

СИНТЕЗ ТОБЕРМОРИТОВОГО АДСОРБЕНТА ДЛЯ ОЧИСТКИ ВОДЫ**Лебедева Елена Юрьевна,**магистрант кафедры технологии силикатов и наноматериалов
Института физики высоких технологий ТПУ,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30. E-mail: kriolanta@mail.ru**Кобякова Алина Алексеевна,**ученица МБОУ лицея при ТПУ, Россия, 634028, г. Томск, ул. А. Иванова, 4.
E-mail: alinka_kobyakova@mail.ru**Усова Надежда Терентьевна,**канд. техн. наук, преподаватель МБОУ лицея при ТПУ,
Россия, 634028, г. Томск, ул. А. Иванова, 4. E-mail: usovant@tpu.ru**Казьмина Ольга Викторовна,**д-р техн. наук, проф. кафедры технологии силикатов и наноматериалов
Института физики высоких технологий ТПУ,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30. E-mail: kazmina@tpu.ru

Актуальность исследования обусловлена необходимостью переработки вторичного стеклобоя и очистки сточных вод от тяжелых металлов.

Цель работы: установить принципиальную возможность синтеза тоберморитового адсорбента на основе лампового стекла, пригодного для очистки воды от тяжелых металлов.

Методы исследования: рентгенофазовый анализ, дифференциально-термический анализ, химический анализ, атомно-абсорбционная спектроскопия, метод инверсионной вольтамперометрии.

Результаты: Установлена принципиальная возможность синтеза тоберморитовых адсорбентов, пригодных для очистки сточных вод от ионов тяжелых металлов. Определены технологические параметры получения тоберморита в процессе автоклавной обработки: давление 10 атм., температура 190 °С, продолжительность 5 ч. Разработаны составы исходных смесей для получения тоберморита, включающие (мас. %): отходы лампового стекла в количестве 54,4–54,5; гашеную известь 38,5–42,4 и гидроксид натрия 2,0–3,3, а также железосодержащий шлам – 5. Установлено, что эффективность тоберморитовых адсорбентов в статических условиях выше, по сравнению с динамическими условиями, и составляет в среднем для образца, полученного без железосодержащего шлама, – 91 % и для образца с 5 % шлама – 98 %.

Ключевые слова:

Стеклобой, тоберморит, водоочистка, адсорбция, железосодержащий шлам.

Введение

В настоящее время во всех развитых странах проблемы экологического состояния окружающей среды и вторичного использования различных материалов являются главными. Остро стоит вопрос утилизации твердых бытовых отходов, среди которых стекло занимает особое место, в силу того, что представляет собой неразлагающийся отход, засоряющий почвенный слой земли [1]. Переработка и рациональное использование стеклобоя в качестве альтернативного источника минерального сырья является актуальным вопросом. Отходы стекла принято подразделять на сортовой (возвратный) и вторичный (покупной) стеклобой. Состав сортового боя полностью соответствует химическому составу стекла, вырабатываемому в стекловаренной печи. В связи с этим большинство стекольных заводов полностью возвращают брак собственного стекла в технологический процесс. При этом утилизация отходов обеспечивает (при 60 % использовании) экономию соды (1 т стеклобоя снижает расход кальцинированной соды на 140–145 кг),

6 % энергии, 50 % чистой воды и 54 % естественных ресурсов [2]. Вторичный стеклобой, образующийся в сфере потребления, как правило, имеет переменный химический и фазовый состав, наличие примесей, что сдерживает его использование. Стекольные заводы частично используют вторичный бой, так как существует опасность ухудшения однородности стекломассы и соответственно качества продукции. Основная проблема переработки стеклобоя заключается в утилизации вторичного материала, который и составляет основное количество не утилизируемого боя [3, 4].

