

Металлургия техногенных и вторичных ресурсов

УДК 66.011

DOI: 10.14529/met200209

УТИЛИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ГАЗОВ ПЕРСПЕКТИВНЫМИ СОРБЦИОННЫМИ МАТЕРИАЛАМИ

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

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

Металлургическое производство является одной из наиболее важных отраслей промышленности по объёму негативных выбросов в атмосферу. Нередко на металлургических предприятиях приходится использовать руду с очень низким содержанием полезных компонентов для извлечения стратегически ценных металлов. В связи с этим огромный объем рудных материалов поступает на обогащение и плавку, а это, в свою очередь, способствует образованию большого количества отходящих газов. Таким образом, загрязнение атмосферы является главной причиной экологических проблем, возникающих в результате деятельности металлургических предприятий. Выбросы технологических газов производств приводят к колоссальным загрязнениям природы и образованию серьезной опасности для жизни живых организмов. Кроме того, экологические проблемы отечественной металлургии не решаются из-за ряда причин. Одной из главных является недостаточная оснащенность технологических агрегатов системами очистки и обезвреживания и неэффективная работа действующих пыле- и газоочистных установок, а также использование других устаревших технологий очистки газовых выбросов (Е.П. Большина «Экология металлургического производства»).

Ключевые слова: сорбент, металлургия, очистка газов, сорбция.

Введение

Металлургия не стоит на месте и продолжает реализовывать новые способы переработки сырья с получением ценных компонентов. Но жители многих промышленных регионов отрицательно относятся к возведению новых заводов, очистные системы которых не всегда эффективно выполняют свою задачу [1].

В настоящее время металлургические заводы пытаются справиться с экологическими проблемами, внедряя новое оборудование на существующих предприятиях, которое уменьшает загрязнение окружающей среды, путем модернизации уже существующего оборудования, а в некоторых случаях вынуждены разрабатывать новые процессы, которые являются менее загрязняющими, чем уже существующие [2].

Черная металлургия

Большие объемы получаемых технологических газов в металлургической промышленности являются следствием большого тоннажа перерабатываемого материала. Основными источниками загрязнения являются следующие:

Производство кокса

Кокс является необходимым сырьем для производства железа в доменной печи. Загрязнение при производстве кокса происходит из следующих источников:

- выброс пыли и ядовитых газов, таких как CO, H₂S и других, во время загрузки и выгрузки материалов, т. е. когда крышки открываются для засыпки угля и когда двери открываются для удаления кокса;

- выброс пыли и ядовитых газов во время закалки раскаленного кокса водой для охлаждения и предотвращения его сгорания;

- неконденсируемые газы, выходящие из печи, содержащие H₂S и другие органические соединения серы. Эти газы обычно сжигаются для подачи тепла в те же печи либо для котлов и других установок. Таким образом, отходящие газы данных процессов содержат SO₂. Не так много существует заводов, где удаляют H₂S и органические соединения серы, прежде чем использовать эти газы в качестве топлива [2].

Производство железа

Во время производства железа в доменной

печи в результате реакции азота с коксом образуется некоторое количество цианистого водорода, HCN и газообразного дициана C_2N_2 . Газ доменной печи содержит от 0 до 2000 мг/м³ этих цианосоединений, которые являются высокотоксичными. В системе пылеулавливания газы очищаются водой и часть этой воды попадает в утилизацию отходов. Перед сливом все цианистые соединения должны быть уничтожены. Шлаки доменного производства содержат CaS, который образуется главным образом из серы в коксе. H_2S выделяется при закатке и складировании, имеет резкий специфический запах и очень ядовит [2].

Производство стали

Мартеновский процесс. При изготовлении стали мартеновским способом в качестве флюса использовали плавиновый шпат, CaF_2 . Присутствие воды в газах сгорания в топке приводит к ее разложению с образованием фтороводородного газа, который попадает в дымовую трубу. Концентрация фтористого водорода в дымовом газе составляла около 3000 ppm. Из такого типа источника ежегодно выбрасывалось около 100 000 т фтористого водорода. Одна из причин, по которой этот процесс был прекращен, – повреждение растительности и болезни рогатого скота, находившегося в непосредственной близости от металлургических заводов [2].

Кислородная продувка стали. При изготовлении стали методом кислородного дутья образуются густые пары оксида железа. Из-за чрезвычайно мелкого размера частиц их трудно удалить из дымовых газов.

