

СОРБИРУЮЩИЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ЧЕЛОВЕКА,
ТЕХНИКИ И ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

УДК 544.723

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ СОЗДАНИЯ И ПРИМЕНЕНИЯ
НЕОРГАНИЧЕСКИХ СОРБИРУЮЩИХ МАТЕРИАЛОВ

© 2024 г. В. В. Самонин^а, *, Е. А. Спиридонова^а, С. П. Хохлачев^а, М. Л. Подвязников^а

^аСанкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет),
Московский пр-т, 24–26, Санкт-Петербург, 190013 Россия

*e-mail: samonin@lti-gti.ru

Поступила в редакцию 09.10.2023 г.

После доработки 26.12.2023 г.

Принята к публикации 26.12.2023 г.

Освещены современные подходы к созданию сорбционно-активных материалов на основе неорганических сорбентов и области их практического применения. Исследованы физико-химические свойства и параметры пористой структуры неорганических сорбирующих материалов. Сделан акцент на процессах управляемой сорбции с использованием различных видов энергии на примере неорганических сорбентов. Проанализированы способы получения сорбционных материалов из альтернативного сырья, представленного неорганическими техногенными отходами.

Ключевые слова: композиционный сорбционно-активный материал, блочный сорбент, сорбционное устройство, отходы

DOI: 10.31857/S0044457X24030148 EDN: YDNWDQ

ВВЕДЕНИЕ

Современная промышленность, наука и техника невозможны без использования сорбентов. В настоящее время в промышленности применяются различные сорбирующие материалы в виде порошков, гранул, блоков, покрытий и пен для очистки и осушки газовых и жидких сред [1]. При этом блочное исполнение дает определенные преимущества (прочность, масса сорбента на единицу объема, теплофизические и электротехнические характеристики, обусловленные сплошностью среды (сорбирующего материала)). Разрабатываются новые технологии, связанные с возможностью управления процессами сорбции посредством воздействия на сорбент различных форм энергии [2]. Создание сорбционных устройств, облегчающих подвод энергии к сорбирующим материалам, позволяет интенсифицировать процессы с участием этих материалов. Развитие промышленности приводит к увеличению техногенных отходов, которые в силу их дешевизны и доступности по сравнению с традиционным сырьем для производства адсорбентов [3] могут быть использованы для получения сорбционных материалов [4].

В настоящей работе выполнен анализ технологий получения сорбирующих материалов и изделий из традиционного и альтернативного сырья, представленного техногенными отходами.

*Развитие технологии сорбирующих материалов
от насыпной шихты к блочным изделиям*

Сорбционно-активные материалы можно разделить на четыре поколения [2]. К первому поколению относятся монокомпонентные адсорбенты, такие как силикагель, кристаллические цеолиты, активный оксид алюминия, активированный уголь. Как правило, такие адсорбенты используются в виде насыпной шихты. В табл. 1 представлены параметры пористой структуры некоторых неорганических сорбентов первого поколения [5].

Перспективным направлением получения сорбирующих материалов является золь-гель метод, основанный на получении коллоидных растворов с дальнейшим удалением дисперсионной среды. Наиболее широкое промышленное применение золь-гель метод получил в технологии получения силикагелей [5]. Варьируя условия синтеза (рН промывной жидкости, природу интермицеллярной жидкости), можно в широких пределах менять пористую структуру получаемых материалов [6].

Дальнейшее развитие золь-гель способ получил в технологии формирования мезопористых мезофазных материалов [7]. Мезофазные пористые материалы обладают площадью поверхности до 1200 м²/г и объемом мезопор до 1.1 см³/г, характеризующимся ярко выраженной монопористостью. В связи с этим мезофазные материалы нашли широкое применение в качестве молекулярных сит [8].

