

Металлургия техногенных и вторичных ресурсов

УДК 54.058

DOI: 10.14529/met190208

СОРБЦИОННАЯ ОЧИСТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ГАЗОВ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА ОТ СЕРОСОДЕРЖАЩИХ КОМПОНЕНТОВ

О.В. Черемисина, М.А. Пономарева, В.А. Болотов

Санкт-Петербургский горный университет, г. Санкт-Петербург, Россия

На сегодняшний день во время постоянного развития технологий по переработке сырья для металлургического производства необходимо постоянное улучшение технико-экономических и экологических показателей. Проблема очистки технологических газов является актуальной в связи с тем, что на металлургических предприятиях в результате пирометаллургической переработки сырья, имеющего в своем составе серосодержащие соединения, образуются отходящие газы, содержащие сероводород, меркаптаны и другие вредные вещества. Металлургические заводы в своей основе представляют собой крупнейшие источники загрязнения воздушного бассейна газовыми выбросами, исчисляемыми десятками тысячами тонн в год, к которым относятся газы доменного, конверторного, коксового, ферросплавного и других производств. Отходящие газы содержат компоненты, выброс которых в атмосферу недопустим по санитарно-гигиеническим соображениям. В целях экологической безопасности серосодержащие газы подвергаются переработке. На сегодняшний день существует множество способов переработки отходящих газов: сухие, мокрые, газофазные, каталитические, реагентные способы утилизации сернистых соединений. В области защиты окружающей среды важное место отводится адсорбционным методам. Разнообразие сорбентов и возможных технических решений позволяют применять системы сорбционной очистки практически во всех отраслях промышленности. Одним из перспективных направлений сорбционной утилизации отходящих газов металлургического производства является использование адсорбента на основе отечественных железомарганцевых руд. В данной работе проведен анализ литературных данных по очистке технологических газов от серосодержащих примесей металлургических производств с использованием различных видов сорбентов. Приведены исследования по сорбции примесных компонентов на цеолитах, активных углях и марганцевых рудах различного состава, проведено сравнение емкостных параметров представленных сорбентов и других характеристик. Рассмотрены установки по сорбции газов и технологические параметры проведения процесса сорбции – оптимальная температура, давление и скорость пропускания газа через сорбенты.

Ключевые слова: железомарганцевые руды, сероводород, меркаптаны, очистка газов, сорбция.

Введение

Металлургия – одна из наиболее развитых отраслей в российской экономике. По важности для российской экономики металлургическая отрасль занимает второе место после нефтегазовой промышленности. Металлургический комплекс Российской Федерации является одним из наиболее крупных потребителей топливно-энергетических ресурсов, так как предприятия металлургии используют около 20 % электроэнергии от общепромышленного уровня [1].

Вместе с тем российские металлургические предприятия с точки зрения экологии в своей основе представляют собой крупнейшие источники загрязнения воздушного бассейна газовыми выбросами, исчисляемыми десятками тысячами тонн в год, к которым относятся выбросные газы доменного, конверторного, коксового, ферросплавного и других производств.

Многие газы, образующиеся в металлургических производствах, содержат компоненты, выброс которых в атмосферу недопустим

по санитарно-гигиеническим соображениям. К таким примесям относятся сернистый и серный ангидриды, хлор и хлористый водород, фтор и фтористый водород, окислы азота, сероводород, сероуглерод и др. Выброс этих газов в атмосферу вредно отражается на здоровье людей и животных, а также приводит к гибели растений и усиленной коррозии металлических и бетонных сооружений. Многие из упомянутых компонентов целесообразно использовать для получения тех или иных продуктов. Например, улавливая SO_2 , можно получать его в жидком виде или переработать на серную кислоту; улавливая хлористый водород, можно получать соляную кислоту и т. д.

Обычно очистка газов от тех или иных газообразных примесей осуществляется сорбционными методами – поглощением этих примесей жидкостями или твердыми телами (адсорбентом), а в редких случаях – за счет химических реакций с газообразными добавками, в результате которых либо ликвидируется вредность, либо образуется твердое или жидкое соединение в виде пыли (тумана). Улавливание газовых компонентов твердыми веществами в цветной металлургии почти не применяется; в отдельных случаях для этой цели используются материалы с сильно развитой поверхностью – силикагель, активированный уголь, активная двуокись марганца или пиролюзит [2].