Травление. Перед обработкой поверхности сталь должна быть протравлена, т. е. обработана в кислотном растворе для удаления тонкой оксидной пленки. Серная кислота повсеместно использовалась для этой цели, потому что это была самая дешевая кислота. Отработанная кислота, теперь содержащая сульфат железа, выбрасывалась. При повышенных нормах отработанная кислота нейтрализовывалась известью, в то же время осаждающая железо перед утилизацией. Проблема была решена путем перехода на соляную кислоту вместо серной, хотя это было дороже. Причина заключалась в том, что хлорид железа можно было экономически выгодно преобразовать в Fe_2O_3 .

Пыль электродуговой печи. Во время производства стали в электропечах цинковая пыль шихты испаряется из-за высокой темпе-

ратуры и конденсируется в системе сбора пыли в виде мелких частиц. Эта пыль обычно выбрасывалась. Однако позже было отмечено, что цинк в пыли может растворяться и загрязнять поверхностные или подземные воды. Поэтому были разработаны способы обработки пыли для восстановления для восстановления содержащегося в ней цинка перед её утилизацией [2].

Алюминиевая промышленность

Алюминиевая промышленность основана на выщелачивании боксита гидроксидом натрия при высокой температуре и давлении для извлечения чистого алюминия, который далее восстанавливается углеродом в электролизерах. Углеродные электроды для электролизеров бывают двух типов: предварительно обожженные или обожженные на месте. В первом типе электроды изготавливаются на специальной установке и используются в ячейках по мере необходимости. Во втором типе, названном электродами Содерберга, углеродистая паста периодически добавляется в большой корпус и тепло, выделяемое из ячейки, превращает пасту в твердый анод. В обоих случаях электрод состоит из кокса, связанного со смолой. В процессе выпечки некоторые компоненты смолы улетучиваются, вызывая загрязнение окружающей среды. Электроды Содерберга считались более экономичными и заменяли предварительно обожженные электроды. Сегодня эта тенденция обращена вспять, современная технология основана на предварительно обожженных электродах, хотя и более дорогая, но менее загрязняющая на рабочем месте. В процессе производства металлического алюминия CO и CO_2 образуются в результате электролитического восстановления Al_2O_3 углеродными электродами. Эти газы, как правило, не считаются вредными для окружающей среды, поскольку CO обычно сжигается до CO_2 перед выходом из штабеля. Однако они всегда содержат небольшое количество соединений фтора. Выброс фтора из этого источника составил около 3 млн т в год. Источником этого фтора является конденсированный электролит в клетках. Современные восстановительные установки не только решили эту проблему, но и извлекли большую часть фтора, поступающего в клетку, сорбируя его на Al_2O_3 .

Переработка сульфидных руд

При извлечении меди, никеля и цинка из их сульфидных руд SO_2 образуется в

больших количествах. Проблема, связанная с этим газом, имеет две стороны:

- около 30 % этого газа фактически используется для производства H_2SO_4 , а остальная часть выбрасывается в атмосферу, потому что его концентрация в выходных газах слишком низка, чтобы использовать ее для получения кислоты. Миллионы тонн SO_2 из этого источника ежегодно выбрасываются в окружающую среду;

- сульфидные руды обычно содержат небольшое количество ртути, мышьяка, селена и теллура. Эти примеси либо попадают в технологические газы, используемые для образования H_2SO_4 , либо выбрасываются в атмосферу. Следовательно, необходимо разработать процессы, чтобы справиться с этой опасностью, поскольку эти металлы очень ядовиты.

Восстановление или удаление SO_2

Процессы, нацеленные на решение проблемы SO_2 в расплавленных газах путем получения высококонцентрированного SO_2 , подходящего для сжижения, или выходящих газов, богатых SO_2 , которые подходят для производства H_2SO_4 , должны предполагать существование соседнего рынка. Из-за неотложности проблемы даже предполагалось изменить существующую технологию и искать новые процессы, в которых SO_2 не является продуктом реакции. Процессы, дающие элементарную серу, были бы идеальными, потому что серу легко хранить, дешево транспортировать, и при необходимости ее можно легко преобразовать в SO_2 или H_2SO_4 . В этом отношении гидрометаллургия предлагает многообещающий подход. Большинство реверберационных печей, которые выпускают большую часть выбросов SO_2 , были заменены печами мгновенной плавки, которые производят SO_2 в концентрациях, подходящих для производства серной кислоты.

