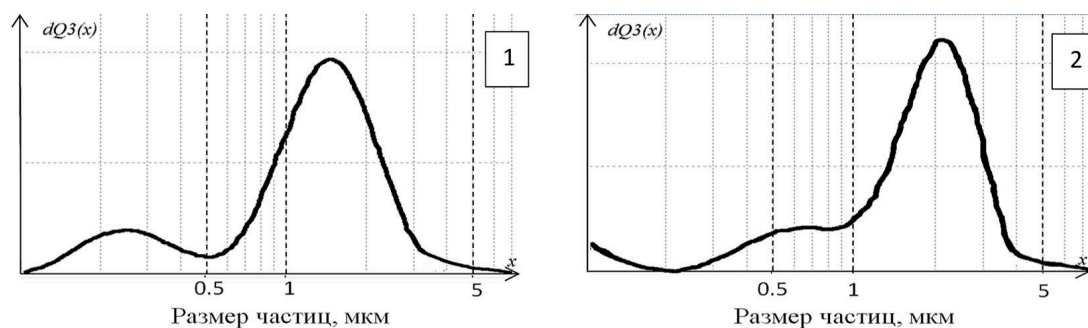


Рис. 3. Распределение частиц по размеру в дифференциальной форме  $dQ3(x)$  для фракций КА-1.3(1) и КА-1.8(2)

Fig. 3. Particle size distribution in the differential form  $dQ3(x)$  for fractions KA-1.3(1) and KA-1.8(2)

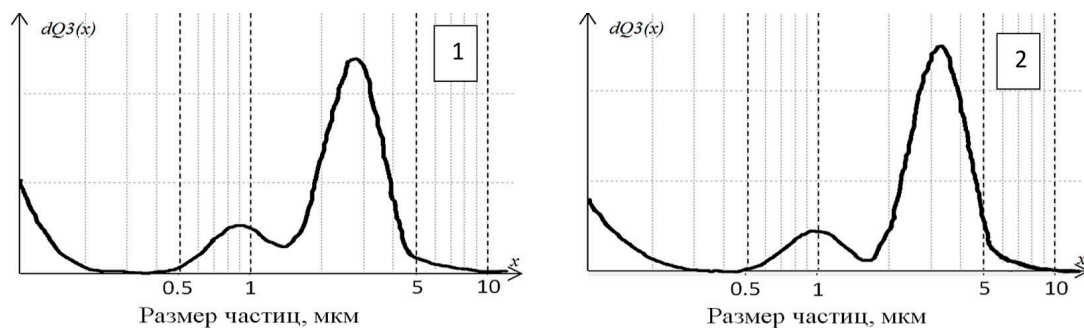


Рис. 4. Распределение частиц по размеру в дифференциальной форме  $dQ3(x)$  для фракций КА-2.1(1) и КА-2.5(2)

Fig. 4. Particle size distribution in the differential form  $dQ3(x)$  for fractions KA-2.1(1) and KA-2.5(2)

Дальнейшее разделение крупных фракций проводили, последовательно уменьшая скорость на  $2000 \text{ мин}^{-1}$ . При скорости  $8000 \text{ мин}^{-1}$  была получена мелкая фракция КА-6.5, выход  $16 \text{ мас.}\%$ ,  $d_{\text{cp}} = 6,5 \text{ мкм}$ ,  $d_{10} = 1,1 \text{ мкм}$  и  $d_{90} = 10,7 \text{ мкм}$  (рис. 5.2). При скорости  $6000 \text{ мин}^{-1}$  выделена фракция КА-10.1, для нее выход в расчете на исходную золу составил  $13 \text{ мас.}\%$ ,  $d_{\text{cp}} = 10,1 \text{ мкм}$ ,  $d_{10} = 2,8 \text{ мкм}$  и  $d_{90} = 16,1 \text{ мкм}$  (рис. 5.3). Узкая фракция КА-17.0 была выделена при  $4000 \text{ мин}^{-1}$ , выход  $11 \text{ мас.}\%$ ,  $d_{\text{cp}} = 17,0 \text{ мкм}$ ,  $d_{10} = 9,0 \text{ мкм}$  и  $d_{90} = 26,4 \text{ мкм}$  (рис. 5.4).

