

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования «Уральский федеральный университет  
имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

*На правах рукописи*



**Темников Владислав Владимирович**

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РАФИНИРОВОЧНЫХ СТАЛЕПЛАВИЛЬНЫХ ШЛАКОВ  
В АГЛОПРОИЗВОДСТВЕ**

05.16.02 – Metallургия черных, цветных и редких металлов

**Автореферат**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Екатеринбург – 2021

Работа выполнена на кафедре металлургии железа и сплавов Института новых материалов и технологий ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор,  
**Шешуков Олег Юрьевич**

Официальные оппоненты: **Фролов Юрий Андреевич**,  
доктор технических наук, старший научный сотрудник, ООО Научно-производственное предприятие «Уралэлектра», г. Екатеринбург, консультант-металлург Департамента технологий;

**Чуманов Илья Валерьевич**,  
доктор технических наук, профессор, филиал ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)» в г. Златоусте, заведующий кафедрой «Техника и технологии производства материалов»;

**Демин Борис Леонидович**,  
кандидат технических наук, АО «Уральский институт металлов», г. Екатеринбург, исполнительный директор НИЦ «Переработка и использование техногенных отходов».

Защита состоится «18» июня 2021 г. в 15:00 ч на заседании диссертационного совета УрФУ 05.08.19 по адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, ауд. И-420 (зал Ученого совета).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», <https://dissovet2.urfu.ru/mod/data/view.php?id=12&rid=2217>.

Автореферат диссертации разослан «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2021 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Шопперт Андрей Андреевич

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность и степень разработанности темы исследования.** Широкое распространение в металлургической отрасли внепечной обработки стали с использованием высококальциевых (содержание СаО до 60 %) рафинировочных шлаков обострило экологические проблемы, связанные с хранением и переработкой подобных шлаков. Выполнивший свои металлургические функции ковшевой шлак после слива из ковша и затвердевания претерпевает так называемый силикатный распад.

Необходимо учитывать, что примерно 80 % частиц распавшегося шлака имеют размер менее 30 мкм. Такие частицы легко аэрируются, разносятся ветром на большие расстояния, загрязняют почвы, растворяются в грунтовых, осадочных и сточных водах. Также при совместном складировании они загрязняют железосодержащие сталеплавильные шлаки, которые в настоящее время эффективно перерабатываются на крупный и мелкий скрап для использования в сталеплавильном производстве, металлопродукт для использования в доменном производстве, щебень и песок для использования в дорожном строительстве.

Ежегодно в АО «ЕВРАЗ НТМК» образуется более 90 тыс. т шлака внепечной обработки стали (ВОС) с установки «ковш–печь» (УКП), который не находит рынков сбыта и временно складировается. В связи с этим необходимо найти способ утилизации таких шлаков.

Мировой опыт интенсификации процесса агломерации с получением качественного агломерата, отвечающего требованиям доменного процесса, свидетельствует о необходимости использования извести в аглошихте. Интенсифицирующее действие извести объясняется главным образом высокими вяжущими свойствами, что способствует улучшению комкуемости шихты и упрочнению гранул, как в сыром состоянии, так и при подсушке. Поскольку известь является дефицитным продуктом, то внепечной шлак может рассматриваться как недорогой заменитель извести в аглопроцессе.

Таким образом, разработка технологии использования рафинировочных шлаков сталеплавильного производства в аглопроизводстве в качестве флюса и связующего в настоящее время весьма актуальна.

**Целью** диссертационного исследования является разработка технологии агломерации железорудного сырья с использованием рафинировочных шлаков сталеплавильного производства в качестве заменителя известняка и связующего.

### **Задачи исследования:**

- исследование химического, физического и фазового состава шлака ВОС;
- оценка физико-химических свойств шлака ВОС, как вяжущего вещества;
- испытание и сравнение образцов аглошихты с различными вяжущими на сжатие;

– разработка технологии применения шлаков ВОС в агломерации на основе проведения серии лабораторных спеканий агломерата, а также проведенных опытно-промышленных испытаний разработанной технологии.

**Научная новизна** работы состоит в следующем:

1. Разработано и принято к реализации новое научно-техническое направление по переработке шлака ВОС в аглопроизводстве, позволившее решить важнейшую задачу по сокращению экологических выбросов в атмосферу и утилизации техногенных образований;

2. На основе исследований структуры химического, физического и фазового состава шлака ВОС выявлены его новые технологические свойства (содержание значительного количества фаз, обладающих вяжущими свойствами);

3. Научно обоснованы целесообразность и технологическая эффективность применения шлака ВОС в процессе агломерации, обеспечивающие снижение расхода кокса на 7,5 кг/т железоблины, повышение содержания  $V_2O_5$  в железоблине на 0,22 абс. %, увеличение удельной производительности агломашин на 6,3 % и увеличение показателя прочности агломерата  $B_{+5}$  мм на 0,3 абс. %.

**Практическая значимость** исследования заключается в разработке технологии агломерации железорудного сырья при использовании в составе аглошихты шлака ВОС в смеси с конвертерными шлаками «дуплекс» процесса – стальными конвертерными шлаками (СКШ) и шлаками «моно» процесса – ванадийсодержащими конвертерными шлаками (ВКШ), позволяющей значительно снизить экологическую нагрузку компании ООО «ЕвразХолдинг» в части хранения и пылеобразования шлаков ВОС, также обеспечивающей существенную экономию использования дорогостоящего кокса в аглопроцессе, повышение прочности агломерата и снижение выбросов вредных веществ в окружающую среду (ожидаемый экономический эффект - 143,517 млн. рублей в год). По результатам диссертационного исследования получен патент РФ.

**Методология и методы исследования.** Для решения поставленных задач проведено исследование минералогических свойств шлака ВОС с использованием рентгеновского дифрактометра «XRD 7000C SHIMADSU» с автоматическим программным управлением в отфильтрованном монохроматизированном  $Cu\ K\alpha$ -излучении. Прочность на сжатие образцов аглошихты с различными вяжущими определена на гидравлическом прессе по ГОСТ 28840-90. Спекания агломерата с использованием в аглошихте шлака ВОС проведены на тягодутьевой лабораторной агломерационной установке. Определение показателей процесса спекания в лабораторных условиях проведено при обеспечении технологических параметров (разрежение, температура шихты и т. д.), характеризующих работу агломашин. Исследование холодной прочности агломерата проведено по ГОСТ 15137–77. Обработка статистических данных при опытно-

промышленном производстве проведена с использованием инструментов Excel.

**Достоверность** полученных результатов подтверждается стабильностью экспериментальных данных о повышении производительности агломашии, снижения расхода твердого топлива и улучшении качества получаемого агломерата при использовании шлака ВОС в аглошихте. Технология прошла опытно-промышленное опробование при производстве агломерата (железофлюса) в Лебяжинском аглоцехе ОАО «ВГОК», что подтверждается утвержденными актами испытаний.

