

## ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ РАСПЛАВЛЕННОГО ШЛАКА С ТВЕРДОЙ ФАЗОЙ КРАСНОГО ШЛАМА

**А.Б. Лебедев, В.А. Утков**

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

Актуальнейшей современной задачей цветной металлургии является замена экологически опасного складирования красного шлака (КШ), отхода производства глинозема из бокситов, его полной переработкой. Необходим поиск соответствующих промышленных технологий. Одной из них, как показала данная работа, является использование КШ при грануляции расплавленных шлаков. Граншлак устойчиво используется в больших количествах при производстве цементов, в дорожном строительстве, сельском хозяйстве и в других областях техники и технологий. Особенностью процесса получения граншлака является активное взаимодействие расплавленного металлургического шлака с охлаждающей жидкостью. Одновременно и мгновенно происходят затвердевание шлака и разрыв массы последнего в атмосфере острого пара на мелкие частицы из-за возникающих критических напряжений. Проблема состоит в том, что при грануляции шлаков, как правило, содержащих серу, в атмосферу выделяется большое количество вредных веществ: оксидов серы и в основном сероводорода. Его концентрация на рабочих площадках участков грануляции многократно превышает ПДК. Для борьбы с этим явлением в состав охлаждающей жидкости чаще всего вводят обладающие сорбционными свойствами тонкодисперсные известь или известняк, что связано с большими затратами. В данной работе изучались аналогичные свойства тонкодисперсного красного шлака. Проведены лабораторные и промышленные испытания. Обнаружено, что с его помощью концентрация сернистых газов на рабочих площадках грануляции может быть уменьшена на 2 порядка. Важно, что новый граншлак, названный в данном случае «шламошлаком», не уступает обычному по основным технологическим свойствам.

*Ключевые слова: переработка, улучшение экологии, граншлак, шламошлак, сокращение выбросов в атмосферу сернистых и парниковых газов.*

### **Введение**

Актуальнейшей современной задачей цветной металлургии является замена экологически опасного [1] складирования красного шлама (КШ), отхода производства глинозема из бокситов, его полной переработкой [2]. Производится поиск соответствующих промышленных вариантов [3–14]. Одним из них, как показала данная работа, является использование КШ при грануляции расплавленных шлаков с целью улучшения экологии производства. При грануляции этих шлаков происходит выделение в атмосферу сернистых газов [15–16], создающих невыносимые условия труда на участках грануляции.

Предотвращение этого явления также является весьма актуальной экологически важной задачей. Граншлак устойчиво используется в больших количествах при производстве цементов, в дорожном строительстве, сельском хозяйстве и в других областях техники и технологий [17–21]. При активном взаимодействии расплавленного металлургического

шлака с охлаждающей жидкостью одновременно и мгновенно происходят затвердевание шлака и разрыв массы последнего в атмосфере острого пара на мелкие частицы из-за возникающих критических напряжений.

В атмосферу выделяются летучие оксиды серы и сероводород. Для борьбы с этим явлением в состав охлаждающей жидкости вводят тонкодисперсные известь или известняк, что связано с большими затратами. В данной работе доказана способность красных шламов заменять указанные материалы. Проведены лабораторные и промышленные испытания, которые показали, что концентрация сернистых газов на рабочих площадках грануляции может быть уменьшена на 2 порядка. Полученный шлак («шламошлак») не уступает обычному граншлаку по основным технологическим свойствам.

### **Материалы и методы**

Цель настоящих исследований – показать сорбционные свойства материала красного

шлама на примере одиннадцати образцов, выявить оптимальную сорбционную емкость в зависимости от состава компонентов материала для улавливания серосодержащего газа, определить режимы, при которых процесс сорбции протекает с наибольшим показателем [5].

Для исследования сорбционных свойств выбрано одиннадцать образцов материала красного шлама, полученного в процессе различных технологий, на разных глиноземных предприятиях. Химический состав по основным компонентам весьма разнообразен, что дает возможность исследовать наиболее широко весь спектр этого материала [6]. Это даст возможность определить наиболее универсальный состав, с последующей доработкой технологии глиноземного производства, что позволит массово использовать складированный отработанный материал в полезных для производства целях.

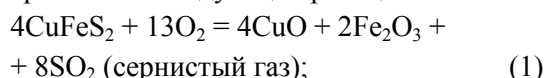
Для сравнения и определения наиболее оптимального состава сорбента предложены образцы шламов, представленные на рис. 5, байеровского (образцы 1–4, 7), спекательного (образцы 5, 8, 11) и Байер-спекательного производства (6, 9, 10). Название образцов определяется по месту отгрузки и подразделя-

ются: 1 – НГЗ; 2 – ГГК; 3 – 3АалК; 4–6 – УАЗ; 7–9 – БАЗ; 10 – ПАЗ; 11 – БГЗ.