Таким образом, на первом этапе аэродинамического разделения золы-уноса были получены следующие фракции с  $d_{\text{cp}}$  от 1 до 10 мкм: КА-1.3, КА-1.8, КА-2.1, КА-2.5, КА-4.2, КА-6.5, КА-10.1, и фракция с  $d_{\text{cp}} > 10 \text{ мкм}$  – КА-17.0. Все выделенные фракции содержат некоторое количество мелких частиц, которые на распределениях по размеру образуют характерный «хвост» в области, левее от максимума (рис. 3–5). В большей степени это заметно для самых мелких фракций КА-1.3 и КА-1.8 (рис. 3), КА-2.1 и КА-2.5 (рис. 4). По мере увеличения среднего диаметра частиц во фракции размерная неоднородность в виде вклада мелких частиц постепенно нивелируется (рис. 5).

Для получения более однородных зольных фракций с узким распределением частиц по размеру на втором этапе разделения образцы КА-1.3, КА-1.8, КА-2.1, КА-4.2 и КА-10.1 подвергались дополнительному аэродинамическому разделению для очистки от «загрязняющих» их мелких частиц. Для этого при неизменных параметрах скорости колеса классификатора и скорости воздушного потока скорость подачи материала была снижена – скорость дозатора составила  $10 \text{ мин}^{-1}$ . В результате были выделены однородные фракции КА-1, КА-2, КА-3, КА-4

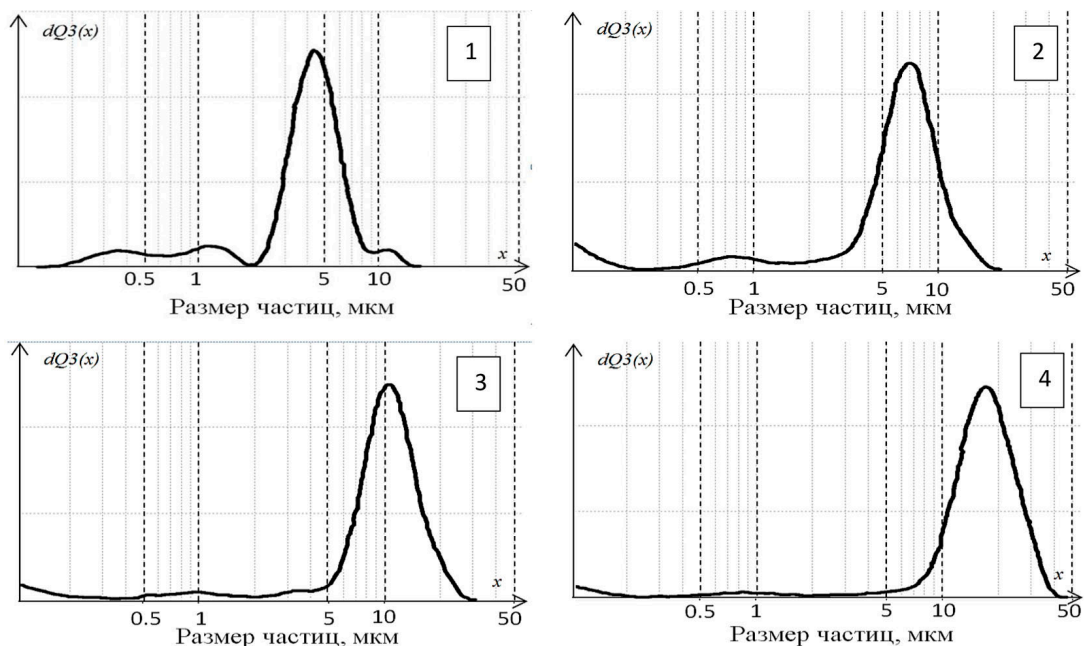


Рис. 5. Распределение частиц по размеру в дифференциальной  $dQ_3(x)$  форме для фракций КА-4.2(1), КА-6.5(2), КА-10.1(3) и КА-17.0(4)

Fig. 5. Particle size distribution in differential  $dQ_3(x)$  form for fractions КА-4.2(1), КА-6.5(2), КА-10.1(3) and КА-17.0(4)

и КА-10 с узким распределением глобул по размеру (рис. 6). Отличительной особенностью этих зольных образцов, полученных после второго этапа разделения, стало уменьшение вклада мелких частиц примерно на 8–11 %, что сместило значение медианы  $d_{50}$  в сторону частиц меньшего размера, а среднего диаметра  $d_{cp}$  – в сторону частиц большего размера на 0,1–0,4 мкм.