Известны следующие направления использования отходов стекла: промышленность строительных и теплоизоляционных материалов, дорожное строительство, стекольная промышленность и прочие области применения. В связи с экологическими проблемами и необходимостью экономии топливно-энергетических ресурсов исследования по созданию композиционных материалов с техногенными отходами, включая стеклобой, являются одними из интенсивно развивающихся направле-

ний [5–7]. Наряду с этим возможности применения промышленного стеклобоя в качестве минерального сырья раскрыты еще не полностью, поэтому внимание исследователей привлекают новые направления использования отходов стекла. Например, разработка британских ученых, которые предложили использовать бой стекла в процессе очистки загрязненной воды для удаления свинца, кадмия и других токсичных металлов подобно ионообменному фильтру [8]. С этой целью разработан простой метод преобразования отходов стекла в минерал тоберморит, который как ионообменный материал способен извлекать ионы токсичных металлов из промышленных стоков, сточных вод или загрязненных грунтовых вод.

Цель настоящей работы – установить принципиальную возможность синтеза тоберморитового адсорбента на основе лампового стекла, пригодного для очистки воды от тяжелых металлов.

Материалы и методы исследования

В качестве основных компонентов для синтеза тоберморита в работе использованы следующие материалы: стеклобой лампового стекла (марка СЛ-96), известь (ГОСТ 9179–77) и едкий натр (ГОСТ 2263–79). Теоретическими предпосылками выбора данных материалов явились следующие факторы. Наиболее распространенным видом вторичного стеклобоя являются силикатные стекла, в том числе и ламповое, с основным стеклообразующим оксидом – кремнеземом. Источником оксида кальция, входящего в состав тоберморита, выбрана гашеная известь, которая также является распространенным сырьем, широко применяемым в производстве различных вяжущих веществ. Гидроксид натрия выбран как реагент, непосредственно разрушающий кремнекислородный каркас стекла.

Исследование фазового состава материала осуществляли с использованием рентгеноструктурного анализа на дифрактометре ДРОН-3М в медном излучении с монохроматизацией дифрагированного пучка кристаллом пиролитического графита. Физико-химические процессы, протекающие при термообработке смеси на стадии синтеза тоберморита, изучались методом дифференциально-термического анализа на сканирующем калориметре DSC Q2000. Определение содержания ионов металлов в растворах проводилось методом атомно-эмиссионной спектроскопии на спектрометре ДФС-458С и методом вольтамперометрии (анализатор ТА – Lab).

Результаты и их обсуждение

Тоберморитовая группа является представителем цепочечных силикатов, минерал относится к низкоосновным силикатам кальция с общей формулой $\text{Ca}_n\text{Si}_x\text{O}_{16}(\text{OH})_2n\text{H}_2\text{O}$ (где n меняется от двух до восьми молекул). В природе данный силикат образуется в результате метаморфизма карбонатных пород и обычно имеет белый или светло-розовый оттенки, полупрозрачный с шелковистым блеском

[9]. Тобермориты имеют слоистое строение и отличаются друг от друга количеством межслоевой воды и межслоевыми расстояниями: тоберморит 14 Å (пломбьерит), тоберморит 11,3 Å, тоберморит 9,3 Å (риверсайдит). Искусственный аналог тоберморита синтезируется при взаимодействии портландцемента с водой и играет важную роль в процессе схватывания цемента [10], также его можно получать на основе различных видов отходов [11–13]. Молекулярная модель тоберморита (рис. 1) представлена слоями бесконечных цепочек тетраэдрических группировок $[\text{SiO}_4]^{4-}$, которые, соединяясь между собой, чередуются со слоями оксида кальция, выстраиваясь в упорядоченную структуру. В свободных полостях структуры располагаются молекулы воды. Синтетические гидросиликаты кальция отличаются от природных регулируемой степенью дисперсности, однородностью по составу и строению, низким содержанием примесей. Особенность структуры минерала позволяет использовать его в качестве ионообменного материала. Высокоразвитая поверхность дисперсных порошков гидросиликатов делает их эффективными экологически безопасными наполнителями и сорбентами различных веществ.