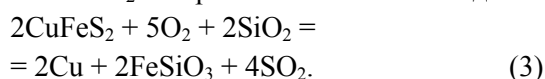
Для определения сорбционной способности красного шлама собрана установка (рис. 1). Конструкция установки состоит из следующих частей:

1. Печь для повышения температуры до 1000 °С с последующей выдержкой в течение 30 мин.

2. Навеска, содержащая медный колчедан для протекания следующих реакций:



Также возможно протекание реакции с участием  $\text{SiO}_2$  и образованием чистой меди:



При дальнейшем взаимодействии с кислородом воздуха протекает реакция (2). Полученный газ (сернистый ангидрид) посредством системы трубопроводов, имеющей соединительные муфты и запирающие вентили, поступает на следующую стадию очистки.

3. Емкость в качестве накопителя, имеющего мерную шкалу для точного определения объема газовой составляющей, при изменении

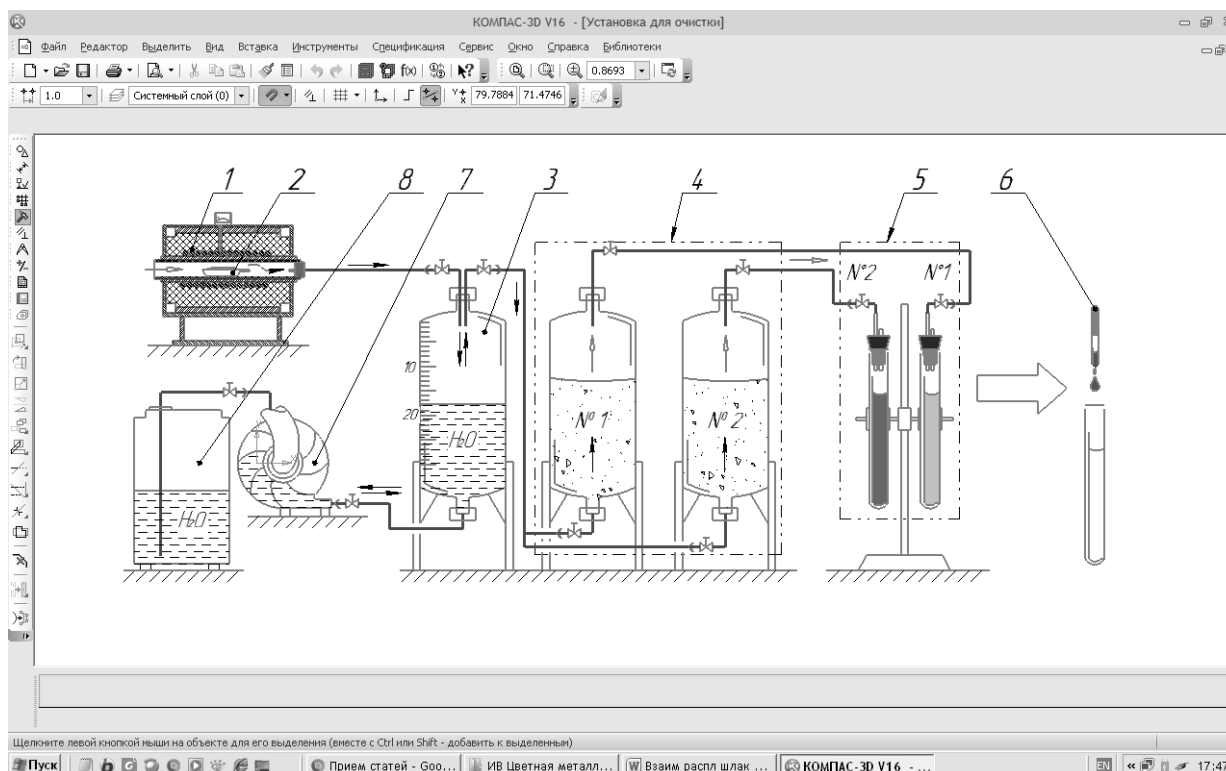


Рис. 1. Установка для анализа степени очистки серосодержащих газов: 1 – печь; 2 – навеска пробы; 3 – накопитель; 4 – фильтр; 5 – проба после очистки; 6 – анализ; 7 – насос; 8 – емкость с водой

уровня воды накапливает или наоборот избавляется от исследуемой порции вещества.

Серный ангидрид поступает в проходной сосуд в одностороннем порядке, где происходит накапливание загрязненного воздуха с фиксированной концентрацией серосодержащих соединений.