Из широкого ряда адсорбентов, применяемых в металлургической промышленности как для очистки сточных вод, так и отводных газов, наибольший интерес представляют адсорбенты на основе железомарганцевых руд – железомарганцевых конкреций [3]. Однако для эффективного использования железомарганцевых конкреций при очистке металлургических выбросных газов необходима всесторонняя проработка технологических решений, реализующих данный способ утилизации побочных газовых продуктов.

Перспективным материалом для сорбции серосодержащих газов является марганцевая руда, изучаемая авторами. Химический состав – важнейший индикатор не только генезиса, но и условий накопления оксидных железомарганцевых руд. Вариации железа и марганца определяют геохимический набор цветных, редких и редкоземельных компонентов. Наличие металлов в составе марганцевых руд определяет эффективность их использования в качестве сорбционных материалов.

Авторы работы [4] активно изучали элементный состав железомарганцевых материалов. Материалом для исследования послужили российские стандартные образцы океанских отложений: железомарганцевые конкреции ГСО 5373–90 (ООПЕ 601), ГСО 5374–90 (ООПЕ 602), ГСО 5375–90 (ООПЕ 603); рудная корка ГСО 5376–90 (ООПЕ 604) и стандартные образцы состава железомарганцевых конкреций Геологической службы США – NOD-A-1 и NOD-P-1.

Методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой авторами было определено содержание 41 элемента в отечественных стандартных образцах железомарганцевых конкреций.

Новые результаты применения метода масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой представляют несомненный интерес, так как полученные данные по содержанию редкоземельных элементов, Be, Sc, Cs, W и другим дополняют имеющиеся сведения по этим образцам.

Очистка газов сорбционными методами

Во время очистки технологических газов на активированном угле от сероводорода (H_2S) происходит две химические реакции: основная реакция с получением элементарной серы (S) и побочная экзотермическая реакция с образованием серной кислоты (H_2SO_4). Интенсивность образования H_2SO_4 зависит от содержания в руде металлов, например железа (Fe).

Исходная концентрация сероводорода в вентиляционном газе составляет $4\text{--}5 \text{ г/м}^3$, после проведения процесса сорбции концентрация H_2S в газах составляет не более $20\text{--}50 \text{ мг/м}^3$. Также отмечена зависимость активности активированного угля от влажности, что подтверждается падением активности активированного угля при влажности $6\text{--}8 \%$ [5].

При очистке горючих газов от сероводорода помимо образования элементарной серы происходит улавливание углеводородов и осушка газов. Максимальное содержание H_2S в газах не должно превышать концентрации 5 г/м^3 , иначе это может привести к воспламенению. Однако встречаются газы с содержанием H_2S до 10 г/м^3 , и в таком случае процесс сорбции ведут в строгом температурном режиме от 70 до $100 \text{ }^\circ\text{C}$ и содержание кислорода поддерживают не менее $0,1 \%$ [5].

В работе П. Мачак и М. Мартинек [6] изучена высокотемпературная очистка газа от H_2S с использованием синтезируемого нового сорбента. В работе использован модельный генераторный газ с содержанием H_2S , намного превышающим предельно допустимые значения, которые соответствуют количеству менее 1 ppm, составляющим 0,01 об. %. Использовался сорбент, приготовленный из гидроксидов металлов (Zn, Fe, Al, Na, Cu, Mg), которые переводились в оксиды и подвергались кальцинации. Изначально газ смешивался с парами минеральных кислот и далее процесс сорбции проводили в реакторе с двойной рубашкой при температуре 500–700 °С.

Далее газ поступал в холодильник с температурой (50 ± 1) °С, где происходила конденсация водяного пара и минеральных кислот. После холодильника очищенный газ поступал на поглотитель. Масса сорбента составляла 20 г, скорость пропускания газовой смеси 85 л/ч (101 кПа, 20 °С).

Термодинамические расчеты велись по закону сохранения масс. Значение емкости сорбента при температуре 500 °С варьировалось в интервале значений 0,86–28,1 ммоль-экв/г, при температуре 700 °С 0,5–39,7 ммоль-экв/г, в зависимости от соотношения компонентов.