Таблица 1. Параметры пористой структуры (V_{Σ} – суммарный объем пор, $S_{\text{БЭТ}}$ – удельная площадь поверхности, D_e – эффективный коэффициент диффузии) некоторых марок промышленно производимых неорганических сорбентов [2, 5]

Адсорбент	V_{Σ} , см ³ /г	$S_{\text{БЭТ}}$, м ² /г	$D_e \times 10^{11}$, м ² /с
Цеолит марки NaA	0.33	820	86.4
Цеолит марки NaX	0.36	900	39.0
Цеолит марки NaY	0.20	400	29.6
Силикагель марки КСК-1	1.10	300	8.2
Силикагель марки КСС-4	0.61–0.75	550–650	13.1
Силикагель марки КСМ-6	0.25–0.38	600–750	25.6
Активный оксид алюминия марки АОА-1	0.80	200	19.5

Таблица 2. Параметры пористой структуры КСАМ (цеолит NaX – эмульсия фторопласта марки Ф-42В (образцы 1, 2, 3), цеолит NaX – глина (образец NaX-B-1Г))

Образец	Наполнитель: связующее, мас. %	W_0 , см ³ /г	$S_{\text{БЭТ}}$, м ² /г	$E_{\text{АДС}}$, кДж/моль	$d_{\text{В.О.}}$, А	$d_{\text{МЕЗО}}$, нм
1	90 : 10	0.308	844	16.8	9.0	4.3
2	80 : 20	0.258	736	16.7	9.4	2.8
3	75 : 25	0.244	708	17.0	9.3	3.1
NaX	Исходный цеолит	0.316	856	16.1	9.1	3.1
NaX-B-1Г	–	0.243	734	16.1	7.9	1.9

Примечание. W_0 – предельный объем адсорбционного пространства, $E_{\text{АДС}}$ – характеристическая энергия адсорбции, $d_{\text{В.О.}}$ – диаметр входного окна, $d_{\text{МЕЗО}}$ – диаметр мезопор).

Золь-гель синтез также используют в других областях [9, 10]. Материалы гелевой структуры могут с успехом применяться для получения формованных сорбентов и композиционных сорбирующих материалов [8].

Следующим шагом развития сорбционной техники стало появление композиционных сорбционно-активных материалов (**КСАМ**), представляющих собой многокомпонентную систему, состоящую из сорбционно-активного наполнителя и связующего для получения прочных гранул. В качестве связующих материалов используют органические и неорганические полимерные материалы различной дисперсности. К адсорбентам второго поколения можно отнести водостойкие силикагели, получаемые формованием диспергированного силикагеля, например с бентонитовой глиной. Однако глина снижает адсорбционную емкость силикагелей за счет блокирования пористой структуры и ОН-групп на поверхности силикагелей и за счет введения в состав адсорбционно-инертной глины [11, 12]. Избежать блокировки пористой структуры можно, используя в виде связующих коллоидные растворы с большими размерами агрегатов, чем размеры пор, такие как грубодисперсные порошки или эмульсии, например фторопласты. В работе [13] проведено сравнение параметров пористой структуры цеолитов марки NaX, гранулированных при использовании глины

(NaX-B-1Г), и эмульсии фторопласта марки Ф-42В в ацетоне (образцы 1, 2, 3), результаты исследования приведены в табл. 2.

Видно, что при использовании эмульсии фторопласта существенной блокировки пористой структуры цеолита не происходит.

Основными недостатками первого и второго поколений сорбирующих материалов в виде гранул являются высокая истираемость материала при работе в динамическом режиме и в условиях вибрационных нагрузок и плохая теплопроводность слоя, приводящая к затруднению десорбции при нагреве. Устранить эти недостатки можно путем создания блочных сорбентов, которые относятся к третьему поколению сорбирующих материалов [14]. Блочными сорбирующими материалами являются порошкообразные и зерновые адсорбенты, сформованные в блоки или таблетки со связующим. Основное применение блочные сорбирующие материалы нашли как осушающие патроны в холодильной технике, электроизмерительных устройствах, оптических приборах, адсорбционных холодильных установках, в процессах короткоциклового безнагревной адсорбции (**КБА**) [13, 15–18]. На рис. 1 показаны таблетированные блочные сорбенты на основе гранулированных и порошкообразных цеолитов [2].