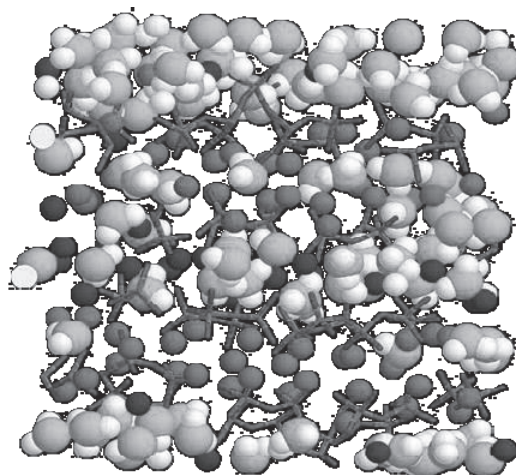


Рис. 1. Молекулярная модель C-S-H: серым и белым цветом показаны атомы кислорода и водорода в молекуле воды, черным – ионы кальция (внутрислойные и межслойные), палочками – атомы кремния и кислорода в тетраэдрах (иллюстрация PNAS)

Из классической литературы известно, что процесс автоклавного твердения известково-песчаных изделий можно интенсифицировать, вводя в состав исходной смеси добавки, ускоряющие процесс образования цементирующего вещества [14]. Все добавки условно делят на две группы. Первая включает большое количество растворимых в воде соединений, которые, находясь в растворе, ускоряют реакцию взаимодействия с кремнеземом в условиях автоклавной обработки. Вторая группа представляет собой активные тонкодисперсные добавки, вводящие в состав массы кремнезем, глинозем или оксид железа, а также их соединения. В [15] показан способ получения сорбента на основе ги-

доксида железа, где в качестве исходного компонента использованы отработанные растворы различных гальванических производств. Данное изобретение позволяет утилизировать отходы производства и получить дешевый механически прочный, обладающий высокой обменной емкостью сорбент. В настоящей работе опробованы составы с дополнительно введенным железосодержащим шламом водоподготовки (далее ЖСШ), состоящим преимущественно из гетита и лепидокрокита, включающих железо в оксидно-гидроксидной форме (FeOОН)

Содержание основных компонентов смеси для синтеза тоберморита рассчитывалось с учетом стехиометрической формулы тоберморита и химического состава самих компонентов (табл. 1, 2).

Таблица 1. Химический состав тоберморита и компонентов смеси

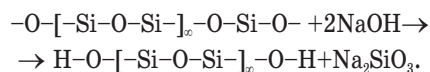
Оксидный состав тоберморита			Компонент смеси	Массовое содержание, %		
Оксид	Число молей	мас. %		SiO ₂	CaO	NaOH
SiO ₂	6	49	Стеклобой	72	6	–
CaO	5	38	Известь	–	95	–
H ₂ O	5,5	13	Едкий натр	–	–	98,5

Таблица 2. Содержание компонентов в исходных смесях

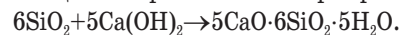
Компонент смеси	Массовое содержание, %			
	Образец 1	Образец 2	Образец 3	Образец 4
Стеклобой	54,4	54,5	54,5	54,5
Известь	42,4	41,5	38,5	34,5
Едкий натр	3,2	3,0	2,0	1,0
ЖСШ	–	1,0	5,0	10,0

Для наиболее полного протекания реакций необходимо, чтобы исходные материалы имели высокую степень дисперсности, поэтому смесь предварительно измельчалась в шаровой мельнице до порошкообразного состояния с последующим прессованием образцов в виде таблеток (d=30 мм). Далее образцы подвергались термообработке в автоклаве при 190 °С, давлении 10 атм. в течение 5 ч. Данные параметры автоклавирования предварительно подобраны экспериментально, путем изменения температурно-временного режима (температура менялась в пределах 170...200 °С, давление 5–12 атм., выдержка 4–6 ч) и оценки фазового состава синтезированного продукта [16]. Химические процессы, протекающие при термообработке, можно представить в следующем виде:

1. На первой стадии щелочного взаимодействия происходит разрыв кремнекислородного каркаса стекла, в результате чего стекло разрушается. Активное действие ионов щелочи приводит к высвобождению на поверхности стекла ионов OH⁻ и повышению его реакционной способности. В высокощелочной среде кремнезем, входящий в состав стекла, частично переходит в растворимый силикат.