Устранение металлических примесей из плавильных газов

Значительное количество As, Se и Te улетучивается во время обработки сульфидных руд, и большинство из них собирается в системе улавливания пыли. Но ртуть, которая также улетучивается и присутствует в отходящих газах, не удаляется такой системой из-за ее гораздо более низкой концентрации. Для решения этой проблемы были разработаны процессы, и в настоящее время они широко применяются. Можно упомянуть следующие.

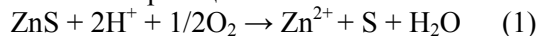
Процесс Оутокумпу. В этом процессе

SO_2 охлаждается в котлах-утилизаторах, затем его пыль удаляется в циклонах и электростатических осадителях. Затем газ при $350\text{ }^\circ\text{C}$ охлаждают в теплообменниках примерно до $200\text{ }^\circ\text{C}$, используя концентрированную H_2SO_4 в качестве теплообменной среды. Затем его очищают той же кислотой, которая в настоящее время находится при температуре от 150 до $200\text{ }^\circ\text{C}$, чтобы преобразовать элементарную ртуть в сульфат. Кислота рециркулируется, и когда она насыщается $HgSO_4$, кристаллы разделяются в загустителях.

Процесс Ода. Этот процесс основан на очистке газов раствором хлорида ртути. Ртуть в газах будет реагировать с образованием хлорида ртути, который предварительно очищается и фильтруется.

Гидрометаллургическая обработка

Путь пирометаллургической обработки сульфидных концентратов был исторически логичным и единственно известным. Однако когда гидрометаллургический процесс хорошо изучили, то стало очевидно, что возможны и другие пути развития, основанные на образовании элементарной серы, что позволяет избежать проблемы с SO_2 . При определенных условиях выщелачивания (температура около $150\text{ }^\circ\text{C}$, в кислой среде и в окислительной атмосфере) элементарная сера может быть получена непосредственно за один этап. Цинковая промышленность была первой и единственной, которая до сих пор применяла такую технологию. До Первой мировой войны цинк производился исключительно в результате ретортных процессов, которые были сильно загрязняющими и энергоемкими. Впоследствии стали использовать метод обжига-выщелачивания. Эта новая технология, однако, создала серьезные проблемы с утилизацией. Наконец, в 1980-х годах была внедрена технология выщелачивания под давлением, в результате которой вместо SO_2 производили элементарную серу в соответствии с реакцией:



Процесс автономен в отношении потребления кислоты, поскольку цинксодержащий раствор может быть электролизован по стандартной технологии для получения кислоты, необходимой для выщелачивания. Элементарная сера может быть складирована для использования при необходимости для производства H_2SO_4 или отправлена на большие

Металлургия техногенных и вторичных ресурсов

расстояния до рынка сбыта. Кислород является более предпочтительным по сравнению с другими окислителями, т. е. например, ион Fe^{3+} , HNO_3 и т. д., поскольку его не нужно регенерировать. Та же технология может быть применена к другим сульфидным концентратам. В случае халькопирита процесс также автономен в отношении кислоты, используемой, когда медьсодержащий раствор подвергается электролизу или осаждению водородом под давлением.

Первоначально автоклавы использовались для выщелачивания бокситов более 100 лет назад, а для выщелачивания латеритов применялись в 1940-х годах, но с середины 1980-х годов эта технология получила значительное развитие применительно к концентратам сульфида цинка и упорных сульфидных золотосодержащих руд.

Опыт эксплуатации в технологии автоклава позволил добиться быстрого прогресса, и в результате работа стала намного более плавной и безопасной. Новые специальные сплавы были введены для сокращения времени обслуживания. Сложные контрольно-измерительные приборы обеспечивают множество функций безопасности. Усовершенствованный дизайн позволил повысить доступность, и, как следствие, снизились эксплуатационные и эксплуатационные расходы. Многие из этих автоклавов работают до 9 месяцев без остановки. Теперь доступны большие и эффективные мембранные поршневые насосы, которые могут непрерывно питать автоклавы. Резервуары для регенерации тепла из

выгруженного шлама широко используются для эффективной работы [2].

Перспективные сорбционные технологии

Процесс сорбции имеет огромное значение для улавливания технологических газов. Сорбенты, используемые в газоочистке, имеют различную поверхность и структуру, которые определяют их физико-химические свойства и механизмы взаимодействия с веществами.