#### **Основные положения и результаты, выносимые на защиту:**

1. Анализ технологических показателей процесса агломерации при замене известняка на сухую известь и известковое молоко для сравнения с использованием в процессе шлака ВОС;
2. Исследования фазового состава шлаков с УКП на предмет обладания их вяжущими свойствами, возможности повышения прочности железофлюса и срока хранения на складе;
3. Подготовка и испытания образцов аглошихты с различными вяжущими веществами на сжатие;
4. Лабораторные исследования процесса агломерации при использовании в составе аглошихты шлака ВОС в смеси с СКШ/ВКШ;
5. Разработанную технологию процесса агломерации при использовании в составе аглошихты шлака ВОС в смеси с СКШ/ВКШ.

**Апробация результатов.** Основные положения работы докладывались и обсуждались на Международной научно-технической конференции «Наука – Образование – Производство: опыт и перспективы развития» (г. Нижний Тагил, Свердловская область, 2018 г.); IX Международном конгрессе доменщиков «Металлургия чугуна. Перспективы развития до 2025 года» (г. Нижний Тагил, Свердловская область, 2018 г.); VI Международной научно-технической конференции «Научно-технический прогресс в черной металлургии» (г. Череповец, Вологодская область, 2019 г.); Международной научно-технической конференции «Наилучшие доступные технологии в доменном производстве» (г. Москва, 2019 г.); XI Международной научно-технической конференции молодых специалистов «Перспективы развития металлургических технологий» (г. Москва, 2020 г.); Международном металлургическом саммите «Металлы и сплавы» (г. Екатеринбург, 2020 г.).

**Личный вклад автора.** Соискатель выполнил анализ литературных и патентных данных о состоянии вопроса по заданной теме и постановке задач исследования. Участвовал в экспериментах по получению опытных данных по характеристикам шлака ВОС, изучал их влияние на процесс агломерации. Проводил лабораторные и опытно-промышленные исследования процесса агломерации с использованием в составе аглошихты шлака ВОС в смеси с

СКШ/ВКШ и обработке результатов. Участвовал в подготовке публикаций по работе и написании заявки на изобретение. Организовал проведение опытно-промышленных испытаний новых технологий и непосредственно участвовал в них.

**Публикации.** По материалам диссертации опубликовано 12 статей, 7 из которых в изданиях, рекомендованных ВАК РФ и Аттестационным советом УрФУ, в том числе 4 – в журналах, индексируемых в международной базе Scopus, получен 1 патент РФ на изобретение.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 158 отечественных и зарубежных источников, 11 приложений. Материалы диссертации изложены на 110 страницах машинописного текста, содержат 36 рисунков и 27 таблиц.

### ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** дана оценка состояния решаемой проблемы, обоснована актуальность темы диссертационного исследования, определены цель и задачи работы.

**В первой главе** представлен подробный аналитический обзор по теме диссертации, в результате которого, обоснована цель и поставлены задачи исследования. Рассмотрены существующие способы переработки различных видов отходов и побочных продуктов АО «ЕВРАЗ НТМК». Показано, что наиболее проблемной задачей является утилизация саморассыпающихся шлаков внепечной обработки стали (ВОС) с установки «ковш–печь» (УКП), которых ежегодно в АО «ЕВРАЗ НТМК» образуется более 90 тыс. т (рисунок 1).



Рисунок 1 – Вид саморассыпающегося шлака ВОС «ЕВРАЗ НТМК»

Рассмотрены способы повышения качества доменного агломерата. Оценено использование извести в агломерации, интенсифицирующее действие которой объясняется главным образом высокими вяжущими свойствами, что способствует улучшению комкуемости шихты и упрочнению гранул, как в сыром состоянии, так и при подсушке.

Поскольку известь является дефицитным продуктом, то шлак ВОС может рассматриваться как недорогой заменитель извести в аглопроцессе.

**Во второй главе** выполнен анализ эффективности использования извести при производстве агломерата, в том числе рассмотрены результаты ранее проведенных лабораторных спеканий агломерата в АО «ЕВРАЗ КГОК».

Показано, что введение в шихту извести в виде пушонки от 15 до 45 кг на тонну агломерата увеличивало вертикальную скорость процесса спекания с 12,7 мм/мин (в базовом опыте) до 12,9–28,0 мм/мин., а удельную производительность установки на 45 отн. %.

Введение в шихту при таком же расходе в сухом весе извести в виде известкового молока увеличивало вертикальную скорость спекания с 12,73 мм/мин (в базовом опыте) до 18,67–31,10 мм/мин. Максимальное увеличение удельной производительности установки составило 55 отн. %.

Увеличение вертикальной скорости спекания в лабораторных опытах с известью обуславливалось значительным повышением степени окомкования шихты.

Вместе с тем из-за низкой высоты слоя шихты (280 мм) и, соответственно, высокой скорости фильтрации воздуха через слой спекаемой шихты, прочность агломерата начинает снижаться при использовании извести в количестве более 30 кг/т, а известкового молока - после 15 кг/ т агломерата.

Таким образом, показано:

– известковое молоко более сильный интенсификатор процесса спекания шихты, чем, даже, известь-пушонка;

– для достижения одинакового результата молока требуется меньше, чем извести;

– для предотвращения рассогласования скорости движения фронта воспламенения топлива и максимальной температуры в слое, как только с увеличением расхода извести начинает снижаться прочность агломерата, необходимо начинать увеличивать высоту слоя шихты или ограничить дальнейший рост расхода извести.

Далее в главе рассмотрены результаты опытно-промышленных испытаний по производству агломерата АО «ЕВРАЗ КГОК» с использованием извести в аглошихте.

Предварительно на ОАО «ВГОК» была проведена операция профилирования концентрата (смешения) с известью. Профилированный известью концентрат был погружен в железнодорожный транспорт и отправлен в г. Качканар, где его спекали на агломашинах.

По результатам опытно-промышленной работы были достигнуты следующие показатели:

– механическая прочность произведенного агломерата повысилась и составила: массовая доля класса более 5 мм – 74,91 % против 73,48 %; содержание мелочи составило 4,60 % против 4,89 %; истираемость осталась практически на прежнем уровне;

– производительность агломашин в период промышленных испытаний повысилась на 14,9 % и составила 252,2 т/л · час, против 219,5 т/л · час (база) при работе одной агломашинной; при пересчете на две работающие агломашин-

ны, ожидаемая производительность составит 258,0 т/л · час, или свыше 4100 тыс. т в год;

– высота слоя составила 425 мм в среднем (450 мм max) против 350 мм (база);

– экономия коксовой мелочи составила 8,44 кг/т или 14,17 %;

– экономия электроэнергии 4,0 кВт · ч/т, или 8,9 %;

– экономия известняка 46,0 кг/т, или 27,2 %.

