

DOI: 10.12731/2227-930X-2022-12-2-110-119

УДК 66.074

## **РАЗРАБОТКА СХЕМЫ ЦЕПИ АППАРАТОВ ДЛЯ ОЧИСТКИ ГАЗОВЫХ ВЫБРОСОВ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРЕДПРИЯТИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АППАРАТА С ВИБРОКИПАЩИМ СЛОЕМ ЖЕЛЕЗОМАРГАНЦЕВЫХ КОНКРЕЦИЙ**

***Г.И. Свердлик, А.С. Выскребенец, А.А. Рево***

*При анализе компонентов газовых выбросов металлургических предприятий общепринято считать, что наиболее вредным для окружающей экосистемы является диоксид серы, улавливание которого является актуальной проблемой. Целью разработки является проектирование схемы цепи аппаратов для снижения выбросов токсичных газов металлургических предприятий с использованием новых технологических решений на примере очистки обжиговых газов от диоксида серы в производстве молибдена. Схема включает разработанный адсорбер с виброкипящим слоем адсорбента, в качестве которого рекомендуются железомарганцевые конкреции (ЖМК), которые обладают преимуществами перед другими адсорбентами, включая активированный уголь. При наличии в схеме аппарата для переработки отработанного адсорбента возможно получение элементарной серы, а далее ЖМК следует рассматривать как марганцевые концентраты и сырье для комплексного извлечения сопутствующих элементов: меди, никеля, кобальта. Линия может быть использована на металлургических предприятиях с обжигом сульфидных руд, а также в других производствах, осуществляющих выбросы газов с диоксидом серы.*

***Ключевые слова:** газовые выбросы; очистка от диоксида серы; адсорбционный метод; адсорбер; виброкипящий слой; адсорбент; железомарганцевые конкреции*

## **DEVELOPMENT OF A SCHEME FOR A CHAIN OF DEVICES FOR GAS EMISSIONS CLEANING FROM METALLURGICAL PLANTS USING AN APPARATUS WITH A VIBROBOILING BED OF FERROMANGANESE NODULES**

***G.I. Sverdlik, A.S. Viskrebenets, A.A. Revo***

*In the analysis of the components of gas emissions from metallurgical industries, it is generally accepted that sulphur dioxide is the most harmful to the surrounding ecosystem, and its capture is a pressing problem. The aim of the development is to design a circuit diagram of devices chain for reducing the emissions of toxic gases from metallurgical plants using new technological solutions on the example of purification of roasting gases from sulphur dioxide in the production of molybdenum. The scheme includes an adsorber developed with a vibrating adsorbent layer, which is recommended for ferromanganese nodules (FMN), which have advantages over other adsorbents, including activated carbon. In the case of a spent adsorbent treatment system, elemental sulfur can be produced in the circuit, and FMN should then be considered as manganese concentrates and feedstock for the complex recovery of the associated elements: copper, nickel, cobalt. The line can be used in smelters firing sulphide ores, as in other industries emitting gases with sulphur dioxide as well.*

**Keywords:** *gas emissions; sulfur dioxide cleaning; adsorption method; adsorber; vibroboiling bed; adsorbent; ferromanganese nodules*

### **Введение**

Защита окружающей экосистемы от источников загрязнений является актуальной задачей. Такими источниками в своем большинстве являются металлургические предприятия, на долю которых приходится более 50% общих газовых выбросов в атмосферу.

В Северо-Кавказском горно-металлургическом институте (государственном технологическом университете) проводятся ис-

следовательские работы по улавливанию вредных компонентов газовых выбросов металлургических заводов.

Одной из практически нерешенных проблем очистки газов металлургических предприятий является очистка газов от диоксида серы, образующегося при горении серосодержащего сырья и топлива. При обжиге концентратов цветных металлов (меди, цинка, молибдена и других) часть обжиговых газов с низким содержанием диоксида серы (менее 3%), не пригодном для производства серной кислоты, в настоящее время выбрасывается в атмосферу. Диоксид серы является главным фактором образования кислотных дождей, приводящих к катастрофическим последствиям для окружающей среды и нарушениям в состоянии здоровья населения.