Основные требования к сорбентам:

- химическая инертность по отношению к очищаемым объектам;
- нетоксичность;
- ограниченное содержание в сорбенте радионуклидов, органических веществ, обладающих общетоксичным, мутагенным или канцерогенным действием.

Главным требованием к сорбентам является их высокая сорбционная емкость. Важнейшая характеристика сорбентов – их удельная поверхность, а также пористость [3].

Все известные технологические процессы металлургической отрасли, такие как производство чугуна, стали и их последующие переделы, сопровождаются образованием больших количеств отходов в виде вредных газов и пыли, шлаков, шламов, сточных вод, содержащих различные химические компоненты, скрапа, окалины, мусора и других выбросов, которые загрязняют атмосферу, воду и поверхность земли.

Наиболее распространенные выбросы металлургических предприятий до очистки представлены в таблице.

Выбросы в атмосферу металлургических производств

Составляющие выбросов	Агломерационное производство, кг/т агломерата	Доменное производство, кг/т чугуна	Сталеплавильное производство, кг/т стали	Прокатное производство
1	2	3	4	5
Пыль	20–25	100–106	13–32	0,1–0,2 кг/т проката
Оксид углерода	20–50	600–605	0,4–0,6	0,7 т/м поверхности металла
Оксиды серы	3–25	0,2–0,3	0,4–35	0,4 т/м поверхности металла
Оксиды азота	–	–	0,3–3,0	0,5 т/м поверхности металла
Сероводород	–	10–60	–	–

Авторами [4] были рассмотрены основные способы утилизации и переработки пылегазовых смесей. Наиболее простым и перспективным процессом является брикетирование. Этот процесс не требует больших капитальных затрат и затрат на производство.

Проблемы улавливания CO_2 занимают важное место в снижении выбросов из различных газовых потоков. Улавливание CO_2 рассматривается как наиболее эффективный подход к смягчению последствий глобального потепления [5].

В специальном докладе 2005 г. Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК) было заключено, что наиболее перспективными процессами для отделения CO_2 от газов могут быть методы адсорбции с выбором подходящих адсорбентов [6]: активированные углеродные волокна (АКФ) [7], углеродные нанотрубки (УНТ) [8], активированный уголь [9], цеолит [10], адсорбенты диоксида кремния [11].

В работе [12] был подобран твердый сорбирующий CO_2 материал, отвечающий требуемым для сорбента характеристикам: высокая сорбционная емкость, быстрая кинетика и продолжительная стабильность при высоких температурах реакции и в циклических режимах работы.

Кроме того, перспективными могут являться сорбенты, полученные из природных источников, таких как известняк и доломит [13–18]. Также авторами [19] были исследованы многомасштабные композиты, образованные пересадкой N-легированных углеродных нанотрубок на поверхность активированных углеродных волокон на основе полиамида (ПАН).

Проблема улавливания CO_2 была исследована и другими авторами [20].

В исследовании удаления H_2S из горячего промышленного газа авторами [21] были предложены следующие сорбенты: смесь оксида железа и летучей золы; оксид железа и пемза; различные образцы красного шлама, которые были сформованы в пористые гранулы с другими оксидами металлов. После этого образцы насыщались серой и помещались в вентиляционный резервуар, где при температуре 600–700 °С десорбция до исходного состояния происходила путем пропускания воздушного потока через слой сорбента. В результате выделяется диоксид серы и вновь образуются химически активные оксиды ме-

таллов. При десорбции также образуется небольшое количество элементарной серы и серной кислоты. Поглощающая способность оценивалась при более высоких температурах, эффективность удаления H_2S достигала 95–99,9 %.

Авторами [22] была сконструирована пилотная установка для переработки сероорганических соединений. Было обнаружено, что установка с активированным АОК-78-57 катализатором на основе оксида алюминия обеспечивает полную переработку газа, содержащего 25–55 % SO_2 .

Авторами [23] было предложено использование адсорбента на основе отечественных железомарганцевых руд для утилизации отходящих газов металлургического производства.

Заключение

Анализ литературных источников позволил установить наиболее распространенные соединения металлургического производства, загрязняющие атмосферу.

Проведенные исследования показали, что на данную проблему активно обращают внимание отечественные и зарубежные ученые. Вопрос утилизации технологических газов остается актуальным и в настоящее время.