Для эффективности мероприятия при содержании тонкоизмельченного концентрата в железорудной части более 60 % удельный расход извести должен составлять не менее 30–50 кг/т агломерата. Соответственно, при объемах производства 3,5 млн. т агломерата АО «ЕВРАЗ КГОК» в год требуется от 105 до 175 тыс. т извести, дефицитной в Уральском регионе.

На основании этого шлак ВОС может рассматриваться как недорогой и недефицитный заменитель извести в аглопроцессе.

**В третьей главе** исследован физико-химический и фазовый состав шлака ВОС, приведено его сравнение с известковыми вяжущими, оценены физико-химические свойства шлака ВОС, как вяжущего вещества, проведены исследования прочности на сжатие аглошихты с различными вяжущими, определен оптимальный объем использования шлака в аглошихте и проведены лабораторные спекания агломерата с применением шлака ВОС в агломерации.

Основными компонентами шлака ВОС являются CaO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и MgO. Так же, в составе шлака ВОС может присутствовать значительное количество металлического железа (таблица 1).

Таблица 1 - Химический состав шлаков ВОС «ЕВРАЗ НТМК», %

| Fe         | CaO       | SiO <sub>2</sub> | MgO      | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | V <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | Mn         | S          | P            | Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Zn           |
|------------|-----------|------------------|----------|--------------------------------|-------------------------------|------------|------------|--------------|--------------------------------|--------------|
| <u>0,5</u> | <u>45</u> | <u>10</u>        | <u>7</u> | <u>10</u>                      | <u>0,05</u>                   | <u>0,5</u> | <u>0,1</u> | <u>0,005</u> | <u>0,03</u>                    | <u>0,002</u> |
| 15         | 60        | 20               | 10       | 20                             | 0,1                           | 0,9        | 0,3        | 0,01         | 0,07                           | 0,007        |

Из вредных примесей, в составе шлака ВОС присутствует S до 0,3 %, P до 0,01 %, Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> до 0,1 % и Zn до 0,01 %. При условии оптимальной дозировки шлака, приход серы в аглошихту будет находится на удовлетворительном уровне. Необходимо отметить, что в состав железофлюса входит значительное количество материалов с высоким содержанием серы. Колошниковая и аспирационная пыли, шламы и металлопродукты из отвальных шлаков содержат также до 0,3 %. Уровень содержания P, Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и Zn в шлаке ВОС является не критичным для аглодоменного передела.

По данным ситового анализа шлак ВОС удовлетворяет требованиям аглопроизводства и содержит более 80 % фр. 0-3 мм (таблица 2).

Таблица 2 - Фракционный состав шлаков ВОС «ЕВРАЗ НТМК», %

| 0-3 мм | 3-10 мм | 10-20 мм | 20-100 мм | более 100 мм |
|--------|---------|----------|-----------|--------------|
| 80,6   | 2,3     | 0,4      | 7,4       | 9,3          |



В связи с тем, что в производственном процессе любого металлургического передела неизбежно происходят потери металла со шлаком, в структуре исследуемого шлака ВОС присутствует значительное количество магнитных металлических включений – скрапа разного размера и формы (рисунок 2 и 3). Этим обусловлено и наличие в ситовом составе значительного количества шлака ВОС фракции более 20 мм.

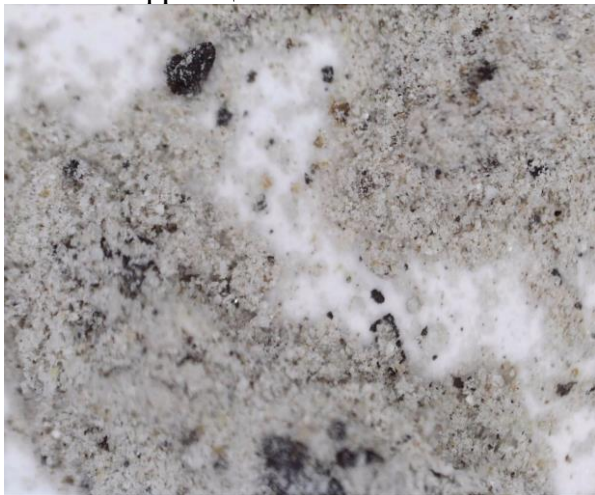


Рисунок 2 – Вид шлака ВОС «ЕВРАЗ НТМК» под микроскопом



Рисунок 3 – Металлические включения в шлаке ВОС

Соответственно, было установлено, что перед использованием шлака ВОС в аглопроцессе необходимо организовать его очистку (отмагничивание или грохочение) от крупных металловключений.

Известно, что  $\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и  $\text{MgO}$  находятся в шлаке ВОС не в свободной форме, а в виде соединений, и было необходимо изучить не только химический, но и фазовый состав шлака ВОС. На основании этого в лабораторных условиях ФГБУН «ИМЕТ УрО РАН» был проанализирован фазовый состав шлаков ВОС «ЕВРАЗ НТМК» (таблица 3).

Таблица 3 - Фазовый состав шлаков ВОС «ЕВРАЗ НТМК»

| Материал | Содержание фаз, масс. %                     |                                 |                                  |                           |                |              |
|----------|---|---------------------------------|----------------------------------|---------------------------|----------------|--------------|
|          | $\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14}\text{O}_{33}$ | $\beta\text{-Ca}_2\text{SiO}_4$ | $\gamma\text{-Ca}_2\text{SiO}_4$ | $\text{Ca}_3\text{SiO}_5$ | $\text{CaF}_2$ | $\text{MgO}$ |
| Шлак УКП | 21,39                                       | 45,15                           | 16,10                            | 9,03                      | 5,27           | 3,06         |

Из представленных данных видно, что шлаки ВОС содержат значительное количество фаз, обладающих вяжущими свойствами, это майенит  $\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14}\text{O}_{33}$ , ларнит  $\beta\text{-Ca}_2\text{SiO}_4$ , алит  $\text{Ca}_3\text{SiO}_5$ , что является важным технологическим качеством шлака ВОС при проработке направлений его использования в агломерации.

При введении шлака ВОС в аглошихту, взаимодействии с водой при смешивании и окомковании шихты он будет твердеть, играя роль связующего материала и повышая прочность агломерата. При замене в аглошихте сырого известняка на шлаки ВОС уменьшится необходимость разлагать  $\text{CaCO}_3$  и, со-

ответственно, снизятся затраты на агломерацию, уменьшатся расход кокса и содержание серы в агломерате.

Считается экономически целесообразным применение вторичного сырья в качестве вяжущих, в том числе металлургических шлаков. По составу они близки к вяжущим веществам и, по сравнению с природными, обладают большей химической активностью. Их химическая активность обусловлена термической обработкой, в результате которой шлаки переходят в стеклообразное (аморфное) состояние и приобретают избыточную энергию.