4. Две емкости для забора газовой составляющей. Функциональное разделение на максимально возможную очистку, которая выполняется в емкости с наилучшим сорбентом, содержащим один из образцов (красный шлак), и очистку, которая выполняется в соседней емкости, для последующего сравнения с другими образцами.

5. Отбор в специальные емкости и последующее сравнение степени очистки проб.

6. Инструмент для дозирования раствора (стандарт-титр йода  $C(1/2 I_2) = 0,1$  моль/дм<sup>3</sup>) в исследуемый объем газа с последующим определением степени насыщенности серой.

7. Насос создает парциальное разрежение в накопителе при откачивании воды из емкости, что способствует понижению уровня жидкости в проходном сосуде. При повышении уровня воды исследуемый газ парциальным давлением вытесняется на следующую стадию технологии очистки.

8. Остатки откаченной жидкости поступают в резервный сосуд и остаются там до востребования.

При взаимодействии серного ангидрида с красным шламом протекают следующие реакции с образованием сульфатных соединений [7]:

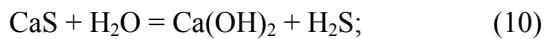
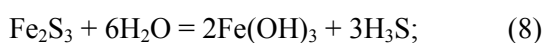


Проведенные предварительные испытания дали основание полагать, что при прохождении

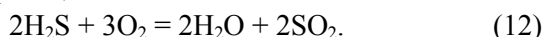
загрязненных газов через объем, наполненный материалом красного шлама, значительная часть серосодержащих соединений остается адсорбированной. Результаты анализа сравнения фильтрованной и нефилтрованной проб показали разницу до 91–95 %, что является неоспоримым основанием применять исследуемый материал в качестве сорбента.

## Результаты и обсуждение

В процессе грануляции происходит выделение газов при взаимодействии с водой сульфидов металлов, что становится следствием образования пор в расплавленном шлаке. Протекают следующие химические реакции:



и на втором этапе образуется сернистый газ по реакции



Как видно из реакции, вода помимо участия в реакции газообразования исполняет роль охлаждающего агента, повышает вязкость шлака и его способность удерживать газы. Поэтому для правильной организации процесса необходим хороший контакт воды со шлаком [2]. Однако при таком быстром охлаждении происходит процесс сжатия, который вызывает внутренние напряжения, результатом чего при достижении критического значения происходит взрывание частиц гранулы и серосодержащие газы удаляются из объема материала (рис. 2).

Для решения проблемы улавливания сернистых соединений предложено в технологический цикл грануляции шлака добавлять предварительно подготовленный красный шлам. В бассейн с водой, который содержит

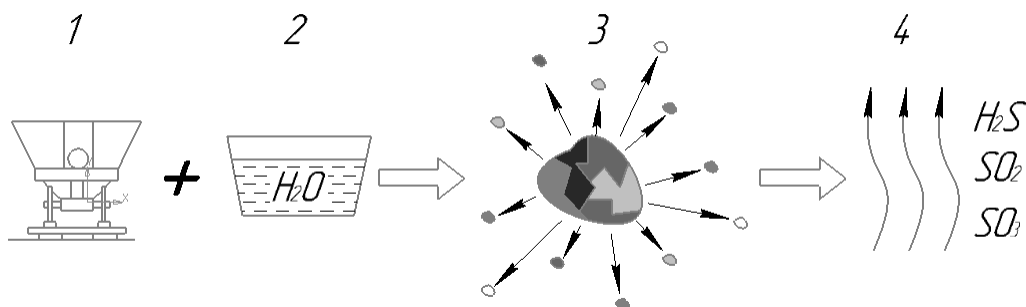


Рис. 2. Образование газообразных серосодержащих выделений в ходе процесса грануляции шлака: 1 – шлак; 2 – бассейн с водой; 3 – грануляция; 4 – выделение серосодержащих соединений

специальные добавки, сливается расплавленный шлак. В результате этого процесса наблюдается улавливание значительной части сероводорода и сернистых газов [8].

Структура граншлака (рис. 3) после предварительной обработки имеет пористость, которая способствует улавливанию газов. Причина улавливания серосодержащих соединений объясняется процессом адсорбции. Адсорбат шлака в основном скапливается в порах, размер которых соизмерим размеру сорбируемого вещества. Выделившиеся газы в момент соприкосновения шлака с водой несут в себе положительно заряженные частицы, при взаимодействии с материалом красным шламом происходит притягивание и осаждение на поверхности пористой структуры серосодержащих веществ. Таким образом, насыщение сорбента происходит посредством межпористого пространства, от которого зависит общая сорбционная емкость материала [9].