В табл. 3 приведены некоторые параметры блочных КСАМ на основе цеолита NaX и силикагелей

Таблица 3. Характеристики (W_s – предельный объем сорбционного пространства, Пр – прочность на сжатие) КСАМ на основе различных адсорбентов и связующих

КСАМ	W_s , см ³ /г	$D_e \times 10^{11}$, м ² /с	$S_{БЭТ}$, м ² /г	Пр, МПа
КСС-4 + H ₂ SiO ₃ (золь)	0.40	12.1	667	>14
NaX + Ф-4Д (эмульсия)	0.10	–	160	55
КСМ-5 + ПАА (раствор)	0.32	19.0	446	–
NaX + ТСК*	0.20	18.7	–	2.5

* Тетрасиликат калия – связующее (пастообразное состояние).

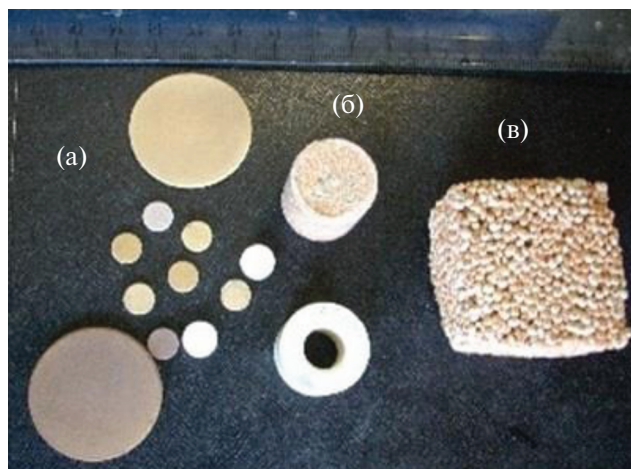


Рис. 1. Таблетированные (а) и блочные (б) КСАМ для использования в качестве осушающих элементов в электронной технике; блочные продуваемые осушители (в), применяемые во фреоновых контурах холодильной техники.

КСМ-5 и КСС-4 вместе с фторопластовыми (Ф-4Д), полиамидными (СФ-2) и полиакриламидными (ПАА) связующими [2].

При формировании блочных КСАМ стоит проблема блокировки пористой структуры адсорбентов связующим материалом. Улучшения диффузионных характеристик КСАМ можно добиться путем изменения дисперсности [19], количества [20] и природы связующего, условий получения КСАМ (температура, время созревания гелей), а также введением в состав КСАМ порообразователей [21] (бикарбонат аммония, органические кислоты) [22], органических пиролизующихся материалов (мука, рисовая шелуха, опилки и т.д.) [23, 24]. Вследствие разложения веществ в КСАМ образуются поры, благотворно влияющие на процесс массопереноса.

Получение блочных КСАМ способствует увеличению теплопроводящих свойств материала [25, 26]. Смешение порошка цеолита с силикоалюминатным гелем и заливка полученной суспензии в медную или никелевую пену (состав композита 65 мас. % цеолита + связующее и 35 мас. % металла) с дальнейшим прессованием и термообработкой при тем-