Шлак ВОС близок по своему составу к известковому вяжущему – гидравлической извести (таблица 4), т.к. содержит значительное количество алюминатов и силикатов кальция.

Таблица 4 - Виды известковых вяжущих

| Наименование известкового вяжущего | Сырье  | Температура обжига, °С | Состав вяжущих  |
|------------------------------------|--|------------------------|---|
| Негашеная комовая известь          | $\text{CaCO}_3$  | 1100                   | $\text{CaO}$  |
| Воздушная строительная известь     | $\text{CaCO}_3, \text{MgCO}_3$   | 1000-1200              | $\text{CaO}+\text{MgO}$ (95 %),<br>$2\text{CaO}-\text{SiO}_2$ ,<br>$\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3$ |
| Гашеная известь (пушонка)          | $\text{CaCO}_3$  | 1200                   | $\text{Ca}(\text{OH})_2$  |
| Гидравлическая известь             | $\text{CaCO}_3 + \text{глина},$<br>$\text{Al}_2\text{O}_3-2\text{SiO}_2-$<br>$2\text{H}_2\text{O}$ | 1300                   | $5\text{CaO}-\text{SiO}_2$<br>$3\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3$ ,<br>$\text{CaOMgO}$                |

Шлак ВОС обладает всеми основными физико-химическими свойствами гидравлических вяжущих веществ, такими как дисперсность, пластичность и способность к твердению.

В работе рассмотрен механизм гидратационного твердения шлака ВОС, происходящего при взаимодействии его с водой. Процесс твердения происходил в течение одних суток по стадиям: насыщение (подготовительная), коллоидация и кристаллизация (рисунок 4, 5, 6).

В стадии насыщения частицы шлака ВОС, растворяясь на границе фаз «вода-твердое тело», образуют насыщенный раствор и гидратируются. Молекулы воды постепенно проникают в кристаллическую решетку шлака ВОС.

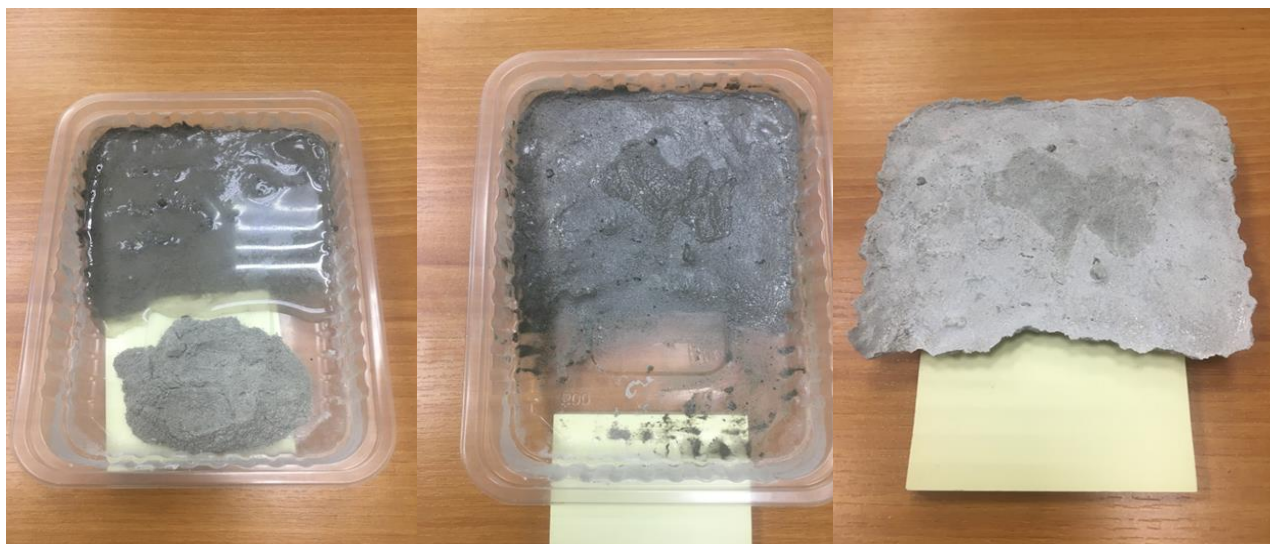


Рисунок 4 - Насыщение водой шлака ВОС

Рисунок 5 - Коллоидация шлака ВОС

Рисунок 6 - Кристаллизация шлака ВОС

В стадии коллоидации гидратные новообразования, менее растворимые в воде, чем исходные соединения, образуют пересыщенный раствор. Из пересыщенного раствора, который можно считать пересыщенным гелем, медленно выделяется кристаллический сросток. Одновременно гель обезвоживается и освободившаяся вода гидратирует частицы исходного вяжущего. При этом образовавшиеся гели затвердевают, так как обезвоживаются в результате связывания воды.

В стадии кристаллизации происходит окончательное твердение и образование твердого камневидного тела шлака ВОС.

Камневидное тело шлака ВОС имело плотную структуру, толщиной от 0,001 до 0,01 м (в размерах формы для твердения), и для экспертной оценки прочности этого материала было произведено его сбрасывание с высоты 1 м (рисунок 7).



Рисунок 7 - Испытание камневидного тела шлака ВОС на сбрасывание



Содержание фракции менее 5 мм в материале после сбрасывания составило 3,1 %, остальные кусочки камневидного шлака ВОС были фр. более 5 мм.

Для исследования прочности на сжатие аглошихты со шлаком ВОС все материалы, отдельно, были измельчены на виброистирателе. Смесь материалов была подготовлена к набивке путем смешивания с 15 % воды (таблица 5).

Таблица 5 - Смесь материалов

| Наименование шихты   | Основная шихта, %/г | Шлак ВОС н/ст., %/г | Шлак ВОС стаб., %/г | Известь пушонка, %/г | Вода, %/г |
|----------------------|---------------------|---------------------|---------------------|----------------------|-----------|
| Базовая              | 100/300             | 0/0                 | 0/0                 | 0/0                  | 15/45     |
| Со шлаком ВОС н/ст.  | 92,5/277,5          | 7,5/22,5            | 0/0                 | 0/0                  | 15/45     |
| Со шлаком ВОС стаб.  | 92,5/277,5          | 0/0                 | 7,5/22,5            | 0/0                  | 15/45     |
| С известью (пушонка) | 92,5/277,5          | 0/0                 | 0/0                 | 7,5/22,5             | 15/45     |

Для исследования, по литейной технологии, методом набивки тремя ударами копра, были подготовлены цилиндры (рисунок 8) с базовой шихтой железофлюса, с шихтой железофлюса в смеси с нестабилизированным шлаком ВОС, с шихтой железофлюса в смеси со стабилизированным шлаком ВОС и с шихтой железофлюса в смеси с гашеной известью (пушонка). Для набора прочности, образцы выстаивались при комнатной температуре в течение семи суток.