Отрицательно заряженные частицы сорбата также осаждаются на поверхности, примыкая к ранее притянутым частицам, и образуют диффузионный слой. Следствием взаимодействия этих материалов является практи-

чески полное исключение серосодержащих выбросов в атмосферу рабочего пространства. Химический состав исследуемого шлака представлен в таблице.

Материал шламошлак, содержащий в своем объеме в связанном состоянии сероводород и сернистые газы, впоследствии возможно использовать в бетонной промышленности в качестве наполнителей.

В ходе проведенных испытаний было показано, что КШ обладает наилучшими сорбционными свойствами по сравнению с известью  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , которая используется в качестве добавок в данной технологии (рис. 4). При производстве обожженной извести образуется большое количество парниковых газов, выбросы которых в атмосферу снижают экологические показатели, что влечет за собой дополнительные выплаты [10–12].

На рис. 5 видно, что теоретической наибольшей поглотительной способностью по сернистому газу обладает оксид железа, которыйкратно повышает показатели поглощения серосодержащих веществ. Результаты теоретической емкости красных шламов показаны на рис. 6.

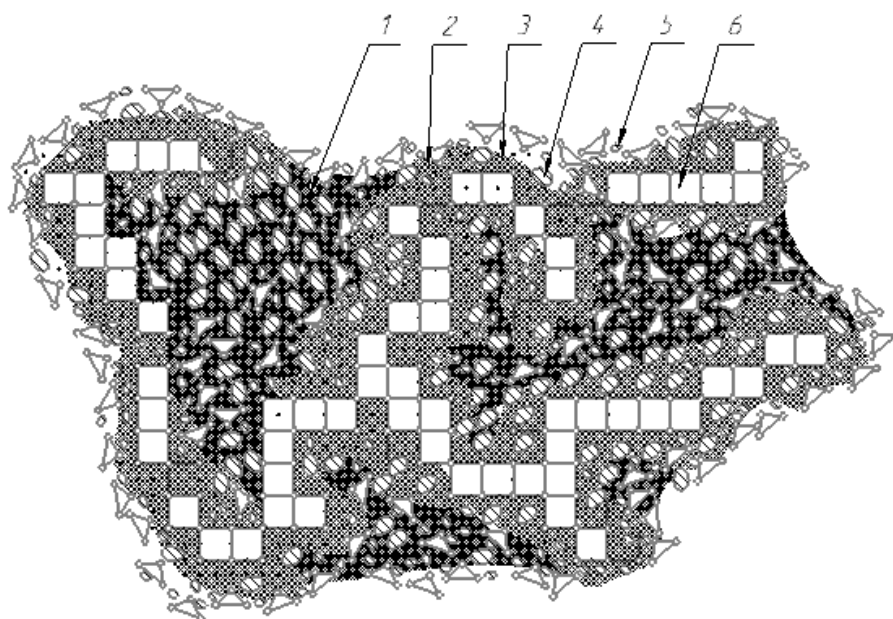


Рис. 3. Схема структуры частиц граншлака: 1 – пористость; 2 – адсорбционный слой; 3 – диффузионный слой; 4 – положительно заряженные частицы в диффузионном слое; 5 – отрицательно заряженные частицы в диффузионном слое; 6 – кристаллическая решетка, состоящая из  $\text{CaO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$  и др.

Химический состав доменного шлака, %

$\text{SiO}_2$	S	MgO	$\text{Al}_2\text{O}_3$	MnO	CaO	FeO	$\text{K}_2\text{O}$	$\text{Na}_2\text{O}$
39,38	1,42	4,80	6,10	0,28	47,68	1,02	0,50	0,60

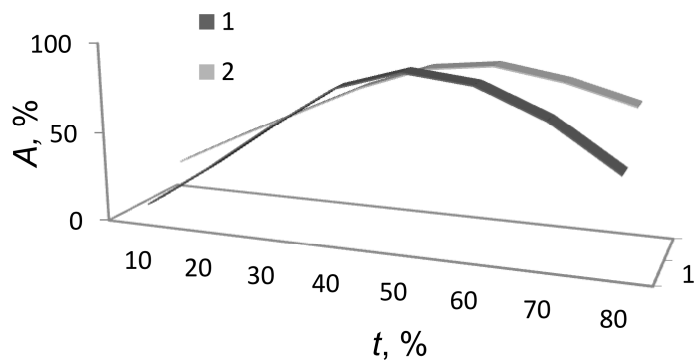


Рис. 4. Сравнительная относительная адсорбционная способность КШ по SO<sub>2</sub> от времени (t): 1 – известковые растворы; 2 – раствор с КШ