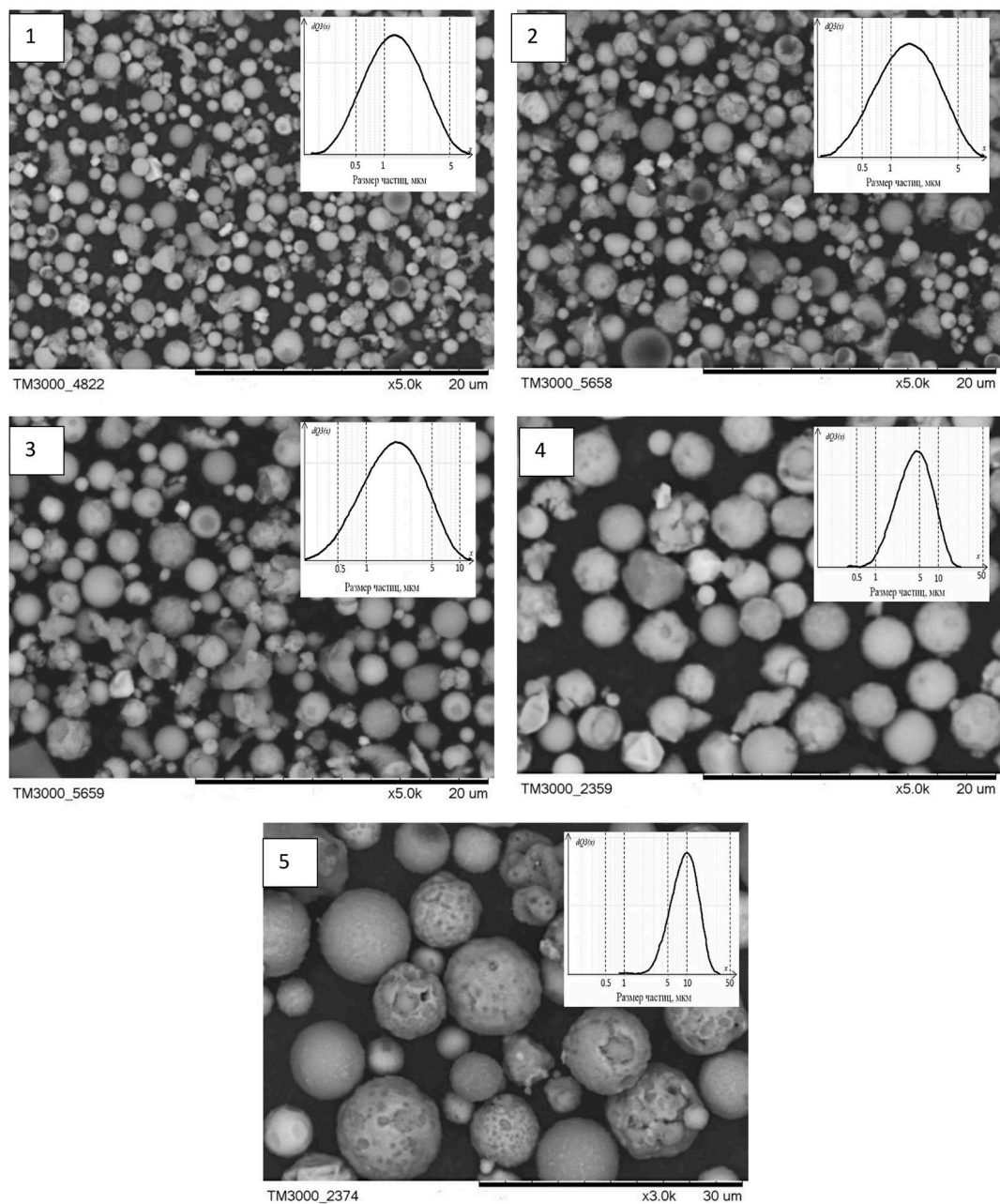


Рис. 6. Распределения частиц по размеру в дифференциальной форме  $dQ/dx$  и РЭМ-снимки для узких фракций микросферических продуктов КА-1(1), КА-2(2), КА-3(3), КА-4(4) и КА-10(5)

Fig. 6. Particle size distributions in differential  $dQ/dx$  form and SEM images for narrow fractions of microspherical products KA-1(1), KA-2(2), KA-3(3), KA-4(4), and KA-10(5)



На РЭМ-снимках выделенных узких фракций (рис. 6) видно, что они представлены абсолютным большинством частиц сферической формы с различным рельефом поверхности и однородны по размеру по сравнению с исходной золой (рис. 2). Морфология глобул весьма разнообразна: это гладкие оплавленные сферы, покрытые мелкими кристаллитами шероховатые глобулы, частицы с внутренними полостями (одной или несколькими); встречаются единичные неоплавленные частицы, фрагментарные непористые или пористые осколки. С увеличением размера фракции количество микросфер с рельефной поверхностью заметно увеличивается.