Авторами работы [7] изучена очистка газов от метилмеркаптана (CH_3SH) с использованием активированного угля на основе скорлупы кокосовых орехов (СКО). СКО модифицировали мочевиной и далее прокаливали при температурах 450 и 950 °С. Авторами были проведены исследования в динамических условиях при атмосферном давлении. Исходная концентрация CH_3SH составляла 0,3 об. %. В реакторе соблюдались условия 25 °С и относительная влажность 80 %. Эксперимент проводили до тех пор, пока концентрация на выходе не составляла 50 ppm. Также изучали удаление смеси газов H_2S 0,3 об. % и CH_3SH 0,03 об. %. В результате работы были сделаны выводы, что модификация мочевиной увеличивает емкость сорбента (емкость до модификации составляла 71,8 мг/г). Также имеется зависимость от температуры прокаливания сорбента: при прокаливании САС при температуре 450 °С емкость составила 169,5 мг/г, при 950 °С – 232,6 мг/г.

Коллективом авторов [8] была изучена очистка одорированного природного газа меркаптанами. В качестве сорбентов использовали материалы, характеризующиеся иона-

ми металлов, связанных с органическими мостиковыми лигандами, называемыми металлческими органическими каркасами (МОК) на основе Cu-BTC, 31 MIL-53-(Al), 32, 33 и UiO-66(Zr). Емкостные характеристики сравнивались с цеолитами NaY. Исследования проводили при температуре 35 °С и атмосферном давлении. Через сорбенты пропускали смесь газов, содержащую трет-бутил меркаптан (ТБМ) в количестве 60 ppm в метане или в гелии. Скорость пропускания смеси газов составляла 90 мл/мин. После процесса очистки газа сорбенты подвергались регенерации при температуре 200 °С в течение 1 ч пропусканием гелия. Авторами были сделаны выводы, что при использовании смеси газов наибольшая селективность и емкость наблюдается при использовании меркаптана в гелии, нежели в присутствии метана для сорбента Cu-BTC. Для сорбентов MIL-53(Al) и UiO-66(Zr) было отмечено, что не имеет принципиального значения, что используется в качестве газа-носителя и емкость составила 0,16 г/г. NaY показывает более низкую емкость, 0,11 г/г, ТБМ для смеси в гелии по сравнению со смесью в метане.

Авторами из Кореи [9] были проведены исследования по очистке биогаза на коммерческих сорбентах. В качестве сорбентов использовались оксид железа (IO, pellet type), два метагидроксида железа (IH и IHS), активированный уголь (AC), пропитанный активированный уголь (IAC), два селикагеля (A2 и NS10). Очистку биогаза проводили от H_2S , CS_2 и COS и циклогексанов. В качестве газаносителя использовался N_2 . Диаметр реактора составлял 9,5 мм и высота слоя сорбентов 200 мм. Перед экспериментом сорбенты дегазировали в вакууме (давление < -1 бар) для удаления примесей при температуре 120–200 °С в течение 2 ч. Газы подавали в реакторы при концентрациях серосодержащих соединений 1900 ppm H_2S , 100 ppm COS и 100 ppm CS_2 с постоянной скоростью 300 мл/мин. Температуру в реакторе поддерживали 25 °С. В результате работы были получены следующие сорбционные характеристики: емкость метагидроксида железа по H_2S составила 132 мг/г; для оксида железа по H_2S – 69 мг/г. Авторами был сделан вывод о том, что в процессе очистки этими сорбентами протекала хемосорбция между компонентами сорбентов FeO(OH), Fe_2O_3 и H_2S . Наибольшая емкость по сорбции COS составила для сорбентов NS10 – 24 мг/г,

IHS – 13 мг/г, ИH – 8,38 мг/г. Для газа CS₂ емкость составила AC – 26,4 мг/г, IAC – 24,23 мг/г. Авторами сделан вывод, что высокая емкость для некоторых сорбентов связана с большей удельной площадью поверхности адсорбентов, поскольку их средние размеры пор были примерно в 1–2 раза больше, чем молекулярный размер адсорбатов.