Литература

1. *Большина, Е.П. Экология металлургического производства / Е.П. Большина // Курс лекций. – Новотроицк: НФ НИТУ «МИСиС», 2012, с. 155*
2. *Habashi, F. Clean Technology in the Metallurgical Industry / F. Habashi // Chemistry for Sustainable Development. – 2004. – 12. – P. 93–98.*
3. *Перспективы развития строительного комплекса // Материалы IX Международной научно-практической конференции 2. Астрахань, 27–29 октября 2015 г. – Астрахань, 2015. – С. 362–366.*
4. *Валуев, Д.В. Технологии переработки металлургических отходов: учеб. пособие / Д.В. Валуев, Р.А. Гизатулин; Томский политехн. университет. – Томск: Изд-во ТПУ, 2013. – С. 191.*
5. *Development of a Fe/Mg-bearing metallurgical waste stabilized-CaO/NiO hybrid sorbent-catalyst for high purity H_2 production through sorption-enhanced glycerol steam reforming / M. Aissaoui, A. Ommolbanin, Z. Sahraei, et al. // International Journal of Hydrogen Energy. – 2019.*
6. *Special report on carbon dioxide cap-*

- ture and storage / B. Metz, O. Davidson, H.C. de Coninck et al. // Prepared by Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. – 2005. – P. 442.
7. Lee, S.Y. Determination of the optimal pore size for improved CO₂ adsorption in activated carbon fibers / S.Y. Lee, S.J. Park // *J. Colloid Interface Sci.* – 2013. – P. 230–235.
 8. Capture of CO₂ from flue gas via multiwalled carbon nanotubes / F. Su, C. Lu, W. Chen et al. // *Sci. Total Environ.* – 2009. – P. 407.
 9. Adsorption of CO₂ on molecular sieves and activated carbon / R.V. Siriwardane, M.S. Shen, E.P. Fisher, J.A. Poston // *Energy Fuels.* – 2001. – P. 279–284.
 10. Monoethanol amine modified zeolite 13 × for CO₂ adsorption at different temperatures / P.D. Jadhav, R.V. Chatti, R.B. Biniwale. et al. // *Energy Fuels.* – 2007. – P. 21.
 11. Improved immobilized carbon dioxide capture sorbents / M.L. Gray, Y. Soong, K.J. Champagne Jr. et al. // *Fuel Process. Technol.* – 2005. – P. 86.
 12. Iliuta, M.C. CO₂ Sorbents for Sorption-Enhanced Steam Reforming / Iliuta, M.C.; In A.A. Lemonidou // *Sorption Enhancement of Chemical Processes. ACHE (Advances in Chemical Engineering).* – 2017. – Vol. 51, Pp. 97–205.
 13. Yancheshmeh, M.S. High temperature CO₂ sorbents and their application for hydrogen production by sorption enhanced steam reforming process / M.S. Yancheshmeh, H.R. Radfarnia, M.C. Iliuta // *Chem Eng J.* – 2016. – Pp. 420–444.
 14. Kierzkowska, A.M. CaO-based CO₂ sorbents: from fundamentals to the development of new, highly effective materials / A.M. Kierzkowska, R. Pacciani, C.R. Müller // *Chem Sus Chem.* – 2013. – Pp. 1130–1148.
 15. Angeli, S.D. Development of a novel-synthesized Ca-based CO₂ sorbent for multicycle operation: parametric study of sorption / S.D. Angeli, C.S. Martavaltzi, A.A. Lemonidou // *Fuel.* – 2014. – Pp. 62–69.
 16. Recent advances in lithium containing ceramic based sorbents for high-temperature CO₂ capture / Y. Zhang, Y.S. Gao, H. Pfeiffer et al. // *J Mat Chem A.* – 2019. – P. 7.
 17. Synthetic CaO-based sorbent for high-temperature CO₂ capture in sorption-enhanced hydrogen production / P. Pecharaumporn, S. Wongsakulphasatch, T. Glinrun et al. // *Int J Hydrogen Energy.* – 2019. – P. 44.
 18. Solid sorbents for in-situ CO₂ removal during sorption-enhanced steam reforming process: a review / B. Dou, C. Wang, Y. Song et al. // *Renew Sustain Energy Rev.* – 2016. – Pp. 536–546.
 19. Enhanced CO₂ Adsorption on Activated Carbon Fibers Grafted with Nitrogen-Doped Carbon Nanotubes / Yu-Chun Chiang, Wei-Lien Hsu, Shih-Yu Li, Ruey-Shin Juang // *Materials.* – 10. – 2017. – P. 511.
 20. Kai Dong, Xueliang Wang CO₂ Utilization in the Ironmaking and Steelmaking Process // *Metals* 9(3), 2019, p. 273
 21. Lebedev, A.B. Sintered Sorbent Utilization for H₂S Removal from Industrial Flue Gas in the Process of Smelter Slag Granulation / A.B. Lebedev, V.A. Utkov, A. A. Khalifa // *Journal of Mining Institute.* – 2019. – Vol. 237. – P. 292–297.
 22. Platonov, O.I. High-efficiency process for production of sulfur from metallurgical sulfur dioxide gases / O.I. Platonov, L.S. Tsemekhman // *Russian Journal of Applied Chemistry.* – 2016. – Vol. 89. – Pp. 16–22.
 23. 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.