Рисунок 8 - Образцы шихты железофлюса с различными вяжущими

Наряду с этим, путем совместного помола, были подготовлены к испытанию на сжатие цилиндры (рисунок 9) шихты железофлюса с нестабилизированным шлаком ВОС, шихты железофлюса со стабилизированным шлаком ВОС и шихты железофлюса с гашеной известью (пушонка).



Рисунок 9 - Образцы аглошихты при совместном помоле с различными вяжущими

После набора прочности в течение семи суток, была определена прочность на сжатие образцов аглошихты с различными вяжущими на гидравлическом прессе по ГОСТ 28840-90.

По результатам испытания на сжатие образцов шихты железоблюса с различными вяжущими получено (таблица 6), что предел прочности смесей со шлаком ВОС значительно, в 3-4 раза, превышает показатели смеси с известью. Прочность смеси со стабилизированным шлаком выше, чем прочность смеси с нестабилизированным ВОС. При совместном помоле шихты с нестабилизированным и со стабилизированным шлаком ВОС, прочность образцов была выше примерно на 20 %, чем при раздельном помоле.

Таблица 6 - Результаты испытаний образцов материалов на прочность при сжатии

| Подготовка шихты | Предел прочности при сжатии брикетов железоблюса через 7 суток, МПа |                     |                     |                      |
|------------------|---|---------------------|---------------------|----------------------|
|                  | Базовая шихта   | Со шлаком ВОС н/ст. | Со шлаком ВОС стаб. | С известью (пушонка) |
| Раздельный помол | 0,44  | 2,69                | 3,23                | 0,84                 |
| Совместный помол | -   | 3,44                | 4,0                 | 0,87                 |

Лабораторные испытания шлака ВОС были проведены на базе ОАО «ВГОК» при производстве железоблюса, в состав которого входит до 15 материалов - побочных продуктов, значительно различающихся по своему химическому составу.

В зависимости от компонентного состава шихты и требуемой основности железоблюса  $CaO/SiO_2 = 2,5$  ед., при использовании шлака ВОС в объеме до 70 кг/т железоблюса (7-15 %), возможно полное выведение сырого известняка из аглопроцесса (таблица 7).

Таблица 7 - Химический состав материалов в шихте железоблюса

| Наименование материалов                     | Содержание компонентов, % |       |                  |       |      |       |                                |                               |      |
|---|---------------------------|-------|------------------|-------|------|-------|--------------------------------|-------------------------------|------|
|   | Fe <sub>общ.</sub>        | CaO   | SiO <sub>2</sub> | ППП   | S    | MgO   | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | V <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | Mn   |
| Зола кокса                                  | 0,00                      | 7,67  | 56,95            | 0,00  | 0,00 | 0,00  | 3,10                           | 0,00                          | 0,00 |
| Известняк сырой Гальяновского месторождения | 0,00                      | 54,00 | 0,90             | 41,71 | 0,04 | 0,39  | 0,00                           | 0,00                          | 0,00 |
| Материал железосодержащий для агломерации   | 56,60                     | 2,78  | 2,45             | 1,27  | 0,23 | 1,58  | 2,21                           | 0,48                          | 0,22 |
| Металлопродукт М-2                          | 42,00                     | 19,44 | 15,94            | 4,03  | 0,27 | 7,17  | 3,90                           | 0,32                          | 0,60 |
| Металлопродукт ТМ <sub>ст</sub>             | 60,00                     | 16,56 | 10,85            | 4,57  | 0,19 | 8,95  | 3,50                           | 0,80                          | 1,44 |
| Металлопродукт от выплеска конвертеров      | 58,00                     | 14,45 | 5,69             | 4,57  | 0,09 | 3,33  | 2,02                           | 1,23                          | 0,98 |
| Отсев железорудного агломерата              | 54,30                     | 10,52 | 4,50             | 0,77  | 0,03 | 2,80  | 2,50                           | 0,40                          | 0,19 |
| Отсев известняка                            | 0,00                      | 54,00 | 0,90             | 41,71 | 0,04 | 0,39  | 0,00                           | 0,00                          | 0,00 |
| Пыль колошниковая                           | 43,70                     | 5,17  | 5,75             | 2,02  | 0,22 | 3,28  | 2,80                           | 0,51                          | 0,32 |
| СКШ   | 29,27                     | 31,50 | 7,14             | 1,29  | 0,13 | 12,13 | 2,35                           | 2,22                          | 2,07 |
| Шлак железосодержащий                       | 65,48                     | 3,93  | 1,26             | 3,31  | 0,06 | 1,82  | 0,73                           | 0,32                          | 0,41 |
| ВКШ   | 30,12                     | 30,45 | 6,67             | 1,30  | 0,19 | 12,12 | 1,30                           | 2,41                          | 2,14 |
| Шламы накопительных емкостей аглоцеха       | 45,00                     | 6,00  | 7,00             | 3,50  | 0,15 | 3,00  | 3,70                           | 0,25                          | 0,74 |
| Шлак ВОС                                    | 7,00                      | 49,26 | 16,33            | 0,78  | 0,26 | 8,15  | 15,20                          | 0,10                          | 0,23 |

Для оценки влияния структуры шлака на показатели аглопроцесса при проведении серии лабораторных спеканий на базе ОАО «ВГОК» был использован шлак ВОС: а) со стабилизированной структурой; б) с частично распавшейся структурой; в) с распавшейся структурой (рисунок 10).

Отбор проб для спеканий был произведен пробоотборниками из жидкого шлака ВОС.



а - стабилизированный; б - частично распавшийся; в - распавшийся  
Рисунок 10 - Образцы шлаков

При подготовке к лабораторным спеканиям, материал дробили до фр. 0-3 мм, поэтому структурное состояние шлака ВОС не оказало влияние на показатели аглопроцесса.

Стабилизированная структура шлака имеет важное значение для осуществления транспортировки этого материала до потребителя.

На основании серии проведенных лабораторных спеканий было показано, что привлечение шлаков участка ВОС в шихту для производства агломерата (железофлюса) в качестве флюса и связующего вещества возможно и целесообразно. Прогнозируется повышение механической прочности железофлюса и ожидается снижение расхода кокса на спекание на  $\geq 5,0$  отн. %. Привлечение шлаков участка ВОС было рекомендовано к промышленным испытаниям.

**В четвертой главе** описаны результаты опытно-промышленных испытаний по использованию шлака ВОС в шихте железофлюса ОАО «ВГОК».