### **Цель работы**

Целью является разработка схемы цепи аппаратов для снижения выбросов токсичных газов металлургических предприятий с использованием новых технологических и конструктивных решений на примере очистки обжиговых газов от диоксида серы в производстве молибдена.

### **Материалы и методы исследования**

Сравнительный анализ методов очистки газов: термического дожигания, адсорбции, абсорбции, биохимического и других показал, что одним из перспективных способов является адсорбционный (особенно при небольшом объеме газовых выбросов, как, например, в молибденовом производстве). К преимуществам процесса адсорбции относятся высокая избирательность и обратимость, что представляет возможность поглощения из газовой смеси одного или нескольких компонентов и далее выделение их из поглотителей и регенерацию адсорбентов.

В промышленности при газоочистке чаще применяются активированные угли. Однако в начале XXI века появилось новое поколение адсорбентов – железомарганцевые конкреции (ЖМК). ЖМК – минеральные образования, образующиеся на дне морей и океанов. В настоящее время разрабатываются способы и обо-

рудование для промышленной добычи ЖМК [1]. Исследования [2] свидетельствуют о перспективности использования ЖМК для очистки газов от сернистых соединений. ЖМК обладают преимуществами перед активированным углем: значительной адсорбционной емкостью из-за развитой поверхностной структуры и высокой поверхностной активности и возможным направлением на переработку отработанного адсорбента на получение элементарной серы и марганцевого концентрата [3].

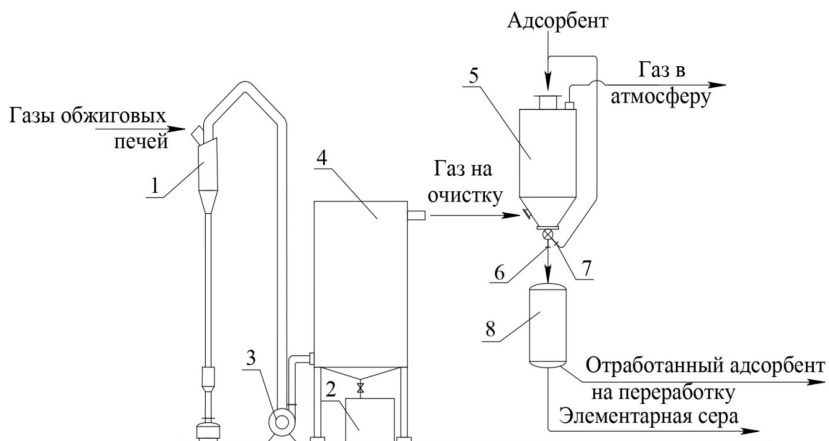
Слой адсорбента в газоочистителе может быть в различных состояниях: неподвижном, перемешиваемом механическими устройствами кипящим, создаваемым определенным давлением газа. В кипящем слое интенсифицируются массообменные процессы, так как площадь контакта газа с частицами адсорбента увеличивается в десятки раз по сравнению с неподвижным слоем.

В Северо-Кавказском горно-металлургическом институте (государственном технологическом университете) разработан и запатентован способ очистки газов в виброкипящем слое адсорбента [4]. Виброкипящий слой создается в зонах между полками аппарата вертикальными колебаниями полок, сообщаемыми им от вибратора, установленного на корпусе аппарата, сконструированного на основании результатов теоретических и экспериментальных исследований [5-7, 11-15]. Полки аппарата снабжены механизмом регулирования угла наклона для создания условий для пересыпания адсорбента с полки на полку.

На базе предложенного способа очистки газов с применением нового поколения адсорбентов на основе ЖМК и новых разработок по получению элементарной серы из газов с содержанием диоксида серы [8], разработана схема цепи аппаратов для очистки обжиговых газов на примере молибденового производства (рисунок 1).

Газы, выходящие из печи обжига концентратов, очищаются от пыли в циклоне 1 и электрофилт্রে 4. Температура газов на выходе из фильтров  $\sim 200^{\circ}\text{C}$ . Пыль из сборников 2 под электрофилтром и циклоном, как правило, содержащую рений, следует направлять на его извлечение.