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. хим. наук, ассистент кафедры физической химии, Санкт-Петербургский горный университет, г. Санкт-Петербург; pomomareva_ma@spmi.pers.ru.

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

Поступила в редакцию 21 января 2020 г.

UTILIZATION OF TECHNOLOGICAL GASES BY PERSPECTIVE SORPTION MATERIALS

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

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

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

St. Petersburg Mining University, St. Petersburg, Russian Federation

Metallurgical production is one of the most important industries in terms of negative emissions. It is not uncommon for metallurgical enterprises to use ore with a very low content of useful components to extract strategically valuable metals. In this regard, a huge amount of ore materials is supplied for enrichment and smelting, and this, in turn, contributes to the formation of a large amount of exhaust gases. Thus, air pollution is the main cause of environmental problems arising from the activities of metallurgical enterprises. Emissions of process gases from production lead to colossal pollution of nature and the formation of a serious danger to the life of living organisms. In addition, the environmental problems of domestic metallurgy are not resolved due to a number of reasons. One of the main ones is the insufficient equipment of technological units with cleaning and neutralization systems and the inefficient operation of existing dust and gas treatment plants, as well as the use of other obsolete technologies for cleaning gas emissions.

Keywords: sorbent, metallurgy, gas purification, sorption.

References

1. Bolshina E.P. [Ecology of metallurgical production] *Lecture course*. – Novotroitsk: NF NUST “MISiS”, 2012, pp. 155.
2. Fathi Habashi [Clean Technology in the Metallurgical Industry] *Chemistry for Sustainable Development*, 12, 2004, pp. 93–98.
3. [Prospects for the development of the building complex] *Materials of the IX International Scientific and Practical Conference Astrakhan, October 27–29, 2015* Astrakhan 2015, pp. 363–366
4. Valuev D. V. Gizatulina R. A. [Technologies For Metallurgical Waste Processing: tutorial] Tomsk Polytechnic. University – Tomsk: TPU Publ. House, 2013, 191 p.
5. Aissaoui M., Ommolbanin A., Sahraei Z., Yancheshmeh M.S., Iliuta M.C. [Development of a Fe/Mg-bearing metallurgical waste stabilized-CaO/NiO hybrid sorbent-catalyst for high purity H₂ production through sorption-enhanced glycerol steam reforming] *International Journal of Hydrogen Energy*, 2019. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2019.08.216
6. Metz B., Davidson O., de Coninck H.C., Loos M., Meyer L.J. [Special report on carbon dioxide capture and storage] *Prepared by Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom; New York, USA, 2005, p. 442.
7. Lee S.Y., Park S.J. [Determination of the optimal pore size for improved CO₂ adsorption in activated carbon fibers] *J. Colloid Interface Sci.*, 2013, pp. 230–235. DOI: 10.1016/j.jcis.2012.09.018
8. Su F., Lu C., Chen W., Bai H., Hwang J.F. [Capture of CO₂ from flue gas via multiwalled carbon nanotubes] *Sci. Total Environ.*, 2009, pp. 407. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2009.01.007
9. Siriwardane R.V., Shen M.S., Fisher E.P., Poston J.A. [Adsorption of CO₂ on molecular sieves and activated carbon] *Energy Fuels*, 2001, pp. 279–284. DOI: 10.1021/ef000241s
10. Jadhav P.D., Chatti R.V., Biniwale R.B., Labhsetwar N.K., Devotta S., Rayalu S.S. [Monoethanol amine modified zeolite 13X for CO₂ adsorption at different temperatures] *Energy Fuels*, 2007, 21 p. DOI: 10.1021/ef070038y
11. Gray M.L., Soong Y., Champagne K.J., Pennline H., Baltrus J.P., Stevens R.W. Jr. [Improved immobilized carbon dioxide capture sorbents] *Fuel Process. Technol.*, 2005, 86 p. DOI: 10.1016/j.fuproc.2005.01.005