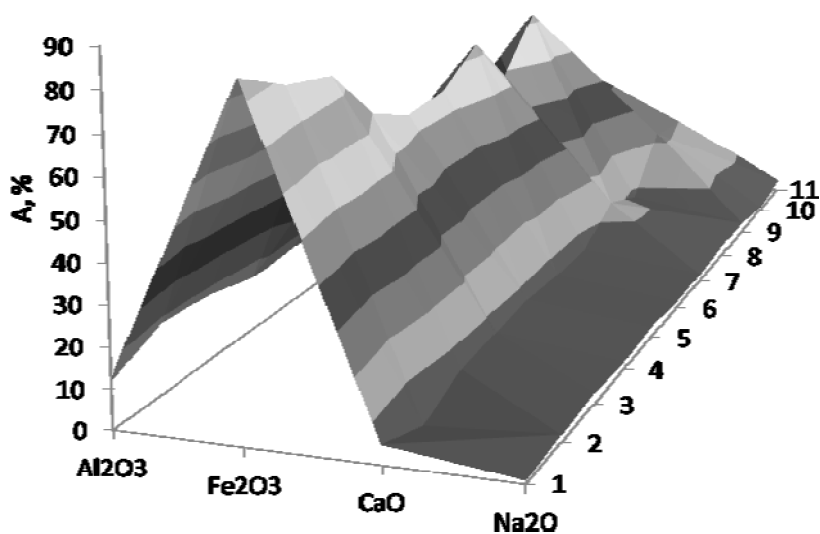


Рис. 5. Теоретическая емкость (A) 11 проб отвальных шламов глиноземного производства по серному газу

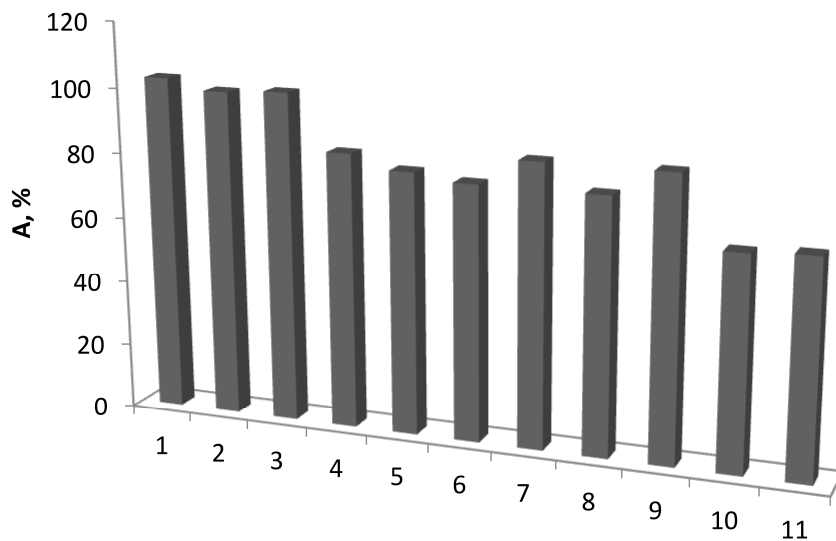


Рис. 6. Общая теоретическая емкость (A) 11 проб отвальных шламов глиноземного производства по серному газу

**Выводы**

В связи с тем, что хранение КШ в шламо-накопителях наносит вред окружающей среде и несет в себе риски возникновения экологической катастрофы, является актуальным поиск вариантов переработки КШ вместо их складирования.

Установлены сорбционные свойства КШ, открывающие возможности использования шламов в многочисленных вариантах очистки промышленных газов от токсичных соединений серы.

Установлен механизм предотвращения выхода в атмосферу газообразных соединений серы в процессе грануляции доменных шлаков не только с экологическим, но и с экономическим эффектом за счет исключения затрат на приобретение и размол обычно применяющихся природных минералов известняка и извести.

Из проведенных наблюдений можно подвести итог, что присутствие оксида кальция в материале сорбента играет значительную роль. Также отсутствие этого компонента снижает сорбционную способность всего вещества до минимума.

**Работа проведена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (регистрационный номер проекта 11.4098.2017/ПЧ от 01.01.2017).**

**Литература**

1. Экологическая катастрофа в Венгрии, 2010. – <https://kprf.ru/pravda/issues/2010/112/article-32393/>

2. Трушко, В.Л. Актуальности и возможности полной переработки красных шламов глиноземного производства / В.Л. Трушко, В.А. Утков, В.Ю. Бажин // Записки горного института. – 2017. – Т. 227. – С. 547–553. DOI: 10.25515/PMI.2017.5.547

3. Утков, В.А. Переработка красных шламов / В.А. Утков // Ресурсосберегающие и природозащитные технологии в производстве глинозёма, алюминия, магния и сопутствующей продукции: материалы Междунар. науч.-практ. конф. (15–18 октября 2006 г.). – СПб.: РУСАЛ ВАМИ, 2006. – С. 323–325.