2. На второй стадии синтеза гидросиликатов кальция в первую очередь происходит взаимодействие активного кремнезема стекла с гидроксидом кальция и образование тоберморита.



На термограммах всех образцов наблюдаются три эндозффекта, связанные со следующими процессами: 107...113 °С – дегидратация низкоосновных гидросиликатов кальция; 440...455 °С – разложение Ca(OH)₂; 670...714 °С – разложение мелкодисперсного CaCO₃ (рис. 2). На термограмме образца 3 (рис. 3) практически отсутствует пик, связанный с разложением Ca(OH)₂. Это указывает на то, что весь гидроксид кальция вступил во взаимодействие с образованием гидросиликатов кальция, что подтверждается данными РФА (рис. 4). Несмотря на то, что гидросиликаты кальция в присутствии CaCO₃ трудно определяются из-за совпадения самого интенсивного пика (3.03 Å), в фазовом составе данного образца (рис. 4) преобладают гидросиликаты кальция тоберморитовой группы (тоберморит, риверсайдит и пломбьерит). На дифрактограмме образца 1 обнаружены дифракционные максимумы, принадлежащие тобермориту, кальциту (CaCO₃) и порتلандиту (Ca(OH)₂). На дифрактограмме образца 2, помимо порتلандита и кальцита, идентифицируется оксид кальция (CaO) и феррит кальция (CaFe₂O₇). Фазовый состав образца 4 представлен кальцитом, пломбьеритом и ферритом кальция. Таким образом гетит, составляющий основу ЖСШ, при автоклавной обработке превращается в феррит кальция CaFe₂O₇.

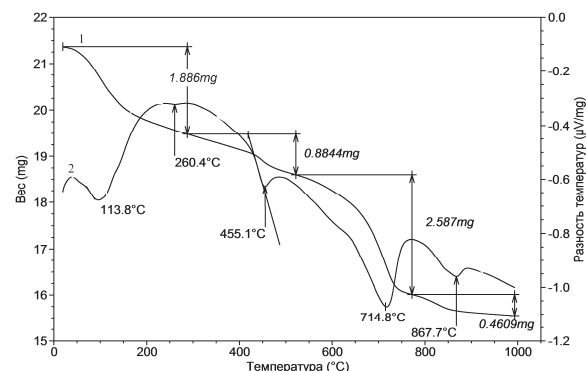


Рис. 2. Термограмма образца тоберморита, полученного из стекла, извести и едкого натра: 1) дифференциальная сканирующая калориметрия; 2) термогравиметрия

Для определения адсорбционных свойств синтезированного тоберморита в отношении катионов металлов использовался модельный раствор, имитирующий сточную воду гальванического производства, с содержанием ионов тяжелых металлов, в 50 раз превышающем ПДК: меди (10,6 мг/дм³), цинка (88,9 мг/дм³) и никеля (1,49 мг/дм³). Адсорбционную очистку модельного раствора осуществляли в статических и динамических условиях.