Использование марганцевых руд в качестве сорбентов для очистки технологических газов

В последнее десятилетие исследования в области очистки технологических газов с использованием марганцевых руд активно не изучались зарубежными учеными, а преобладающее количество исследований осуществлялось российскими учеными, коллективы которых динамично развивали данное направление [10–12].

Например, авторы работы [13] исследовали технологический образец железомарганцевой руды, извлеченный с подводных гор Магеллан в северо-западной части тропического Тихого океана и состоящий в основном из гидроксидов марганца (вернадит, асболан и редкий тодорокит) и гидроксидов железа (гидрогетит, гетит и редкий магнетит). Неметаллические минералы представлены гидрослюдами, апатитом, реже каолинитом и следами кварца и кальцита. Средние содержания металлов в образце следующие, %: Fe₂O₃ – 19,0, MnO – 21,0, Co – 0,48, Ni – 0,33, Cu – 0,10 и Zn – 0,057. Авторы работы выполняли следующие шаги эксперимента. Тонко измельченный материал (2 г) помещали в кварцевую трубку, через которую пропускали H₂S в двух временных режимах: 24 ч (температура 100 и 200 °C) и 4 ч (600 °C). Также в систему были добавлены инертные газы Ar или N₂. Смесь газов предварительно пропускали через сорбент для полного удаления возможных примесей. Изменения фазового состава материала регистрировали с помощью просвечивающего электронного микроскопа, снабженного устройством микродифракции. Проведенные эксперименты позволили обнаружить образование микрочастиц пирита при 100 °C. При нагревании пирит приобретает более совершенную кристаллическую форму при 200 °C и разрушается при 600 °C. Образование и разрушение магнетита происходит по тому же подобному сценарию. При 200 °C можно наблюдать образование комковатых

агрегатов слабо кристаллизованного алабандина, превращенного при 600 °C в пластинчатые кристаллы, которые накапливают весь Mn и часть Fe, содержащихся в породе. При максимальной температуре платина и золото избирательно кристаллизуются в виде пластинчатых частиц и природная сера накапливается. Состав этих вновь образованных минералов несопоставим с минералогией природной железомарганцевой руды, и полученные экспериментальные результаты демонстрируют чрезвычайно высокую сорбционную способность железомарганцевой руды к сероводороду, что указывает на большие перспективы практического применения ФМК в промышленных и экологических целях.

В работе [14] были рассмотрены поиски путей уменьшения количества NO в отходящих газах промышленного производства азотной кислоты. Во время исследований авторами была проанализирована эффективность процесса сорбции оксида азота из газовой смеси с использованием имеющегося сорбента – суспензии на основе железомарганцевых конкреций, а также было выполнено экспериментальное определение оптимальных условий для процесса сорбции.

Авторами были сделаны выводы, что суспензия на основе железомарганцевых конкреций является эффективным сорбентом, позволяющим удалять до 83–85 % оксида азота NO из газовых смесей. Железомарганцевые конкреции обладают рядом преимуществ, которые отличают этот сорбент от тех, которые используются в существующих технологиях очистки: удаление NO выше, чем в существующих технологиях (60–75 %); бюджетная стоимость; относительная доступность; высокая химическая активность; легкость регенерации. Эти характеристики открывают широкие перспективы для промышленного использования исследуемого сорбента.

Авторами [15] было предложено использовать дешевые природные железомарганцевые руды в качестве хемосорбентов для высокотемпературной десульфурации. После многочисленных лабораторных и стендовых испытаний железомарганцевая руда месторождения Аскиз была выбрана в качестве оптимального сорбента H₂S.

Этот природный хемосорбент имеет высокую сорбционную способность по сере (до 25 мас. %) при 500 °C, высокую прочность и является селективным, то есть он не вступает

в побочные реакции с восстанавливающими компонентами синтез-газа.

На основе результатов испытаний авторами были разработаны технические решения для применения оптимального природного хемосорбента для десульфурации генераторного газа с низкой и высокой производительностью.

Оценена эффективность высокотемпературной десульфурации генераторного газа с природным хемосорбентом. Выявлено, что использование рудного сорбента Аскиз для высокотемпературной десульфурации газа, полученного при газификации кузнецкого угля марки А на ПГУ мощностью 470 МВт, повышает его эффективность с 45,55 до 47,67 % по сравнению с обычным процессом очистки МЭА.