Из фильтров газы попадают в адсорбер 5, в котором находятся ЖМК в состоянии виброкипения. С помощью заслонки 7 создается циркуляция адсорбентов на время их защитного действия, которая по ориентировочным расчетам и данным исследований [9] составляет 5-6 суток. Далее заслонки 6 и 7 переключаются, и отработанные ЖМК из адсорбера поступают в колонну 8, которая работает периодически. В ней осуществляется термическая обработка отработанных ЖМК. При температуре порядка  $300^{\circ}\text{C}$  диоксид серы разрушается, и сера испаряется. Конденсация паров элементарной серы реализуется в другой части колонны при температуре, близкой к  $160^{\circ}\text{C}$  [10], и жидкая сера сливается в приемник.



**Рис. 1.** Схема цепи аппаратов очистки обжиговых газов и извлечения серы в производстве молибдена

1 – циклон, 2 – сборник пыли, 3 – дымосос, 4 – электрофильтр, 5 – адсорбер, 6 и 7 – заслонки, 8 – колонна для извлечения серы из отработанного адсорбента

В процессе разгрузки из адсорбера отработанных адсорбентов в колонну 8, чтобы не прекращалась очистка газов, в адсорбер одновременно подается порция свежих ЖМК.

При окончании извлечения серы колонна разгружается, и отработанные ЖМК направляются на производство марганцевого концентрата (в ЖМК содержание марганца до 30%).

### **Результаты исследования**

Предложенная цепь аппаратов позволяет купировать выбросы диоксида серы в окружающую атмосферу и для рассматриваемого процесса реализовать принцип безотходного производства.

Отработанные адсорбенты могут служить сырьем для доизвлечения цветных металлов – никеля до 1,5%, меди до 1,5%, кобальта до 0,5%.

### **Заключение**

Разработанная схема цепи аппаратов может быть кроме металлургии рекомендована для применения в теплоэнергетике, нефтегазовом комплексе и других производствах, осуществляющих выбросы газов с диоксидом серы.

### *Список литературы*

1. Кириченко Ю.В., Каширский А.С. Кассетный трал для промышленной добычи железомарганцевых конкреций океанического дна // Горный журнал, 2015. №12. С. 56-61.
2. Катков А.Л., Маслов Е.И., Коптенармусов В.Б. и др. Новое поколение адсорбентов на основе железомарганцевых конкреций (ЖМК) для очистки газов от сернистых соединений. URL: <https://waste.ua/cooperation/2007/theses/katkov.html>.
3. Изотова Н.С., Леонов А.А., Смирнов А.А., Дарьин А.А. Очистка отходящих газов металлургического производства от серосодержащих компонентов // СПб. Записки Горного института, №192, 2011. С.85-87.
4. Свердлик Г.И., Выскребенец А.С., Фомин А.Н. Способ очистки газов. Патент РФ №213222. БИ №18, 1999.
5. Свердлик Г.И., Выскребенец А.С., Рево А.А. Разработка аппарата для повышения эффективности систем газоочистки металлургических предприятий // Цветная металлургия, 2003, №3. С.27-28.
6. Свердлик Г.И., Рево А.А., Каменецкий Е.С. Структура виброожиженного слоя сыпучего материала // Известия вузов Северо-Кавказский регион, Технические науки, 2010, №3. С. 105-106.
7. Рево А.А., Свердлик Г.И. Проектирование металлургических процессов и оборудования с применением метода системного анализа