Значения насыпной плотности дисперсных зольных фракций увеличиваются от 0,9 до 1,5 г/см<sup>3</sup> с ростом размера фракций. Отличительной особенностью химического состава (табл. 1) является высокое содержание CaO – 31–39 мас.%, к другим макрокомпонентам относятся SiO<sub>2</sub>–14–31, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–11–14, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–7–9, MgO – 8–9, SO<sub>3</sub>–2–10 мас.%. Содержание остальных оксидов (Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O, TiO<sub>2</sub>) в сумме не превышает 1 мас.%.

Следует отметить, что качественное разделение зол на фракции определенного размера и состава с прогнозируемыми свойствами позволяет превратить крупнотоннажные отходы теплоэнергетики в ценное минеральное сырье техногенного происхождения. Фракции высококальциевой летучей золы потенциально пригодны для получения высоконаполненных бетонов [9], высокопрочных структур без использования портландцемента [10], однородных и прочных геополимеров [11], композиций для синтеза стеклокристаллических и керамических материалов [12], монолитных керамик [13], различных облегченных конструкционных материалов [14].

На примере узкой фракции КА-3 показана принципиальная возможность получения на основе дисперсных микросфер высококальциевых летучих зол керамических материалов под воздействием высокой температуры с последующим охлаждением. Методом холодного статического одноосного прессования [5] при давлении 50 МПа без добавок и связующих были получены таблетки цилиндрической формы, которые затем подвергались термообработке при 900 и 1100 °С (рис. 7). Для полученных спеченных образцов определены значения водопоглощения (*Water Absorption*), характеризующие способность материала впитывать и удерживать в порах капилляров влагу. Установлено, что с увеличением температуры обжига водопоглощение спеченных образцов уменьшается в 1,6 раза с 38 % до 24 %. По значению водопоглощения керамический материал, полученный из дисперсных частиц при 1100 °С, соответствует об-

Таблица 1. Насыпная плотность и химический состав дисперсных зольных фракций

Table 1. Bulk density and chemical composition of dispersed ash fractions

Фракция	Насыпная плотность, г/см <sup>3</sup>	Химический состав, мас.%									
		п.п.п.	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	SO <sub>3</sub>
КА-1	0,89	5,30	13,98	9,17	13,96	38,50	8,20	0,32	0,18	0,32	9,60
КА-2	1,01	5,50	15,90	8,42	13,78	39,52	8,25	0,30	0,14	0,25	7,64
КА-3	1,12	10,80	15,88	7,99	13,96	38,60	7,82	0,27	0,19	0,10	4,62
КА-4	1,24	5,35	23,42	7,98	13,05	36,30	9,39	0,68	0,20	0,20	3,50
КА-10	1,50	2,20	30,70	7,25	11,30	30,60	7,72	0,34	0,30	0,15	1,72



Рис. 7. Образцы керамических материалов на основе дисперсной фракции золы КА-3

Fig. 7. Samples of ceramic materials based on the dispersed ash fraction KA-3

разцам стеновых керамических изделий, полученных из высококальциевой золы без предварительной классификации с добавкой микрокремнезема в количестве 50 мас.% [15].

Таким образом, с использованием центробежного лабораторного классификатора 50 АТР выполнено аэродинамическое выделение из золы-уноса от пылевидного сжигания углей Канско-Ачинского бассейна дисперсных фракций с узким распределением частиц по размеру с  $d_{cp} < 10$  мкм, которые в зависимости от их физико-химических характеристик потенциально пригодны для создания новых материалов различного назначения.

### Заключение

Методом аэродинамической классификации в воздушном потоке осуществлено выделение узких фракций дисперсных микросфер, относящихся к экологически опасным взвешенным частицам  $PM_{2.5}$  и  $PM_{10}$ , из высококальциевой летучей золы от сжигания бурых углей Канско-Ачинского бассейна. При различных режимах классификатора, отличающихся скоростью воздушного потока, частотой вращения ротора классификатора и скоростью подачи материала, получены однородные фракции определенного размера и состава, характеризующиеся  $d_{cp}$  1, 2, 3, 4 и 10 мкм,  $d_{90}$ –3, 4, 5, 9 и 16 мкм. Показана возможность получения на основе зольной фракции с  $d_{cp} = 3$  мкм керамических материалов с различной величиной водопоглощения в зависимости от температуры обжига.