Заключение

Анализ литературных источников показал, что существенной экологической проблемой являются выбросы в атмосферу технологических газов различных металлургических производств, что приводит к необходимости очистки этих газов от примесных компонентов, в частности серосодержащие газы.

Одним из способов очистки технологических газов является сорбция на твердых сорбентах, таких как цеолиты, в составе которых имеются цветные металлы. Данные сорбенты показывают высокие емкостные характеристики, однако имеют высокую стоимость. Также в качестве сорбентов используются активные угли, которые имеют высокую емкость и прочность, однако у них низкая селективность. Одним из перспективных материалов для очистки технологических газов от серосодержащих примесей являются сорбенты на основе марганцевой руды, которые имеют в составе цветные металлы, а также железо, что в свою очередь оказывает каталитическое действие, что позволяет проводить процесс очистки при нормальных условиях и не требует дополнительных затрат на оборудование.

Литература

1. Экономика России, цифры и факты. Часть 8. Металлургия. 30.06.2015. – <https://utmagazine.ru/posts/10561-ekonomika-rossii-cifry-i-fakty-chast-8-metallurgiy>.

2. Физико-химические основы газозлавления. 03.06.2015. – <http://metal-archive.ru/osnovy-metallurgii/2069-fiziko-himicheskie-osnovy-gazozlavlivaniya.html>.

3. Черемисина, О.В. Технологические аспекты защиты гидросферы от ионов тяжелых металлов в зоне влияния объектов цветной металлургии / О.В. Черемисина // Записки горного института. – 2013. – Т. 203. – С. 116–119.

4. Определение элементного состава стандартных образцов железомарганцевых образований методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой / Н.В. Зарубина, М.Г. Блохин, П.Е. Михайлик, А.С. Семенов // Стандартные образцы. – 2014. – № 3. – С. 33–43.

5. Кельцев, Н.В. Основы адсорбционной техники: моногр. / Н.В. Кельцев. – М.: Химия, 1984. – 592 с.

6. Machac, P. High temperature separation of H₂S from producer gas produced of biomass gasification by artificially prepared sorbents / P. Machac, M. Martinec // International Journal of Environmental Science and Technology. – 2018. DOI: 10.1007/s13762-018-2050-y

7. Adsorption/oxidation of sulfur-containing gases on nitrogen-doped activated carbon / Qiang Liu, Ming Ke, Pei Yu et al. // MATEC Web of Conferences MMME 2016. – 2016. – Vol. 63. – P. 1–4. DOI: 10.1051/mateconf/20166301033

8. Metal Organic Frameworks for Selective Adsorption of *t*-Butyl Mercaptan from Natural Gas / G. Chen, S. Tan, W.J. Koros, C.W. Jones // Energy Fuels. – 2015. – 29 (5). – P. 3312–3321.

9. Removal of sulfur compounds and siloxanes by physical and chemical sorption / Chul-u Bak, Chan-Jong Lim, Jong-Gyu Lee et al. // Separation and Purification Technology. – 2019. – Vol. 209. – P. 542–549. DOI: 10.1016/j.seppur.2018.07.080

10. Investigation of the Sorption Properties of Ore Materials for the Removal of Sulfur Dioxide from Exhaust Flue Gases of Power Plants / N.V. Shikina, S.R. Khairulin, N.A. Rudina et al. // Eurasian Chemico-Technological Journal, 2015, vol. 17, no. 2, pp. 137–143. DOI: 10.18321/ectj204

11. Особенности вещественного состава и физико-химических свойств природных марганцевых образований, пригодных для использования в качестве сорбентов очистки газовых выбросов / И.Г. Луговская, О.А. Якушина, А.Н. Епихин, М.С. Хозяинов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2014. – № 4. – С. 279–283.

12. Батурун, Г.Н. Элементный состав железомарганцевых конкреций Черного моря /

Г.Н. Батулин // *Океанология*. – 2010. – Т. 50, № 1. – С. 89–98.

13. Батулин, Г.Н. Преобразование минерального состава железомарганцевых корок под воздействием сероводорода / Г.Н. Батулин, В.Т. Дубинчук, И.О. Крылов // *Литология и полезные ископаемые*. – 2010. – № 5. – С. 451–460. DOI: 10.1134/S0024490210050019

14. Отработка процесса поглощения оксида азота сорбентом на основе железомарганцевых конкреций / О.М. Флисюк, Д.А. Но-

викова, Н.А. Марцулевич, В.В. Гришин // *Журнал прикладной химии*. – 2018. – Вып. 91, № 5. – С. 709–714.