- // Материалы Международной научно-практической конференции «Актуальные научные исследования в современном мире (Recent Research in the Modern World)» (София, Болгария) – Нефтекамск, Научно-издательский центр «Мир науки», 2018. С. 69-74.
8. Способ получения элементарной серы из отходящих газов, содержащих диоксид серы. URL: [www.findpatent.ru/patent/222/2221728.html](http://www.findpatent.ru/patent/222/2221728.html)
  9. Мазгаров А.М., Корнетова О.М. Технологии очистки попутного нефтяного газа от сероводорода. Казань, Казанский университет, 2015, 70 с.
  10. Способ извлечения серы из газа. URL: [www.findpatent.ru/patent/223/2232128.html](http://www.findpatent.ru/patent/223/2232128.html)
  11. Tatemoto Y., Mawatari Y., Yasukawa T., Noda K. Numerical simulation of particle motion in vibrated fluidized bed // Chem. Eng. Science, 2004, V.59, pp. 437-447.
  12. Martin T.W., Huntley J.M., Wildman R.D. Hydrodynamic model for a vibrofluidized granular bed // J. Fluid Mech., 2005, V. 535, pp. 325-345.
  13. Halvorsen B. An experimental and computational study of flow behavior in bubbling fluidized beds // Porsgrunn, april, 2005, URL: [http://teora.hit.no/dspace/bitstream/2282/301/1/Thesis\\_15\\_07ny.2005.pdf](http://teora.hit.no/dspace/bitstream/2282/301/1/Thesis_15_07ny.2005.pdf).
  14. Daleffe R.V., Ferreira M.C., Freire J.T. Analysis of the effect of particle size distribution on the fluid dynamics behavior and segregation patterns of fluidized, vibrated and vibrofluidized beds // Asia-Pac. J. Chem. Eng., 2007, V.2, pp. 3-11.
  15. Min J., Drake J.B., Heindel Th.J., Fox R.O. Experimental validation of CFD simulation of a Lab-Scale fluidized bed reactor with and without side-gas injection // AIChE Journal, 2010, V.56, No.6, pp. 1434-1446.

### *References*

1. Kirichenko Y.V., Kashirsky A.S. Kassetniy tral dlya promyshlennoy dobychi zhelezomargancevykh konkreciy okeanicheskogo dna [Cassete trawl for industrial mining of ferromanganese nodules of ocean floor]. *Gorniy zhurnal* [Mountain magazine], 2015, no.12, pp. 56-61.
2. Katkov A.L., Maslov E.I., Kaptenarmusov V.B. Novoe pokolenie adsorbentov na osnove zhelezomargancevykh konkreciy (ZHMK) dlya ochist-

- ki gazhov ot sernisnykh soedineniy [New generation of adsorbents based on ferromanganese nodules (FMN) for cleaning gases from sulfur compounds]. URL: <https://waste.ua/cooperation/2007/theses/katkov.html>
3. Izotova N.S., Leonov A.A., Smirnov A.A., Darin A.A. Ochistka otkhodyashchikh gazov metallurgicheskogo proizvodstva ot serosoderzhashchikh komponentov [Exhaust gas cleaning of metallurgical production from sulfur-containing components]. SPb. *Zapiski Gornogo instituta* [Notes of the Mining Institute], 2011, no. 192, pp. 85-87.
  4. Sverdlik G.I., Viskrebenets A.S., Fomin A.N. *Sposob ochistki gazov* [Gas purification method]. Patent RF no 213222. BI [Bulletin of inventions], 1999, no 18.
  5. Sverdlik G.I., Viskrebenets A.S., Revo A.A. Razrabotka apparata dlya povysheniya effektivnosti system gazoochistki metallurgicheskikh predpriyatiy [Development of an apparatus for increasing the efficiency of the gas cleaning system of metallurgical enterprises]. *Tsvetnaya metallurgiya* [Non-ferrous metallurgy], 2003, no. 3, pp. 27-28.
  6. Sverdlik G.I., Revo A.A., Kamenetskiy E.S. Struktura vibroozhizhenogo sloya sypuchego materiala [Structure of the vibrofluidized bed of bulk material]. *Izvestiya vuzov Severo-Kavkazskiy region. Technicheskie nauki* [Proceedings of universities North Caucasus region. Technical science], 2010, no. 3, pp. 105-106.
  7. Revo A.A., Sverdlik G.I. Proektirovanie metallurgicheskikh prozessov i oborudovaniya s primeneniem metoda sistemnogo analiza [Design of metallurgical processes and equipment using the method of system analysis]. *Materialy Mezhdunapodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Aktualnye nauchnye issledovaniya v sovremennom mire»* [Materials of the International scientific and practical conference «Actual scientific research in the modern world»]. Sofiya – Neftekamsk, Mir nauki Publ., 2018, pp. 69-74.
  8. Method for obtaining elemental sulfur from exhaust gases containing sulfur dioxide. URL: [www.findpatent.ru/patent/222/2221728.html](http://www.findpatent.ru/patent/222/2221728.html)
  9. Mazgarov A.M., Kornetova O.M. *Tekhnologii ochistki poputnogo nefryanogo gaza ot serovodoroda* [Technologies for purification of associated petroleum gas from hydrogen sulfide]. Kazan, Kazanskiy universitet Publ., 2015, 70 p.