### Список литературы / References

1. О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2020 году. Государственный доклад. М.: Минприроды России; МГУ имени М.В. Ломоносова, 2021. 1000 [On the state and protection of the environment of the Russian Federation in 2020. State report. M.: Ministry of Natural Resources of Russia; Moscow State University named after M. V. Lomonosov, 2021. 1000. (In Russ.)]
2. Государственный доклад «О состоянии и охране окружающей среды в Красноярском крае в 2020 году». Красноярск. 2021. [State report “On the state and protection of the environment in the Krasnoyarsk Territory in 2020”. Krasnoyarsk. 2021. (In Russ.)] [http://www.mpr.krskstate.ru/dat/bin/art\\_attach/17690\\_gosdoklad\\_2020.pdf](http://www.mpr.krskstate.ru/dat/bin/art_attach/17690_gosdoklad_2020.pdf)
3. Kushnerova O.A., Akimochkina G. V., Fomenko E. V., Rabchevskii E. V., Anshits A. G. One-stage aerodynamic separation of fly ash from the pulverized combustion of Ekibastuz basin coal. *Solid Fuel Chemistry*. 2018. 52(3). 188–200. [https://doi.org/10.3103/S\\_0361521918030059](https://doi.org/10.3103/S_0361521918030059)

4. ГОСТ 5382–91 Цемент и материалы цементного производства. Методы химического анализа. М.: Изд-во стандартов, 1991. [GOST 5382–91 Cements and materials for cement production. Chemical analysis methods. Moscow: Standards Publishing, 1991. (In Russ.)]
5. Glass S.J., Ewsuk K.G. Ceramic Powder Compaction. *MRS Bulletin*. 1997.22. 12. 24–28. [https://doi.org/10.1557/S\\_0883769400034709](https://doi.org/10.1557/S_0883769400034709)
6. ГОСТ 7025–91 Кирпич и камни керамические и силикатные. Методы определения водопоглощения, плотности и контроля морозостойкости. М.: Стандартинформ, 2006. [GOST 7025–91 Ceramic and calcium silicate bricks and stones. Methods for water absorption and density determination and frost resistance control. Moscow: Standards Inform, 2006. (In Russ.)]
7. ASTM International – ASTM C 830–00(2011) Standard Test Methods for Apparent Porosity, Liquid Absorption, Apparent Specific Gravity, and Bulk Density of Refractory Shapes by Vacuum Pressure.
8. Кучумова А. Красноярская ТЭЦ-2: говорим и показываем. Промышленные страницы Сибири. 2017. [Kuchumova A. Krasnoyarsk HPP-2: we speak and show. Industrial pages of Siberia. 2017. 125. (in Russ)]125. <http://www.epps.ru/journal/detail.php?id=1892>
9. Yu J., Lu C., Leung C.K.Y., Li G. Mechanical properties of green structural concrete with ultrahigh-volume fly ash. *Construction and Building Materials*. 2017. 147. 510–518. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.188>
10. Berry M., Stephens J., Cross D. Performance of 100 % Fly Ash Concrete with Recycled Glass Aggregate. *ACI Materials Journal*. 2011. 108. 4. 378–384. <https://doi.org/10.14359/51683110>
11. Phoo-ngernkham T., Chindaprasirt P., Sata V., Hanjitsuwan S., Hatanaka S. The effect of adding nano-SiO<sub>2</sub> and nano-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> on properties of high calcium fly ash geopolymer cured at ambient temperature. *Materials and design*. 2014. 55. 58–65. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.09.049>
12. Wang S., Zhang C., Chen J. Utilization of coal fly ash for the production of glass-ceramics with unique performances: A brief review. *Journal of Materials Science and Technology*. 2014. 30(12). 1208–1212 <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2014.10.005>
13. Angjusheva B., Fidancevska E., Jovanov V. Production of ceramics from coal fly ash. *Chemical Industry and Chemical Engineering Quarterly*. 2012. 18(2). 245–254. <https://doi.org/10.2298/CICEQ110607001A>
14. Balapour M., Thway T., Rao R., Moser N., Garboczi E.J., Hsuan Y.G., Farnam Y. A thermodynamics-guided framework to design lightweight aggregate from waste coal combustion fly ash. *Resources, Conservation & Recycling*. 2022. 178. 106050 <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.106050>
15. Патент RU № 2086517 С1 Тацки Л. Н., Лохова Н. А., Гершанович Г. Л., Сеничак Е. Б. Сырьевая смесь для изготовления стеновых керамических изделий. 10.08.1997. [Patent RU No. 2086517 С 1 Tacki L.N., Lokhova N.A., Gershanovich G.L., Senichak E.B. Raw mixture for the manufacture of wall ceramic products. 10.08.1997. (In Russ.)]