В соответствии с совместной (АО «ЕВРАЗ НТМК» – ОАО «ВГОК») программой работ для шлака ВОС была разработана и утверждена нормативно-техническая документация – технические соглашения, был присвоен номенклатурный номер, и со шлакового двора конвертерного цеха осуществлена погрузка (рисунок 11) и поставка материала в Лебяжинский аглоцех ОАО «ВГОК».

Присутствие во внепечном шлаке значительного количества магнитных металлических включений не позволило его использовать в аглошихте через тракт подачи сырого известняка, где используется молотковая дробилка.

По разработанной технологии шлак ВОС использовали в шихту железофлюса в виде смеси со стальным конвертерным шлаком (СКШ) и ванадийсодержащим конвертерным шлаком (ВКШ), которые дробятся щековой дробилкой.

Смесь шлаков привлекалась в состав шихты с условием полного замещения известняка, без изменения основности железофлюса.

При использовании в составе аглошихты шлака ВОС в смеси с ВКШ/СКШ были получены следующие фактические результаты:

- из аглошихты был полностью выведен сырой известняк;
- снижен расход кокса на 7,5 кг/т железофлюса;
- удельная производительность агломашин увеличилась на 6,3 %;





Рисунок 11 – Погрузка шлака ВОС со шлакового двора конвертерного цеха АО «ЕВРАЗ НТМК» в ж/д транспорт перед отправкой в ОАО «ВГОК»

- показатель прочности  $B_{+5 \text{ мм}}$  увеличился на 0,4 абс. %;
- показатели  $B_{-0,5 \text{ мм}}$  и содержание фр.  $-5 \text{ мм}$  остались на прежнем уровне;
- повышено содержание  $V_2O_5$  в железоблюсе на 0,22 абс. %.

В результате использования опытного железоблюса в шихте доменных печей отмечено, что, по визуальной оценке, опытный материал отличался от обычного равномерностью гранулометрического состава.

В силу того, что одной из целей работы ставилось определение возможности производства агломерата с привлечением в аглошихту шлака ВОС, периоды производства опытного железоблюса и, соответственно, его использования в шихте доменных печей были крайне непродолжительны (от 8 до 30 ч). Кроме опытных паспортов, в доменной шихте в течение опытных периодов использовался базовый железоблюс. При этом стабильных изменений химического состава чугуна и шлака, связанных с использованием опытного железоблюса, не выявлено.

Конвертерные шлаки содержат около 3,0 %  $V_2O_5$ , и их плановый расход составляет около 7000 т в месяц, что привлечет в аглодоменный процесс дополнительный ванадий в объеме более 100 т в месяц, а это принесет дополнительную прибыль компании ООО «ЕвразХолдинг». Цена товарного ванадия в зависимости от колебаний рынка начинается от 300 тыс. руб. за 1 т, а в конце 2018 г. превышала 1 млн. руб. за 1 т.

В главе рассмотрены существующие (при отгрузке на отвал и на ВГОК) схемы переработки внепечных шлаков и оптимальная схема, при которой



требуется введение химических добавок на стадии внепечной обработки стали, со стабилизацией структуры шлака (рисунок 12) и модернизация шлакового двора конвертерного цеха со строительством дробильно-сортировочного участка. Благодаря этому шлаки будут полностью очищены от металловключений. Транспортировка шлака ВОС со стабилизированной структурой будет существенно облегчена, и его переработка может происходить по цепочке дробления сырого известняка.

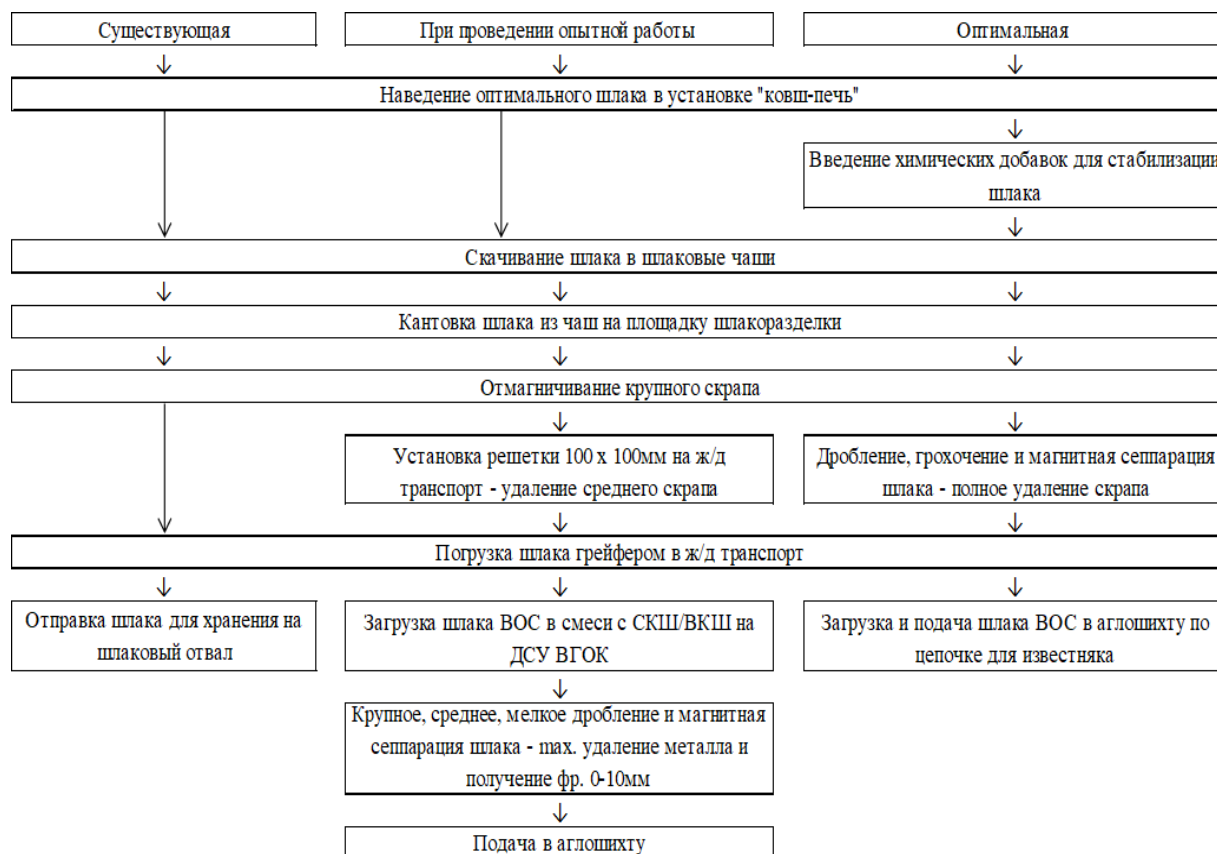


Рисунок 12 - Схемы переработки шлака ВОС

Новая технология при использовании в составе аглошихты шлака ВОС в смеси с ВКШ/СКШ позволит значительно снизить экологическую нагрузку на окружающую среду. За счет снижения объемов складирования мелкодисперсного материала на отвалах снизится аэрация шлака ВОС, загрязнение почвы и воды. За счет вяжущих свойств шлака ВОС при агломерации снизятся выбросы взвешенных частиц на участках аглоцеха.