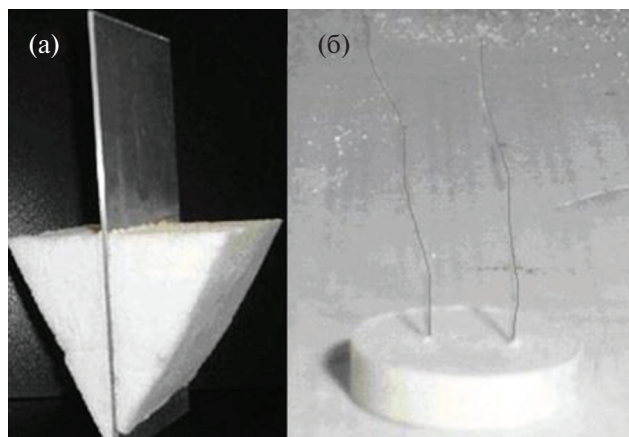


Рис. 2. Блочный КСАМ (КСКГ + золь кремниевой кислоты) с введенным теплопроводящим элементом (а) и таблетированный КСАМ (цеолит + СФ-2) с внедренной нагревательной петлей (б).

пературе 1000°C [26] позволяют получить блочное изделие с повышенной теплопроводностью (табл. 4).

Следующим шагом в развитии сорбционной техники стало создание сорбционных устройств, обеспечивающих воздействие на сорбционное равновесие различных форм энергии. При регенерации сорбционного материала (десорбции) большая часть тепловой энергии рассеивается в окружающую среду, равномерный прогрев материала требует больших затрат времени или сильного перегрева материала. Решением проблемы является ввод теплопроводящего элемента внутрь сорбционно-активного материала (рис. 2а) [27, 28].

Введение теплопроводящего элемента также позволяет осуществлять отвод тепла адсорбции от блочного адсорбента, что способствует повышению кинетических характеристик работы материала (рис. 3).

Интенсификация процесса десорбции возможна при приложении электромагнитного поля совместно с тепловой десорбцией. Известно, что сообщение молекуле путем нагрева значительного количества кинетической энергии способствует ослаблению ее связи с поверхностью сорбента, на которой она адсорбирована. Воздействовать на связь сорбирован-

Таблица 4. Теплофизические характеристики сорбирующих материалов [19]

Форма материала	Теплопроводность, Вт/(м К)		Коэффициент теплопередачи от стенки к блоку, В/(м ² К)	
	шихта	блок	шихта	блок
Гранулы	0.09	0.36	20	45
Порошок + никелевая пена	—	1.7	—	110
Порошок + медная пена	0.17	8.0	35	180

Таблица 5. Энергетические характеристики процесса тепловой десорбции

Время регенерации, мин	Без воздействия ЭМП, $H = 0$		Под воздействием ЭМП, $H = 3$ кА/м	
	Q , кДж	степень регенерации, η , мас. %	Q , кДж	степень регенерации, η , мас. %
20	11	69	14	78
40	22	80	27	88
60	33	84	—	—

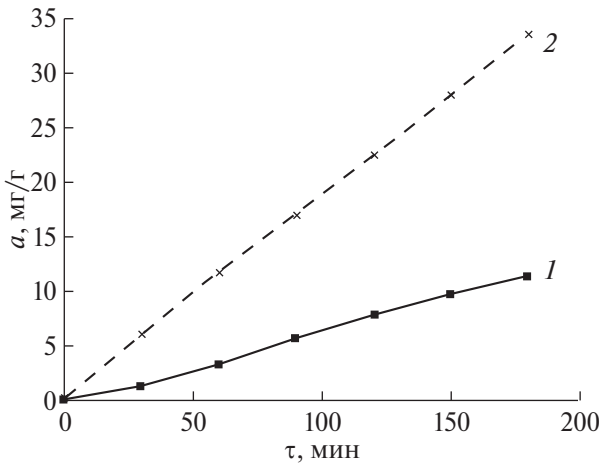


Рис. 3. Кинетические кривые сорбции паров воды без охлаждения (1) и с охлаждением (2) блочного КСАМ путем отвода тепла по теплопроводящему элементу (КСАМ на основе силикагеля марки КСКГ и золя кремниевой кислоты) [20]. a – величина адсорбции паров воды.

ной молекулы с поверхностью можно и путем приложения энергии электромагнитного воздействия, что также приводит к ее ослаблению. Совместить тепловое и электромагнитное воздействие можно внедрением соленоида в блочный или таблетированный КСАМ (рис. 26).