15. Повышение эффективности парогазовых установок с газификацией углей за счёт высокотемпературной сероочистки генераторного газа с применением природного хемосорбента / А.А. Строков, А.Н. Епихин, К.В. Тимашков, И.О. Крылов // *Энергетика и машиностроение*. – 2016. – № 6. – С. 22–27. DOI: 10.1007/s10749-016-0724-5

Черемисина Ольга Владимировна, д-р техн. наук, доцент, заведующий кафедрой физической химии, Санкт-Петербургский горный университет, г. Санкт-Петербург; ovcheremisina@yandex.ru.

Пономарева Мария Александровна, канд. техн. наук, ассистент кафедры физической химии, Санкт-Петербургский горный университет, г. Санкт-Петербург; mashulka-05@mail.ru.

Болотов Виктор Андреевич, аспирант кафедры металлургии, Санкт-Петербургский горный университет, г. Санкт-Петербург; vab-94@mail.ru.

Поступила в редакцию 3 апреля 2019 г.

DOI: 10.14529/met190208

SORPTION PURIFICATION OF PROCESS GASES OF METALLURGICAL PRODUCTION FROM SULFUR COMPONENTS

O.V. Cheremisina, ovcheremisina@yandex.ru,

M.A. Ponomareva, mashulka-05@mail.ru,

V.A. Bolotov, vab-94@mail.ru

Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, Russian Federation

Today, during the continuous development of technologies for the processing of raw materials for metallurgical production, constant improvement of technical, economic and environmental indicators is necessary. The problem of purification of process gases is relevant due to the fact that metallurgical enterprises as a result of pyrometallurgical processing of raw materials, including sulfur-containing compounds, produce waste gases containing hydrogen sulfide, mercaptans and other harmful substances. Metallurgical plants are basically the largest sources of air pollution by gas emissions, estimated at tens of thousands of tons per year, which include blast-furnace, converter, coke, ferroalloy and other gases. Exhaust gases contain components whose emission into the atmosphere is unacceptable for sanitary and hygienic reasons. For environmental safety, sulfur-containing gases are recycled. To date, there are many ways to process waste gases: dry, wet, gas-phase, catalytic, reagent methods for the disposal of sulfur compounds. In the field of environmental protection, an important place is given to adsorption methods. A variety of sorbents and possible technical solutions allow the use of sorption purification systems in virtually all industries. One of the promising areas of sorption disposal of metallurgical production waste gases is the use of an adsorbent based on

domestic ferromanganese ores. In this paper, we analyzed the literature data on the purification of process gases from sulfur-containing impurities of metallurgical industries using various types of sorbents. Studies on the sorption of impurity components on zeolites, activated carbons and manganese ores of different composition are presented, the capacitance parameters of the presented sorbents and other characteristics are compared. Considered installation for the sorption of gases and the technological parameters of the process of sorption – the optimum temperature, pressure and gas transmission rate through the sorbents.

Keywords: ferromanganese ores, hydrogen sulfide, mercaptans, gas purification, sorption.