4. Промышленные способы переработки красных шламов / В.А. Утков, В.В. Мешин, В.П. Ланкин, В.Г. Тесля // Состояние проблемы и направления использования в народном хозяйстве красного шлама: сб. науч. тр. – Николаев: НГЗ, 1999. – С. 9–17.

5. Wanchao Liu. Review on treatment and utilization of bauxite residues in China / Wanchao Liu, Jiakuan Yang, Bo Xiao // International Journal of Mineral Processing. – 2009. – Vol. 93, iss. 3-4. – P. 220–231. DOI: 10.1016/j.minpro.2009.08.005

6. Thakur, R.S. Utilization of red mud. 1. Analysis and utilization as raw material for absorbents, building-materials, catalysts and pollution problems / R.S. Thakur, B.R. Sant // J. Sci. Ind. Res. – 1983. – No. 42 (2). – P. 87–108.

7. Klauber, C. Bauxite residue issues: II. options for residue utilization / C. Klauber, M. Gräfe, G. Power // Hydrometallurgy. – 2011. – Vol. 108, iss. 1-2. – P. 11–32. DOI: 10.1016/j.hydromet.2011.02.007

8. Using a multivariate statistical in the identification of alumina loss in red mud / A. Júnior, A. Borges, A. Oliveira et al. // Light Metals. The Minerals, Metals & Materials Series / B.A. Sadler (Ed.). – Cham: Springer, 2013. – P. 87–89. DOI: 10.1002/9781118663189.ch15

9. Bauxite residue neutralization with carbon sequestration / L.A. Venancio, A.E.M. Paiva, E.N. Macedo et al. // Brazil. Light Metals. – 2010. – Vol. 167. – P. 185–193.

10. Сенник, А.И. Образование выбросов сероводорода при внешней грануляции доменных шлаков / А.И. Сенник, С.В. Милуков, О.Б. Прошкина // Вестник МГТУ им. Г.Н. Осипова. – 2008. – № 3. – С. 75–79.

11. Яковлев, М.Г. Технология получения агломерата из отвальных красных шламов глиноземного производства: дис. ... канд. техн. наук / М.Г. Яковлев. – СПб.: НМСУ «Горный», 2013.

12. Мемоли, Ф. Рециклинг печных побочных продуктов инъекцией в электродуговую печь – опыт и перспективы / Ф. Мемоли, М. Гуззон // Черные металлы. – 2007. – № 4. – С. 26–33.

13. Ли, Т.С. Технология утилизации ковшового шлака / Т.С. Ли, И.С. Чой, В.Е. Сон // Черные металлы. – 2004. – № 5. – С. 28–33.

14. Школьник, Я.Ш. Новая технология и оборудование для переработки шлаковых расплавов / Я.Ш. Школьник, А.Г. Шакуров, М.З. Мандель // Металлург. – 2011. – № 10. – С. 58–60.

15. Kuhn, M. Successful treatment of liquid BOF slag at Thyssen Krupp Steel works to solve the problem of volume stability / M. Kuhn, P. Drissen, H. Schrey // Proc. 3rd European Oxygen Steelmaking Conf., Oct.–Nov., 2000. – Birmingham, UK, 2000. – P. 521–531.

16. Алешин, А. Рациональность и отвал / А. Алешин, А. Остроушко, Ю. Пустовалов // *Металл.* – 2008. – № 7. – С. 50–52.

17. Кравченко, В.П. Анализ способов грануляции шлаковых расплавов и факторов, влияющих на качество граншлака / В.П. Кравченко // *Вестник ПГТУ. Серия: Технические науки.* – 2015. – № 30 (1). – С. 51–58.

18. Очистка дымовых газов ТЭЦ от оксидов серы и азота / В.А. Арбузов, Б.Х. Исанова, М.О. Белякова, А.Н. Задиранов // *Литье и металлургия.* – 2009. – № 3 (52). – С. 99–103.

19. Сорокин, Ю.В. Экологические и тех-

нологические аспекты переработки сталеплавильных шлаков / Ю.В. Сорокин, Б.Л. Демин // *ОАО «Черметинформация». Бюл. «Черная металлургия».* – 2003. – № 3. – С. 75–79.