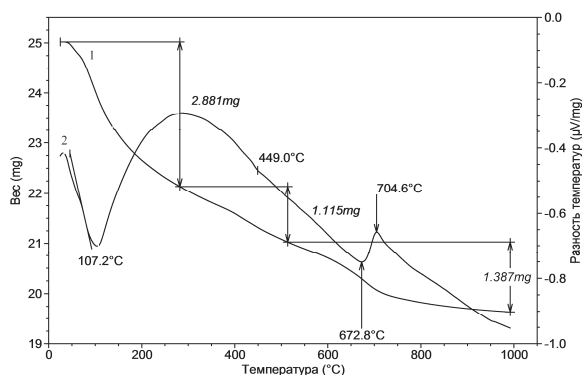


Рис. 3. Термограмма образца тоберморита, полученного с добавлением 5 % железосодержащего шлама: 1) дифференциальная сканирующая калориметрия; 2) термогравиметрия

При статической обработке 0,8 г адсорбента помещали в 200 мл модельного раствора, смесь тщательно перемешивали и оставляли на сутки для достижения сорбционного равновесия. Через некоторое время на поверхности сорбента в растворе наблюдали образование хлопьевидного осадка. Спустя сутки раствор фильтровали через фильтр «синяя лента». В полученном фильтрате определяли остаточное содержание металлов. Определение содержания ионов никеля проводили методом атомно-эмиссионной спектроскопии, а ионов меди и цинка методом инверсионной вольтамперометрии. Полученные результаты представлены в табл. 3. Лучшие адсорбционные свойства проявил образец, полученный из смеси с добавлением 5 % железосодержащего шлама. Образование хлопьевидного осадка на поверхности сорбентов указывало на то, что помимо ионного обмена происходит процесс хемосорбции с образованием гидроксидов металлов, входящих в состав модельного раствора, что обусловлено щелочной средой поверхности адсорбентов. Действительно, определение свободной щелочности водной вытяжки сорбентов составило 20–25 ммоль/л.

Исходя из полученных результатов, для исследований в динамических условиях, в целях экономии ресурсов, были выбраны только два сорбента: без введения железосодержащего шлама и с добавлением его в количестве 5 %. Для проведения

сорбционной очистки в динамических условиях 5 г сорбента засыпали в стеклянную колонку, через которую со скоростью 5–6 мл/мин пропускали модельный раствор. Общий объем пропущенного модельного раствора составлял 400 мл. Для анализа остаточного количества ионов металлов в каждом опыте отбирали последовательно по две пробы объемом по 200 мл. Эффективность очистки, соответствующая адсорбционной способности образцов, рассчитывалась как отношение разности концентраций загрязнителя (иона тяжелого металла) в воде до и после контакта с адсорбентом к начальному содержанию загрязнителя.

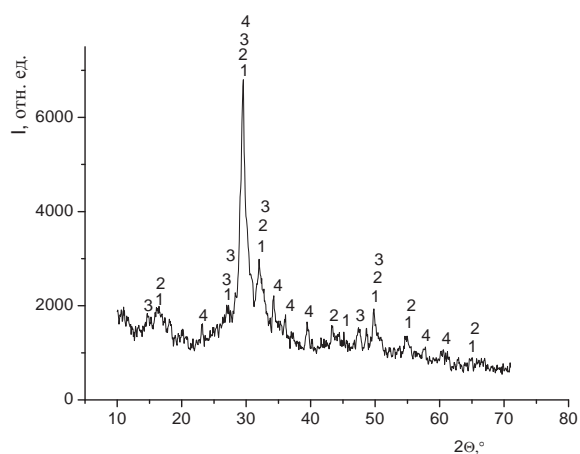


Рис. 4. Рентгенограмма образца тоберморита, полученного с добавлением 5 % железосодержащего шлама: 1 – тоберморит ($5CaO \cdot 6SiO_2 \cdot 5,5H_2O$); 2 – плумбьерит ($5CaO \cdot 6SiO_2 \cdot 7H_2O$); 3 – риверсайдит ($5CaO \cdot 6SiO_2 \cdot H_2O$); 4 – кальцит ($CaCO_3$)

Результаты, представленные в табл. 3, указывают на то, что эффективность очистки модельного раствора в статических условиях гораздо выше, чем в динамических условиях, что объясняется большей продолжительностью контакта активной поверхности адсорбентов с частицами загрязнителей. Лучшие характеристики наблюдаются у образца, полученного из смеси с добавлением 5 % железосодержащего шлама. Данный сорбент обеспечивает высокую эффективность очистки от ионов тяжелых металлов: Cu – 98,9, Zn – 98,5 и Ni – 95,7 %.