В табл. 5 приведены энергетические характеристики процессов тепловой и совмещенной с электромагнитным воздействием десорбции. Приведенные данные характеризуют вклад энергии Q электромагнитного поля (ЭМП) в общее количество энергии, необходимой для проведения процесса. Данный вклад составляет четверть от общей энергии, затраченной на процесс регенерации, и позволяет повысить степень регенерации до 88% в области остаточной емкости адсорбента, характеризующейся наи-

большей энергией удерживания адсорбированных компонентов.

Большое распространение КСАМ с теплопроводящим элементом получили при создании адсорбционных холодильных ячеек. Одной из перспективных конструкций адсорбционного устройства является оребренная трубная ячейка с нанесенным слоем адсорбента [29].

Нанесение сорбционного материала возможно методами *in situ*, т.е. кристаллизацией алюмофосфатов типа $AlPO$ и $SAPO$ на ребрах адсорбционной ячейки [30], приклеиванием готового сорбента с дальнейшим закреплением связующим [31], окутанием ячейки в суспензию, содержащую сорбент и связующее, с дальнейшей сушкой и спеканием [32]. На рис. 4 показаны адсорбционные оребренные ячейки с адсорбентами, нанесенными различными методами.

Развитие таких адсорбционных ячеек направлено на поиск оптимального соотношения тепло- и массопереноса в слое сорбента. Нахождение оптимума позволит повысить удельную мощность охлаждения адсорбционных холодильных устройств.

Как было указано выше, функционирование химической промышленности сопровождается образованием отходов различного состава и строения. Одним из направлений их использования могут быть технологические решения, направленные на получение сорбирующих материалов.

Технологии получения сорбционно-активных материалов из техногенных отходов

Спектр неорганических отходов, перспективных для получения сорбционно-активных материалов, достаточно широкий. Например, зола уноса является тонкодисперсным остатком сгорания твердого топ-

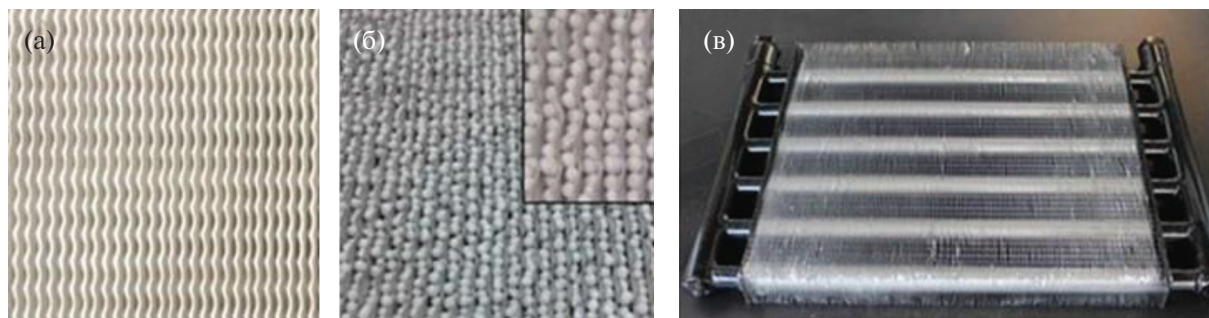


Рис. 4. Ячейка с нанесенным слоем наполнитель + связующее (а), ячейка с гранулированным сорбентом (б), пустая ячейка (в) [25].

лива на угольных ТЭЦ. По фазово-минералогическому составу золу уноса разделяют на кремниевую, кремниво-глиноземистую и кальциевую (кремниво-известковая), по химическому составу золы классифицируют на кислые и основные [3]. В зависимости от фазового и химического состава выбирают технологию переработки. В работе [33] для получения цеолитов использовали золу с содержанием SiO_2 57.78 мас. % и Al_2O_3 18.25 мас. %. Катионообменная емкость полученных цеолитов превышает таковую золы в 5–6 раз.