20. Гроснич, К.-Х. Новая установка грануляции шлака: улучшение хода процесса и повышение производительности / К.-Х. Гроснич, В. Эверс, Г. Домбровски // *Черные металлы.* – 2004. – № 1. – С. 33–40.

21. Воскобойников, В.Г. *Общая металлургия* / В.Г. Воскобойников, В.Я. Кудрин, А.М. Якушев. – М.: ИКЦ Академкнига, 2002. – 768 с.

**Лебедев Андрей Борисович**, аспирант кафедры металлургии, Санкт-Петербургский горный университет, г. Санкт-Петербург; lebedev.andrey679@gmail.com; ORCID ID 0000-0002-5264-9317.

**Утков Владимир Афанасьевич**, д-р техн. наук, профессор кафедры автоматизации технологических процессов и производств, Санкт-Петербургский горный университет, г. Санкт-Петербург; vladimirutkov@rambler.ru; ORCID ID 0000-0001-7845-0608.

*Поступила в редакцию 12 апреля 2019 г.*

---

DOI: 10.14529/met190303

## THE INTERACTION OF MOLTED SLAG WITH SOLID PHASE OF RED SLUDGE

**A.B. Lebedev**, lebedev.andrey679@gmail.com,  
**V.A. Utkov**, vladimirutkov@rambler.ru

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

Nowadays the most urgent task of non-ferrous metallurgy is the replacement of ecologically dangerous storage of red mud (RM), the withdrawal of alumina production from bauxite, by its complete processing. It is necessary to search for appropriate industrial technologies. This work has demonstrated that one of them is the use of RM for granulation of molten slags. The large amounts of granulated slag are regularly used in the production of cements, in road construction, agriculture and other fields of engineering and technology. The characteristic of the process for obtaining granulated slag is the active interaction of molten metallurgical slag with a cooling liquid. The slag solidifies and its mass breaks up in the atmosphere of the hot steam into small particles because of the emerging critical stresses. These two processes happen simultaneously and instantly. The problem is that during the granulation of slag, which usually contains sulfur, a large amount of harmful substances is released into the atmosphere, such as, sulfur oxides and, mainly, hydrogen sulfide. Its concentration on the working sites of the granulation sections is much higher than the TLV. To combat this phenomenon, fine-dispersed lime or limestone, which are characterized by their sorption properties, are usually added into the cooling liquid composition, but it results in high expenditures. This paper examines similar properties of finely dispersed red mud. Laboratory and industrial tests have been carried out. It is found that with the help of red mud the concentration of sulfur gases on the granulation working sites can be reduced by 2 orders of magnitude. It is important that

the new granulated slag, called in this case “slurry” is not inferior to the usual one according to its basic technological properties.

*Keywords:* processing, environmental improvement, granulated slag, sludge-slag, reducing emissions of sulfur and greenhouse gases.