Таблица 3. Показатели эффективности очистки воды от ионов тяжелых металлов

Содержание ионов тяжелых металлов, мг/дм ³		Адсорбционные свойства тоберморитовых адсорбентов							
		В статистических условиях				В динамических условиях			
		1	2	3	4	1	1	3	3
Cu	В исходной воде	10,60	10,60	10,60	10,60	10,60	10,60	10,60	10,60
	После контакта с адсорбентом	0,15	0,25	0,12	0,17	3,48	2,83	5,80	2,60
	Эффективность очистки, %	98,6	97,6	98,9	98,4	67,2	73,3	45,30	75,5
Zn	В исходной воде	88,90	88,90	88,90	88,9	88,90	88,90	88,90	88,9
	После контакта с адсорбентом	9,30	25,10	1,29	6,60	37,20	24,20	54,30	47,7
	Эффективность очистки, %	89,50	71,8	98,50	92,60	58,20	72,80	38,9	46,3
Ni	В исходной воде	1,49	1,49	1,49	1,49	1,49	1,49	1,49	1,49
	После контакта с адсорбентом	0,23	0,28	0,064	95,70	0,48	0,36	0,69	0,56
	Эффективность очистки, %	84,6	81,2	95,7	85,90	67,8	75,8	53,70	62,4

Выводы

1. Установлена принципиальная возможность синтеза тоберморитовых адсорбентов, пригодных для очистки сточных вод от ионов тяжелых металлов. Определены технологические параметры получения тоберморита в процессе автоклавной обработки: давление 10 атм., температура 190 °С, продолжительность 5 ч.
2. Установлено, что оптимальными для получения тоберморита являются два состава со следующим содержанием компонентов (мас. %): стекло ламповое – 54,4, известь гашеная – 42,4,

гидроксид натрия – 3,2; стекло ламповое – 54,5, известь гашеная – 38,5, гидроксид натрия – 2,0, железосодержащий шлак – 5,0.

3. Установлено, что эффективность тоберморитовых адсорбентов в статических условиях выше, по сравнению с динамическими условиями, и составляет в среднем для образца, полученного без железосодержащего шлака – 91 % и для образца с 5 % шлака – 98 %.