12. M.C. Iliuta [CO₂ Sorbents for Sorption-Enhanced Steam Reforming] In Angeliki A. Lemonidou, editor: *Sorption Enhancement of Chemical Processes*, Vol 51, ACHE (Advances in Chemical Engineering), UK: Academic Press Publ., Elsevier, 2017, pp. 97–205. DOI: 10.1016/bs.ache.2017.08.001
13. M.S. Yancheshmeh, H.R. Radfarnia, M.C. Iliuta [High temperature CO₂ sorbents and their application for hydrogen production by sorption enhanced steam reforming process] *Chem Eng J*, 2016, pp. 420–444. DOI: 10.1016/j.cej.2015.06.060
14. A.M. Kierzkowska, R. Pacciani, C.R. Müller [CaO-based CO₂ sorbents: from fundamentals to the development of new, highly effective materials] *Chem Sus Chem*, 2013, pp. 1130–1148. DOI: 10.1002/cssc.201300178
15. S.D. Angeli, C.S. Martavaltzi, A.A. Lemonidou [Development of a novel-synthesized Ca-based CO₂ sorbent for multicycle operation: parametric study of sorption] *Fuel*, 2014, pp. 62–69. DOI: 10.1016/j.fuel.2013.10.046
16. Y. Zhang, Y.S. Gao, H. Pfeiffer, B. Louis, L.Y. Sun, D. O'Hare, Q. Wang [Recent advances in lithium containing ceramic based sorbents for high-temperature CO₂ capture] *J Mat Chem A*, 2019, 7 p. DOI: 10.1039/C8TA08932A
17. P. Pecharaumporn, S. Wongsakulphasatch, T. Glinrun, A. Maneedaeng, Z. Hassan, S. Assabumrungrat [Synthetic CaO-based sorbent for high-temperature CO₂ capture in sorption-enhanced hydrogen production] *Int J Hydrogen Energy*, 2019, p. 44 DOI: 10.1016/j.ijhydene.2018.06.153
18. Dou B., Wang C., Song Y., Chen H., Jiang B., Yang M., Xu Y. [Solid sorbents for in-situ CO₂ removal during sorption-enhanced steam reforming process: a review] *Renew Sustain Energy Rev*, 2016, pp. 536–546. DOI: 10.1016/j.rser.2015.08.068
19. Chiang Y.-C., Hsu W.-L., Li S.-Y., Juang R.-S. [Enhanced CO₂ Adsorption on Activated Carbon Fibers Grafted with Nitrogen-Doped Carbon Nanotubes] *Materials*, 10, 2017, 511 p. DOI: 10.3390/ma10050511
20. Dong K., Wang X. [CO₂ Utilization in the Ironmaking and Steelmaking Process] *Metals*, 9(3), 2019, 273 p. DOI: 10.3390/met9030273
21. Lebedev A.B., Utkov V.A., Khalifa A.A. [Sintered Sorbent Utilization for H₂S Removal from Industrial Flue Gas in the Process of Smelter Slag Granulation] *Journal of Mining Institute*, 2019, vol. 237, pp. 292–297. DOI: 10.31897/PMI.2019.3.292
22. Platonov O.I., Tsemekhman L.S. [High-efficiency process for production of sulfur from metallurgical sulfur dioxide gases] *Russian Journal of Applied Chemistry*, 2016, vol. 89, pp. 16–22. DOI: 10.1134/S107042721601002X
23. 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

Received 21 January 2020

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Черемисина, О.В. Утилизация технологических газов перспективными сорбционными материалами / О.В. Черемисина, М.А. Пономарёва, В.А. Болотов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». – 2020. – Т. 20, № 2. – С. 93–100. DOI: 10.14529/met200209

FOR CITATION

Cheremisina O.V., Ponomareva M.A., Bolotov V.A. Utilization of Technological Gases by Perspective Sorption Materials. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Metallurgy*, 2020, vol. 20, no. 2, pp. 93–100. (in Russ.) DOI: 10.14529/met200209