Другим примером использования золы уноса является удаление паров ртути из дымовых газов электростанций. В работе [34] использовали необработанную кремниво-известковую золу состава SiO_2 32.5 мас. %, CaO 25.7 мас. %, C 19.0 мас. % для удаления паров ртути из системы, моделирующей параметры и состав дымовых газов. Удельная площадь поверхности исследуемой золы составляла $3.55 \text{ м}^2/\text{г}$, суммарный объем пор — $0.005 \text{ см}^3/\text{г}$. Проведенное исследование показало, что эффективность удаления ртути на кремниво-известковой золе достигает 82%, в то время как для сорбентов типа МСМ-41 и глауконита — всего 18.7 и <5% соответственно.

Отходы строительной области являются перспективными материалами для получения сорбентов разной направленности. В работе [35] показано, что крошка бетона (фракция 2–5 мм) является эффективным сорбентом фосфора из сточных вод. Сорбционная емкость сорбента достигает 6.88 мг/г при исходной концентрации 15 мг/л , при этом эффективность процесса достигает 90%. Высокие сорбционные свойства объясняются образованием соединений с компонентами бетонов (гидроксиды Ca , Mg , Si , Al) с малым произведением растворимости. Авторами предложен следующий механизм сорбции фосфора:

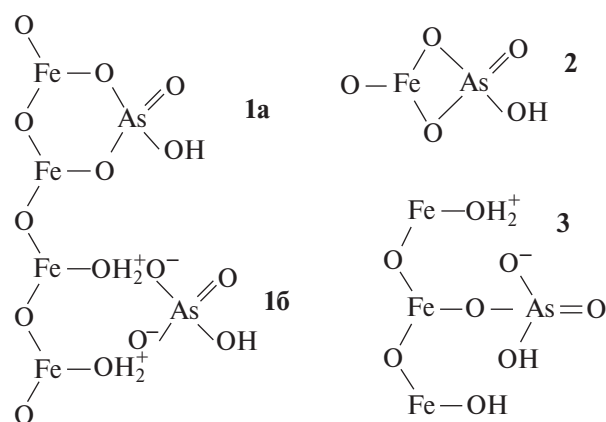
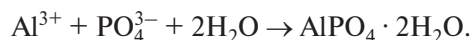
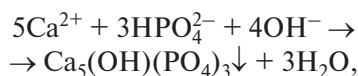


Рис. 5. Различные типы связей между арсенатом и оксидом железа: 1 — двухъядерный бидентатный комплекс (а — хемосорбция, б — физическая сорбция), 2 — моновъядерный бидентатный комплекс (хемосорбция), 3 — монодентатный комплекс (хемосорбция).



Другим многотоннажным отходом являются отходы металлургической промышленности. В работе [36] приведен обзор современных способов использования доменных шлаков (CaO , MgO , Fe_xO_y), гидролизированных с образованием оксигидроксидов, в качестве адсорбентов для очистки сточных вод от различных катионов и анионов. Приведено два примера механизма сорбции мышьяка из водных сред:



Также в работе сообщается о типах полуметаллической связи с поверхностью железистых оксидов шлака (рис. 5).

Приведенные данные [36] показывают, что эффективность извлечения мышьяка As(III)/As(V) из воды при концентрации 10 мг/л и дозе адсорбента,

равной 10 г/л, варьирует в пределах 70–100%. Стоимость данных отходов составляет 12 \$/т стального шлака, что в 80 раз ниже стоимости традиционных активных углей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показан процесс развития технологии получения сорбционно-активных материалов от монокомпонентных систем в виде гранул до блочных сорбционных устройств с возможностью влиять на сорбционное равновесие использованием различных форм энергии. Создание сорбирующих изделий и устройств на основе композиционных сорбционно-активных материалов в настоящее время находит новое применение, это процессы КБА, адсорбционное получение холода, процессы высокоэффективной осушки.