Показатели загрязнения в ОАО «ВГОК» без использования и с использованием шлака ВОС в аглошихте представлены в таблице 8, из которых видно, что взвешенные вещества в зоне спекания агломашины, в том числе диЖелезо триоксид, железо оксид (в пересчете на железо) снижены на  $0,025 \text{ г/м}^3$ , снижено образование пыли (взвешенные вещества) в том числе аэрозоли преимущественно фиброгенного действия (кремний диоксид кристаллический при содержании в пыли 2-10 %) на  $2,4 \text{ мг/м}^3$ , а в зоне эксгаустеров этот показатель снижен на  $1,6 \text{ мг/м}^3$ . Снижен уровень углерода оксида (угарный газ, углерода окись) в зоне спекания а/машины на  $1,3 \text{ мг/м}^3$ .

Таблица 8 - Показатели замеров загрязняющих веществ в ОАО «ВГОК»

| Наименование показателя загрязнения и место проведения измерения  | Производство железоблока из базовой шихты |                        | Железоблок с использованием шлака ВОС в шихте | Δ      | ПДВ (г/м <sup>3</sup> ) / ПДК (мг/м <sup>3</sup> ) |
|---|---|------------------------|---|--------|--|
| Взвешенные вещества, в том числе диоксид железа (в пересчете на железо) в зоне спекания а/машины  | 0,189 г/м <sup>3</sup>                    |                        | 0,164 г/м <sup>3</sup>                        | -0,025 | 0,197 г/м <sup>3</sup>                             |
| Пыль (взвешенные вещества) в том числе аэрозоли преимущественно фиброгенного действия (кремний диоксид кристаллический при содержании в пыли 2-10%) | в шихтовой зоне                           | 16,3 мг/м <sup>3</sup> | 18,2 мг/м <sup>3</sup>                        | 1,9    | 4 мг/м <sup>3</sup>                                |
|   | в зоне спекания                           | 11,5 мг/м <sup>3</sup> | 9,1 мг/м <sup>3</sup>                         | -2,4   |  |
|   | в зоне эксгаустеров                       | 9,9 мг/м <sup>3</sup>  | 8,3 мг/м <sup>3</sup>                         | -1,6   |  |
| Диоксид ванадия пентаоксид, ванадий оксид в зоне спекания а/машины  | 0,37 мг/м <sup>3</sup>                    |                        | 0,38 мг/м <sup>3</sup>                        | 0,01   | 0,5 мг/м <sup>3</sup>                              |
| Углерод оксид (угарный газ, углерода окись) в зоне спекания а/машины  | 5,8 мг/м <sup>3</sup>                     |                        | 4,5 мг/м <sup>3</sup>                         | -1,3   | 20 мг/м <sup>3</sup>                               |
| Азота оксиды (в пересчете на NO <sub>2</sub> ) в зоне спекания а/машины   | 1,9 мг/м <sup>3</sup>                     |                        | 2,1 мг/м <sup>3</sup>                         | 0,2    | 5 мг/м <sup>3</sup>                                |
| Сера диоксид (сернистый ангидрид, сернистый газ) в зоне спекания а/машины   | 5,3 мг/м <sup>3</sup>                     |                        | 5,4 мг/м <sup>3</sup>                         | 0,1    | 10 мг/м <sup>3</sup>                               |

Из негативного, за счет повышенного пылеобразования нестабилизированного шлака ВОС на участке подготовки шихты (шихтовая зона), повышена концентрация пыли (взвешенные вещества) в том числе аэрозоли преимущественно фиброгенного действия (кремний диоксид кристаллический при содержании в пыли 2-10 %) на 1,9 мг/м<sup>3</sup>.

Остальные показатели, такие как, ванадий оксиды, азота оксиды, сера диоксид (сернистый ангидрид, сернистый газ) изменились незначительно.

Ввиду физической изношенности оборудования и систем аспирации аглоцеха во всех зонах наблюдается значительное превышение ПДК по пыли (взве-

шенные вещества) в том числе аэрозоли преимущественно фиброгенного действия (кремний диоксид кристаллический при содержании в пыли 2-10 %). При ПДК – не более 4 мг/м<sup>3</sup>, фактические замеры достигают 18 мг/м<sup>3</sup>, но это происходит как при базовой, так и опытной технологии.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проведен анализ литературных источников по вопросу переработки шлаков металлургического производства. Показано, что большинство металлургических шлаков перерабатывается в попутную продукцию или утилизируется в металлургических агрегатах после специальной подготовки. Исключение составляют шлаки ВОС. В настоящей работе рассмотрена утилизация шлака ВОС при производстве агломерата в качестве флюса, не требующего подготовки. Шлак ВОС может рассматриваться как недорогой и недефицитный заменитель извести в аглопроцессе, который по данным ситового анализа удовлетворяет требованиям аглопроизводства и содержит более 80 % фр. 0-3 мм.

2. Проведен петрографический анализ образцов шлака с УКП. Определено, что они содержат значительное количество фаз, обладающих вяжущими свойствами: это майенит  $\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14}\text{O}_{33}$ , ларнит  $\beta\text{-Ca}_2\text{SiO}_4$ , алит  $\text{Ca}_3\text{SiO}_5$ , что значительно повысит эффективность аглопроцесса при использовании шлака. Кроме того, установлено, что шлак ВОС близок по своему составу к известковому вяжущему – гидравлической извести, т.к. содержит значительное количество алюминатов и силикатов кальция.

3. Проведены испытания на сжатие образцов шихты железофлюса с различными вяжущими, при которых получено, что прочность смеси со шлаком ВОС превышает прочность образцов из шихты в смеси с гашеной известью в 3-4 раза. Расчетным путем установлено, что в зависимости от компонентного состава шихты и требуемой основности агломерата (железофлюса) при использовании шлака ВОС в аглошихте в объеме около 70 кг/т железофлюса возможно полное выведение сырого известняка из аглопроцесса.

4. В процессе агломерации, при использовании в составе аглошихты шлака ВОС в смеси с ВКШ/СКШ были получены следующие результаты:

- из аглошихты был полностью выведен сырой известняк;
- снижен расход кокса на 7,5 кг/т железофлюса;
- удельная производительность агломашин увеличилась на 6,3 %;
- показатель прочности  $B_{+5\text{ мм}}$  увеличился на 0,4 абс. %;
- показатели  $B_{-0,5\text{ мм}}$  и содержание фр. –5 мм остались на прежнем уровне;
- повышено содержание  $V_2O_5$  в железофлюсе на 0,22 абс. %.