10. Method for extracting sulfur from gas. URL: [www.findpatent.ru/patent/223/2232128.html](http://www.findpatent.ru/patent/223/2232128.html)
11. Tatemoto Y., Mawatari Y., Yasukawa T., Noda K. Numerical simulation of particle motion in vibrated fluidized bed. *Chem. Eng. Science*, 2004, vol. 59, pp. 437-447.
12. Martin T.W., Huntley J.M., Wildman R.D. Hydrodynamic model for a vibrofluidized granular bed. *J. Fluid Mech.*, 2005, vol. 535, pp. 325-345.
13. Halvorsen B. An experimental and computational study of flow behavior in bubbling fluidized beds. Porsgrunn, april, 2005, URL: [http://teora.hit.no/dspace/bitstream/2282/301/1/Thesis\\_15\\_07ny.2005.pdf](http://teora.hit.no/dspace/bitstream/2282/301/1/Thesis_15_07ny.2005.pdf).
14. Daleffe R.V., Ferreira M.C., Freire J.T. Analysis of the effect of particle size distribution on the fluid dynamics behavior and segregation patterns of fluidized, vibrated and vibrofluidized beds. *Asia-Pac. J. Chem. Eng.*, 2007, vol. 2, pp. 3-11.
15. Min J., Drake J.B., Heindel Th.J., Fox R.O. Experimental validation of CFD simulation of a Lab-Scale fluidized bed reactor with and without side-gas injection. *AIChE Journal*, 2010, vol. 56, no. 6, pp. 1434-1446.

### **ДААННЫЕ ОБ АВТОРАХ**

**Свердлик Григорий Иосифович**, профессор кафедры «Технологические машины и оборудование», доктор технических наук  
*Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет)*  
*ул. Николаева, 44, г. Владикавказ, 362021, Российская Федерация*  
*grigory.sverdlik@gmail.com*

**Выскребенец Александр Степанович**, заведующий кафедрой «Технологические машины и оборудование», доктор технических наук, профессор  
*Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет)*  
*ул. Николаева, 44, г. Владикавказ, 362021, Российская Федерация*  
*sasha.viskrebenets51@yandex.ru*

**Рево Алексей Альбертович**, доцент кафедры «Теоретическая и прикладная механика», кандидат технических наук  
*Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет)*  
ул. Николаева, 44, г. Владикавказ, 362021, Российская Федерация  
*cavcundar@mail.ru*

#### **DATA ABOUT THE AUTHORS**

**Grigoriy I. Sverdlik**, Professor of the department «Technological machines and equipment», Doctor of Technical Sciences, Professor  
*North Caucasus Mining and Metallurgical Institute (State Technological University)*  
44, Nikolaev Str., Vladikavkaz, 362021, Russian Federation  
*grigory.sverdlik@gmail.com*

**Alexander S. Viskrebenets**, Head of the department «Technological machines and equipment», Doctor of Technical Sciences, Professor  
*North Caucasus Mining and Metallurgical Institute (State Technological University)*  
44, Nikolaev Str., Vladikavkaz, 362021, Russian Federation  
*sasha.viskrebenets51@yandex.ru*

**Alexey A. Revo**, Associate professor of the department «Theoretical and applied mechanics», Candidate of technical sciences  
*North Caucasus Mining and Metallurgical Institute (State Technological University)*  
44, Nikolaev Str., Vladikavkaz, 362021, Russian Federation  
*cavcundar@mail.ru*

Поступила 05.04.2022  
После рецензирования 08.04.2022  
Принята 12.04.2022

Received 05.04.2022  
Revised 08.04.2022  
Accepted 12.04.2022