References

1. *Ekonomika Rossii, tsifry i fakty. Chast' 8. Metallurgiya* [Economy of Russia, Figures and Facts. Part 8. Metallurgy.] Available at: <https://utmagazine.ru/posts/10561-ekonomika-rossii-cifry-i-fakty-chast-8-metallurgiya>.
2. *Fiziko-khimicheskiye osnovy gazoulavlivaniya* [Physical and Chemical Principles of Gas Collection]. Available at: <http://metal-archive.ru/osnovy-metallurgii/2069-fiziko-himicheskie-osnovy-gazoulavlivaniya.html>.
3. Cheremisina O.V. [Technological Aspects of Protecting the Hydrosphere from Heavy Metal Ions in the Zone of Influence of Non-Ferrous Metallurgy Objects]. *Journal of Mining Institute*, 2013, vol. 203, pp. 116–119. (in Russ.)
4. Zarubina N.V., Blokhin M.G., Mikhailik P.E., Segrenev A.S. [Determination of the Elemental Composition of Standard Samples of Ferromanganese Formations by Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry]. *Standard Samples*, 2014, vol. 3, pp. 33–43. (in Russ.)
5. Keltsev N.V. *Osnovy adsorbtsionnoy tekhniki* [Basics of Adsorption Technology]. Moscow, Chemistry Publ., 1984. 592 p.
6. Machac P., Martinec M. High Temperature Separation of H₂S from Producer Gas Produced of Biomass Gasification by Artificially Prepared Sorbents. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2018. DOI: 10.1007/s13762-018-2050-y
7. Qiang L., Ming K., Pei Y., Hai Qiang H., Xi Ming Y. Adsorption/Oxidation of Sulfur-Containing Gases on Nitrogen-Doped Activated Carbon. *MATEC Web of Conferences MMME 2016*, 2016, vol. 63, pp. 1–4. DOI: 10.1051/mateconf/20166301033
8. Chen G., Tan S., Koros W.J., Jones C.W. Metal Organic Frameworks for Selective Adsorption of t-Butyl Mercaptan from Natural Gas. *Energy Fuels*, 2015, 29 (5), pp. 3312–3321.
9. Chul-u Bak, Chan-Jong Lim, Jong-Gyu Lee, Young-Deuk Kim, Woo-Seung Kim. Removal of Sulfur Compounds and Siloxanes by Physical and Chemical Sorption. *Separation and Purification Technology*, 2019, vol. 209, pp. 542–549. DOI: 10.1016/j.seppur.2018.07.080
10. Shikina N.V., Khairulin S.R., Rudina N.A., Teryaeva T.N., Mikhaylova E.S., Ismagilov Z.R. Investigation of the Sorption Properties of Ore Materials for the Removal of Sulfur Dioxide from Exhaust Flue Gases of Power Plants. *Eurasian Chemico-Technological Journal*, 2015, vol. 17, no. 2, pp. 137–143. DOI: 10.18321/ectj204
11. Lugovskaya I.G., Yakushina O.A., Epikhin A.N., Khozyainov M.S. [Mineral Composition and Physic-Chemical Properties of Natural Manganese Formations Suitable for Use as a Sorbents Clearing Gases Emissions]. *Mountain Information-Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)*, 2014, no. 4, pp. 279–283. (in Russ.)
12. Baturin G.N. [The Elemental Composition of Ferromanganese Nodules of the Black Sea]. *Oceanology*, 2010, vol. 50, no. 1, pp. 89–98. (in Russ.)
13. Baturin G.N., Dubinchuk V.T., Krylov I.O. [Transformation of the Mineral Composition of Ferromanganese Crusts under the Influence of Hydrogen Sulfide]. *Lithology and Mineral Resources*, 2010, vol. 45, iss. 5, pp 401–409. DOI: 10.1134/S0024490210050019
14. Flisyuk O.M., Novikova D.A., Martsulevich N.A., Grishin V.V. [Transformation of the Mineral Composition of Ferromanganese Crusts under the Influence of Hydrogen Sulfide]. *Zhurnal Prikladnoi Khimii*, 2018, vol. 91, no. 5, pp. 709–714. (in Russ.)

15. Stokov A.A., Epikhin A.N., Timashkov K.V., Krylov I.O. Improving the Efficiency of Coal-Gasification Combined-Cycle Power Plants by Using Natural Chemisorbent for High-Temperature Desulfurization of the Producer Gas. *Power Technology and Engineering*, 2016, vol. 50, iss. 4, pp. 419–423. DOI 10.1007/s10749-016-0724-5

Received 3 April 2019

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Черемисина, О.В. Сорбционная очистка технологических газов металлургического производства от серосодержащих компонентов / О.В. Черемисина, М.А. Пономарева, В.А. Болотов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». – 2019. – Т. 19, № 2. – С. 71–78. DOI: 10.14529/met190208

FOR CITATION

Cheremisina O.V., Ponomareva M.A., Bolotov V.A. Sorption Purification of Process Gases of Metallurgical Production from Sulfur Components. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Metallurgy*, 2019, vol. 19, no. 2, pp. 71–78. (in Russ.) DOI: 10.14529/met190208