Исследования выполнены на оборудовании «Научно-аналитического центра» НИ Томского политехнического университета при финансовой поддержке ГЗ «Наука» № 1235.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Imteaz M.A., Ali M.M.Y., Arulrajah A. Possible environmental impacts of recycled glass used as a pavement base material // *Waste Management&Research*. – 2012. – V. 30. – № 9. – P. 917–921.
2. Боженов П.И. В сб.: Безотходные технологии и использование вторичных продуктов и отходов в промышленности строительных материалов. – М.: Стройиздат, 1985. – С. 38–40.
3. Edwards K.L., Axinte E., Tabacaru L.L. A critical study of the emergence of glass and glassy metals as «green» materials // *Materials&Design*. – 2013. – V. 50. – P. 712–723.
4. Mueller J.R., Boehm M.W., Drummond C. Direction of CRT waste glass processing: Electronics recycling industry communication // *Waste Management*. – 2012. – V. 32. – № 8. – P. 1560–1565.
5. Alani A., MacMullen J., Telik O., Zhang Z.Y. Investigation into the thermal performance of recycled glass screed for construction purposes // *Construction and Building Materials*. – 2012. – V. 29. – P. 527–532.
6. Зайцева Е.И. Строительные безобжиговые композиты на основе боя технических стекол // *Ж. Рос. Хим. об-ва им. Д.И. Менделеева*. – 2003. – Т. XLVII. – № 4. – С. 26–31.
7. Makowski C., Finkl C.W., Rusenko K. Suitability of Recycled Glass Cullet as Artificial Dune Fill along Coastal Environments // *Journal of Coastal Research*. – 2013. – V. 29. – № 4. – P. 772–782.
8. Coleman N.J. 11 Å tobermorite ion exchanger from recycled container glass // *Int. J. of Environment and Waste Management*. – 2011. – V. 8. – № 3/4. – P. 366–382.
9. Лйбау Ф. Структурная химия силикатов. – М.: Мир, 1988. – 416 с.
10. Антипина С.А., Верецагин В.И. Термостойкий материал для литья алюминия // *Известия Томского политехнического университета*. – 2009. – Т. 314. – № 3. – С. 8–11.
11. Coleman N.J. Interactions of Cd (II) with waste-derived 11 Å tobermorites // *Separation and Purification Technology*. – 2006. – V. 48. – P. 62–70.
12. Reinik J., Heinmaa I., Mikkola J.P., Kirso U. Hydrothermal alkaline treatment of oil shale ash for synthesis of tobermorites // *Fuel*. – 2007. – V. 86. – P. 669–676.
13. Coleman N.J., Trice C.J., Nicholson J.W. 11 Å tobermorite from cement bypass dust and waste container glass: a feasibility study // *Int. J. Miner. Process*. – 2009. – V. 93. – P. 73–78.
14. Боженов П.И. Технология автоклавных материалов. – Л.: Стройиздат, 1978. – 368 с.
15. Способ получения сорбента на основе смешанных гидроксидов металлов. пат. Рос. Федерация № 2060814; заявл. 09.02.1993; опубл. 27.05.1996; Бюл. № 17. – 3 с.
16. Лебедева Е.Ю., Казьмина О.В. Синтез тоберморита на основе промышленного стеклобоя. Перспективы развития фундаментальных наук: Труды IX Междунар. конф. студентов и молодых учёных. – Томск, 2012. – С. 420–422.

Поступила 20.12.2013 г.

UDC 666.1.022.8

TOBERMORITE ABSORBENT SYNTHESIS FOR WATER PURIFICATION

Elena Yu. Lebedeva,Tomsk Polytechnic University,
Russia, 634050, Tomsk, Lenin avenue, 30. E-mail: kriolanta@mail.ru**Alina A. Kobyakova,**Lyceum at TPU, Russia, 634028, Tomsk, A. Ivanov street, 4.
E-mail: alinka_kobyakova@mail.ru**Nadezhda T. Usova,**Cand. Sc., Lyceum at TPU, Russia, 634028, Tomsk, A. Ivanov street, 4.
E-mail: usovant@tpu.ru**Olga V. Kazmina,**Dr. Sc., Tomsk Polytechnic University,
Russia, 634050, Tomsk, Lenin avenue, 30. E-mail: kazmina@tpu.ru

The urgency of the discussed issue is caused by the need to provide the technology of industrial recycling of secondary glass waste and water purification from heavy metals.

The main aim of the study: to determine the basic possibility of tobermorite absorbent synthesis on the base of secondary glass waste for water purification from heavy metals.

The methods used in the study: X-ray phase analysis, differential and thermal analysis, chemical analysis, nuclear and absorbing spectroscopy, method of an inversion voltamperometry.

The results: The basic opportunity of tobermorite synthesis water purification was established. The authors have determined the technological parameters of obtaining tobermorite at autoclave processing: pressure 10 atm., temperature 190 °C, 5 hours of temporary endurance. The compositions of initial compounds were developed (wt. %): waste of lamp glass is 54,4–54,5; extinguished lime is 38,5–42,4, caustic sodium is 2,0–3,3, iron slime is 5. It was established, that the efficiency of the tobermorite filter is higher in static conditions, in comparison with dynamic conditions. It was averaged for samples obtained without iron slime – 91 %, for the sample with 5 % of iron slime – 98 %.

Key words:

Cullet, tobermorite, water treatment, adsorption, ferriferous slime.