Показаны различные направления получения сорбентов разной природы из техногенных отходов. По отношению к водной среде механизмы адсорбции на техногенных отходах можно разделить на ионный обмен на цеолитовых структурах, известкование, связанное с образованием соединений с малым произведением растворимости, и ферритизацию с формированием малорастворимых ферритов с поверхностными оксидами железа.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 21-79-30029).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Шумяцкий Ю.И.* Промышленные адсорбционные процессы. М.: Колосс, 2009. 183 с.
2. *Самонин В.В., Подвизников М.Л., Никонова В.Ю. и др.* Сорбирующие материалы, изделия, устройства и процессы управляемой адсорбции. СПб.: Наука, 2009. 271 с.
3. *Истомина К.Р., Бургунутдинов К.А., Хусаинова К.А.* // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. 2022. № 1. С. 36.
<https://doi.org/10.15593/24111678/2022.01.05>
4. *Самонин В.В., Спиридонова Е.А., Зотов А.С. и др.* // Журн. общ. химии. 2021. Т. 91. № 8. С. 1284.
5. *Кельцев Н.В.* Основы адсорбционной техники. М.: Химия, 1984. 592 с.
6. *Фаустова Ж.В., Слижов Ю.Г.* // Неорган. материалы. 2017. Т. 53. № 3. С. 276.
7. *Costa J.A.S., de Jesus R.A., Santos D.O. et al.* // Microporous Mesoporous Mater. 2020. V. 291. P. 109698.
<https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2019.109698>
8. *Costa J.A.S., de Jesus R.A., Santos D.O. et al.* // J. Environ. Chem. Eng. 2021. V. 9. № 3. P. 105259.
<https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105259>
9. *Уголков В.Л., Ковальчук Н.А., Осипов А.В. и др.* // Физика и химия стекла. 2023. Т. 49. № 5. С. 522.
<https://doi.org/10.31857/S0132665123600188>
10. *Хомидов Ф.Г., Кадыров З.Р., Усманов Х.Л.* // Неорган. материалы. 2023. Т. 59. № 6. С. 654.
<https://doi.org/10.31857/S0002337X23060167>
11. *Ульянова М.А., Гурова А.С., Шредер В.Е.* // Вестник Тамбовского гос. техн. ун-та. 2006. Т. 12. № 1. С. 83.
12. *Медведев Д.А., Зотов Р.А., Рубанов А.Е. и др.* Пат. РФ № 2700999.
13. *Постернак Н.В., Ферапонтова Ю.А., Ферапонтова Л.Л. и др.* // Перспективные материалы. 2019. № 6. С. 36.
<https://doi.org/10.30791/1028-978X-2019-6-36-44>
14. *Самонин В.В., Подвизников М.Л., Спиридонова Е.А.* Сорбционные технологии защиты человека, техники и окружающей среды. СПб.: Наука, 2021. 531 с.
15. *Акулинин Е.И., Гладышев Н.Ф., Дворецкий С.И.* // Вестник Тамбовского гос. техн. ун-та. 2017. Т. 23. № 1. С. 85.
<https://doi.org/10.17277/vestnik.2017.01.pp.085-103>
16. *Ульянова М.А., Андреев В.П., Ломовцева Е.Е. и др.* // Вестник международной академии холода. 2011. № 4. С. 54.
17. *Гладышев Н.Ф., Гладышева Т.В., Дворецкий С.И.* // Химическая безопасность. 2017. Т. 1. № 1. С. 62.
<https://doi.org/10.25514/CHS.2017.1.11432>
18. *Chenxi Wang, Lingji Hua, Hongzhi Yan et al.* // Joule. 2020. V. 4. № 2. P. 435.
<https://doi.org/10.1016/j.joule.2019.12.005>
19. *Самонин В.В., Федоров Н.Ф.* // Журн. прикл. химии. 1997. Т. 70. № 1. С. 51.
20. *Glaznev I.S., Koptuyug I.V., Aristov Y.I.* // Microporous Mesoporous Mater. 2010. V. 131. P. 358.
<https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2010.01.014>
21. *Gordeeva L., Aristov Y.* // Energies. 2022. V. 15. № 20. P. 7551. <https://doi.org/10.3390/en15207551>
22. *Strauss R., Schallenberg K., Knocke K.F.* // Proc. Int. Symp. Solid Sorption Refrigeration. 1992. 227 p.
23. *Manap N.R.A., Jais U.S.* // Mater. Res. Innovations. 2009. V. 13. № 3. P. 382.
<https://doi.org/10.1179/143307509X441621>
24. *Rat'ko A.I., Ivanets A.I., Azarov S.M.* // Inorg. Mater. 2008. V. 44. № 7. P. 778.
<https://doi.org/10.1134/S0020168508070182>
25. *Zheng X., Ge T.S., Jiang Y. et al.* // Int. J. Refrigerat. 2015. V. 51. P. 24.
<https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2014.11.015>