### References

1. *Ecological disaster in Hungary*, 2010. Available at: <https://kprf.ru/pravda/issues/2010/112/article-32393/> (in Russ.)
2. Trushko V.L., Utkov V.A., Bazhin V.Y. [Topicality and Possibilities for Complete Processing of Red Mud of Aluminous Production]. *Zapiski Gornogo Instituta*, 2017, vol. 227, pp. 547–553. (in Russ.) DOI: 10.25515/PMI.2017.5.547
3. Utkov V.A. [Recycling of Red Mud]. *Resursosberegayushchiye i prirodoshchitnyye tekhnologii v proizvodstve glinozëma, alyuminiya, magniya i sopustvuyushchey produktsii: materialy Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. (15–18 oktyabrya 2006 g.)* [Resource-Saving and Environmental Technologies in the Production of Alumina, Aluminum, Magnesium and Related Products. Materials Int. Scientific-Practical Conf. (October 15–18, 2006)]. St. Petersburg, RUSAL VAMI Publ., 2006, pp. 323–325. (in Russ.)
4. Utkov V.A., Mechin V.V., Lankin V.P., Teslya V.G. [Industrial Processing of Red Mud]. *Sostoyaniye problemy i napravleniya ispol'zovaniya v narodnom khozyaystve krasnogo shlama: sb. nauch. tr.* [The State of the Problem and the Directions of Use in the National Economy of Red Mud. Collection of Scientific Papers]. Nikolaev, Nikolaev Alumina Plant Publ., 1999, pp. 9–17. (in Russ.)
5. Wanchao Liu, Jiakuan Yang, Bo Xiao. Review on Treatment and Utilization of Bauxite Residues in China. *International Journal of Mineral Processing*, 2009, vol. 93, iss. 3-4, pp. 220–231. DOI: 10.1016/j.minpro.2009.08.005
6. Thakur R.S., Sant B.R. Utilization of Red Mud. 1. Analysis and Utilization as Raw Material for Absorbents, Building-Materials, Catalysts and Pollution Problems. *J. Sci. Ind. Res.*, 1983, no. 42 (2), pp. 87–108.
7. Klauber C., Gräfe M., Power G. Bauxite Residue Issues: II. Options for Residue Utilization. *Hydrometallurgy*, 2011, vol. 108, iss. 1-2, pp. 11–32. DOI: 10.1016/j.hydromet.2011.02.007
8. Júnior A., Borges A., Oliveira A. et al. Using a Multivariate Statistical in the Identification of Alumina Loss in Red Mud. In: *Sadler B.A. (Ed.) Light Metals. The Minerals, Metals & Materials Series*. Cham, Springer, 2013, pp. 87–89. DOI: 10.1002/9781118663189.ch15
9. Venancio L.A., Paiva A.E.M., Macedo E.N., Antonio J., Souza S. Bauxite Residue Neutralization with Carbon Sequestration. *Brazil. Light Metals*, 2010, vol. 167, pp. 185–193.
10. Sennik A.I., Milyukov S.V., Proshkina O.B. [The Formation of Hydrogen Sulfide Emissions during External Granulation of Blast Furnace Slags]. *Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University*, 2008, no. 3, pp. 75–79. (in Russ.)
11. Yakovlev M.G. *Tekhnologiya polucheniya aglomerata iz otval'nykh krasnykh shlamov glinozemnogo proizvodstva: dis. kand. tekhn. nauk* [The Technology of Sinter Production from Dump Red Mud of Alumina Production. Cand. Sci. Diss.]. St. Petersburg, 2013. NMSU “Gornyy”.
12. Memoly F., Guzzon M. [Recycling of Furnace By-products by Injection into an Electric Arc Furnace – Experience and Prospects]. *Ferrous Metals*, 2007, no. 4, pp. 26–33. (in Russ.)
13. Lee T.S., Choi I.S., Son V.E. [Recycling Technology Bucket Slag]. *Ferrous Metals*, 2004, no. 5, pp. 28–33. (in Russ.)
14. Shkolnik Ya.Sh., Shakurov A.G., Mandel M.Z. New Technology and Equipment for Recycling Slag Melts. *Metallurgist*, 2012, vol. 55, iss. 9–10, pp. 724–726.
15. Kuhn M., Drissen P., Schrey H. Successful Treatment of Liquid BOF Slag at Thyssen Krupp Steel Works to Solve the Problem of Volume Stability. *Proc. 3rd European Oxygen Steelmaking Conf., Oct.–Nov., 2000*. Birmingham, UK, 2000, pp. 521–531.
16. Aleshin A., Ostroushko A., Pustovalov Yu. [Rationality and Dump]. *Metal*, 2008, no. 7, pp. 50–52. (in Russ.)



17. Kravchenko V.P. [Analysis of Granulation Methods of Slag Melts and Factors Affecting the Quality of the Slag]. *Bulletin of Perm State Technical University. Series: Engineering*, 2015, no. 30 (1), pp. 51–58. (in Russ.)

18. Arbuzov V.A. Isanova B.Kh., Belyakova M.O., Zadiranov A.N. [Flue Gas Cleaning of Thermal Power Plants from Sulfur Oxides and Nitrogen]. *Casting and Metallurgy*, 2009, no. 3 (52), p. 99–103. (in Russ.)

19. Sorokin Yu.V., Demin B.L. [Ecological and Technological Aspects of Steelmaking Slag Processing]. *OJSC “Chermetinformatsiya”. Bul. “Ferrous Metallurgy”*, 2003, no. 3, pp. 75–79. (in Russ.)

20. Grosnich K.-X., Evers V., Dombrowski G. New Installation of Slag Granulation: Improving the Process and Increasing Productivity. *Ferrous Metals*, 2004, no. 1, pp. 20–26.

21. Voskoboynikov V.G., Kudrin V.Y., Yakushev A.M. *Obshchaya metallurgiya* [General Metallurgy]. Moscow, Akademkniga Publ., 2002. 768 p.

*Received 12 April 2019*

---

### ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Лебедев, А.Б. Взаимодействия расплавленного шлака с твердой фазой красного шлама / А.Б. Лебедев, В.А. Утков // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». – 2019. – Т. 19, № 3. – С. 24–32. DOI: 10.14529/met190303

### FOR CITATION

Lebedev A.B., Utkov V.A. The Interaction of Molted Slag with Solid Phase of Red Sludge. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Metallurgy*, 2019, vol. 19, no. 3, pp. 24–32. (in Russ.) DOI: 10.14529/met190303