REFERENCES

1. Imteaz M.A., Ali M.M.Y., Arulrajah A. Possible environmental impacts of recycled glass used as a pavement base material. *Waste Management & Research*, 2012, vol. 30, no. 9, pp. 917–921.
2. Bozhenov P.I. *Bezotkhodnye tekhnologii i ispolzovanie vtorichnykh produktov i otkhodov v promyshlennosti stroitelnykh materialov* [Waste-free technologies and use of secondary products and waste in the industry of construction materials]. Moscow, Stroyizdat, 1985. Pp. 38–40.
3. Edwards K.L., Axinte E., Tabacaru L.L. A critical study of the emergence of glass and glassy metals as «green» materials. *Materials & Design*, 2013, vol. 50, pp. 712–723.
4. Mueller J.R., Boehm M.W., Drummond C. Direction of CRT waste glass processing: Electronics recycling industry communication. *Waste Management & Research*, 2012, vol. 32, no. 8, pp. 1560–1565.
5. Alani A., MacMullen J., Telik O., Zhang Z.Y. Investigation into the thermal performance of recycled glass screed for construction purposes. *Construction and Building Materials*, 2012, vol. 29, pp. 527–532.
6. Zaytseva E.I. Stroitelnye bezobzhigovye kompozity na osnove boya tekhnicheskikh stekol [Construction composites without roasting on the base of technical glass waste]. *Zhurnal Rossiyskogo khimicheskogo obshchestva imeni D.I. Mendeleeva*, 2003, vol. XLVII, no. 4, pp. 26–31.
7. Makowski C., Finkl C.W., Rusenko K. Suitability of Recycled Glass Cullet as Artificial Dune Fill along Coastal Environments. *Journal of Coastal Research*, 2013, vol. 29, no. 4, pp. 772–782.
8. Coleman N.J. 11 Å tobermorite ion exchanger from recycled container glass. *Int. J. of Environment and Waste Management*, 2011, vol. 8, no. 3/4, pp. 366–382.
9. Libau F. *Strukturnaya khimiya silikatov* [Structural chemistry of silicates]. Moscow, Mir Publ., 1988. 416 p.
10. Antipina S.A., Vereshchagin V.I. Termostoyky material dlya litya alyuminiya [Heat-resistant material for aluminum molding]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2009, vol. 314, no. 3, pp. 8–11.
11. Coleman N.J. Interactions of Cd (II) with waste-derived 11 Å tobermorites. *Separation and Purification Technology*, 2006, vol. 48, pp. 62–70.
12. Reinik J., Heinmaa I., Mikkola J.P., Kirso U. Hydrothermal alkaline treatment of oil shale ash for synthesis of tobermorites. *Fuel*, 2007, vol. 86, pp. 669–676.
13. Coleman N.J., Trice C.J., Nicholson J.W. 11 Å tobermorite from cement bypass dust and waste container glass: A feasibility study. *Int. J. Miner. Process*, 2009, vol. 93, pp. 73–78.
14. Bozhenov P.I. *Tekhnologiya avtoklavnykh materialov* [Technology of autoclave materials]. Leningrad, Stroyizdat Publ., 1978. 368 p.
15. Kazantseva N.M., Nikiforov A.Yu., Ilyina L.A., Zolotova T.P. *Sposob polucheniya sorbenta na osnove smeshannykh gidroksidov metallov* [The way of receiving a sorbent on the base of the mixed metals hydroxides]. Patent RF, no. 2060814, 1993.
16. Lebedeva E.Yu., Kazmina O.V. Sintez tobermorita na osnove promyshlennogo stekloboya [Tobermorite synthesis on the base of industrial cullet]. *Perspektivy razvitiya fundamentalnykh nauk. Trudy IX Mezhdunarodnoy konferentsii studentov i molodykh uchennykh* [Prospects of development of fundamental sciences. Works IX of the International conference of students and young scientists]. Russia, Tomsk, 2012, pp. 420–422.