26. Guillemot J.J., Choisier A., Chalfen J.B. *et al.* // Heat Recovery Systems and CHP. 1993. V. 13. № 4. P. 297. [https://doi.org/10.1016/0890-4332\(93\)90052-W](https://doi.org/10.1016/0890-4332(93)90052-W)
27. Самонин В.В., Ивачев Ю.Ю. // Хим. промышленность. 2003. Т. 80. № 11. С. 574.
28. Акулинин Е.И., Гладышев Н.Ф., Дворецкий Д.С. и др. Пат. РФ № 2625873.
29. Poyelle F., Guillemot J.J., Meunier F. // Ind. Eng. Chem. Res. 1999. V. 38. № 1. P. 298. <https://doi.org/10.1021/ie9802008>
30. Bauer J., Herrmann R., Mittelbach W. *et al.* // Int. J. Energy Res. 2009. V. 33. P. 1233. <https://doi.org/10.1002/er.1611>
31. Frazzica A., Földner G., Sapienza A. *et al.* // Appl. Therm. Eng. 2014. V. 73. № 1. P. 1022. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.09.004>
32. McCague C., Huttema W., Fradin A. *et al.* // Appl. Therm. Eng. 2020. V. 173. P. 115219. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.115219>
33. Котова О.Б., Шабалин И.Л., Котова Е.Л. // Записки Горного института. 2016. Т. 220. С. 526. <https://doi.org/10.18454/PMI.2016.4.526>
34. Wdowin M., Macherzyński M., Panel R. *et al.* // Miheralog. Soc. Poland. 2020. V. 51. P. 17.
35. Deng Y., Wheatley A. // Int. J. Environ. Research Public Health. 2018. V. 15. № 2. P. 357. <https://doi.org/10.3390/ijerph15020357>
36. Mercado-Borrayo B.M., Gonzalez-Charvez J.L., Ramirez-Zamora R.M. // J. Sustainable Metall. 2018. V. 4. P. 50. <https://doi.org/10.1007/s40831-018-0158-4>

PROMISING DIRECTIONS FOR PRODUCTION AND APPLICATION OF INORGANIC SORBENT MATERIALS

V.V. Samonin^{a,*}, E. A. Spiridonova^a, S.P. Khokhlachev^a, and M. L. Podvyaznikov^a

^a*Saint Petersburg State Institute of Technology, Saint Petersburg, 190013 Russia*

^{*}*e-mail: samonin@lti-gti.ru*

This work highlights modern approaches to the production and areas of practical application of composite sorption-active materials based on inorganic sorbents. The physicochemical properties and parameters of the porous structure of composite sorbents are shown. Emphasis is placed on controlled sorption processes using various types of energy by means of an example of inorganic sorbents. Methods for producing sorption materials from alternative raw materials represented by inorganic technogenic waste are analyzed.

Keywords: composite sorption-active material, block sorbent, sorption device, waste