5. Разработанная технология использования в составе аглошихты шлака ВОС в смеси с ВКШ/СКШ позволит значительно снизить экологическую нагрузку на окружающую среду. За счет снижения объемов складирования на отвалах снизится аэрация шлака ВОС, загрязнение почвы и воды. Ожидаемый экономический эффект от внедрения данного мероприятия в аглодоменный передел составит 143,517 млн. руб. в год.

6. По результатам диссертационного исследования получен патент РФ.

7. Основные положения работы докладывались и обсуждались на заседании научно-технического совета «ЕВРАЗ НТМК» с принятым решением: «Рекомендовать вынесение работы для защиты на диссертационном совете».

## ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

*Статьи, опубликованные в рецензируемых научных журналах и изданиях, определённых ВАК РФ и Аттестационным советом УрФУ:*

1. Форшев, А.А. Практический результат производственной культуры в рамках бизнес-системы АО «ЕВРАЗ НТМК» и АО «ЕВРАЗ КГОК» / А.А. Форшев, **В.В. Темников**, Д.В. Черных, А.О. Митряев, О.Ю. Микрюков // Сталь. – 2020. – № 6. – С. 74–76; 0,2 п.л./0,1 п.л.

2. **Темников, В.В.** Опыт переработки шлака установки ковш–печь в АО «ЕВРАЗ НТМК» / В.В. Темников, О.Ю. Шешуков, М.А. Михеенков, А.А. Метелкин // Metallurg. – 2020. – № 6. – С. 23–26; 0,3 п.л./0,2 п.л.

**Temnikov, V.V.** Ladle-furnace-slag reprocessing at Evraz Nizhnii Tagil iron and steel works OJSC / V.V. Temnikov, O.O. Sheshukov, M.A. Mikheenkov, A.A. Metelkin // Metallurgist. – 2020. – № 64(5–6) – P. 508–513; 0,3 п.л./0,2 п.л. (Scopus).

3. **Темников, В.В.** Опыт использования шлака установки десульфурации в доменном производстве / В.В. Темников, А.А. Форшев, Е. Г. Калимулина, Л. П. Бабкин // Черные металлы. – 2020. – № 6. – С. 24–27; 0,3 п.л./0,2 п.л.

**Temnikov, V. V.** Experience in the use of a slag desulphurization unit in blast furnace production / V.V. Temnikov, A.A. Forshev, E.G. Kalimulina, L.P. Babkin // Chernye Metally. – 2020. – № 6. – P. 24–27; 0,3 п.л./0,2 п.л. (Scopus).

4. **Темников, В.В.** Использование шлака внепечной обработки стали в аглопроизводстве / В.В. Темников, О.Ю. Шешуков, М.А. Михеенков, А.А. Метелкин, А.Л. Мамонов // Проблемы черной металлургии и материаловедения. – 2020. – № 2. – С. 22–26; 0,3 п.л./0,2 п.л.

5. Зажигаев, П.А. Использование шлака внепечной обработки стали в аглопроизводстве / П.А. Зажигаев, О.Ю. Шешуков, М.А. Михеенков, А.А. Метелкин, К.В. Миронов, М.В. Савельев, А.А. Форшев, А.Л. Мамонов, **В.В. Темников** // Сталь. – 2019. – № 12. – С. 78–79; 0,15 п.л./0,1 п.л.

6. Калимулина, Е.Г. Утилизация пылей аспирации сталеплавильного производства в АО «ЕВРАЗ НТМК» / Е.Г. Калимулина, **В.В. Темников** // Черные металлы. – 2018. – № 7. – С. 38–40; 0,2 п.л./0,1 п.л.

Kalimulina, E.G. Utilization of aspiration dusts in steelmaking production at “EVRAZ NTMK” JSC / E.G. Kalimulina, **V.V. Temnikov** // Chernye Metally. – 2018. – № 7. – P. 38–40; 0,2 п.л./0,1 п.л. (Scopus).

7. **Темников, В.В.** Анализ образования и переработки металлургических отходов в АО «ЕВРАЗ НТМК» / В.В. Темников, Е.Г. Калимулина, Б.С. Тлеугабулов // Черные металлы. – 2018. – № 7. – С. 32–37; 0,4 п.л./0,2 п.л.

**Temnikov, V.V.** Analysis of formation and processing of metallurgical wastes at “EVRAZ NTMK” JSC / V.V. Temnikov, E.G. Kalimulina, B.S. Tleugabulov // *Chernye Metally*. – 2018. – № 7. – P. 32–37; 0,4 п.л./0,2 п.л. (Scopus).

*Патенты:*

8. Патент № 2722946 Российская Федерация, МПК С22В 1/16 (2006.01). Шихта для производства железорудного агломерата : № 2019127852 : заявл. 04.09.2019 : опубл. 05.06.2020 / **Темников В. В.**, Калимулина Е. Г., Зажигаев П. А. [и др.] ; заявители и патентообладатели ЕВРАЗ Нижнетагильский металлургический комбинат, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина. – 8 с.

*Другие публикации:*

9. **Темников, В.В.** Опыт переработки отходов в АО «ЕВРАЗ НТМК» / В.В. Темников // Международный металлургический саммит «Металлы и сплавы». – Екатеринбург, 2020; 0,4 п.л./0,4 п.л.

10. **Темников, В.В.** Использование шлака ВОС в аглопроизводстве / В.В. Темников // Международная научно-техническая конференция «Наилучшие доступные технологии в доменном производстве» (23–24 октября 2019 г.). – Москва : Кодекс, 2019. – С. 77–79; 0,3 п.л./0,3 п.л.

11. Зажигаев, П.А. Использование шлака внепечной обработки стали в аглопроизводстве / П.А. Зажигаев, О.Ю. Шешуков, М.А. Михеенков, А.А. Метелкин, М.В. Савельев, А.А. Форшев, **В.В. Темников** // Научно-технический прогресс в черной металлургии – 2019. Материалы IV Международной научной конференции (Череповец, 18–20 сентября 2019 г.). – Череповец : Череповец. гос. ун-т, 2019. – С. 62–66; 0,3 п.л./0,2 п.л.

12. **Темников, В.В.** Использование шлака ВОС в аглопроизводстве / В.В. Темников // IX Международный конгресс доменщиков «Металлургия чугуна. Перспективы развития до 2025 года» (Нижний Тагил, 25–27 сентября 2018). – Москва : Кодекс, 2018. – С. 57–62; 0,3 п.л./0,3 п.л.

13. **Темников, В.В.** Использование конвертерных шлаков в доменном производстве ОАО «НТМК» / В.В. Темников // Труды XXXIV международной научно-технической конференции молодых специалистов ОАО «НТМК». – 2002. – С. 19; 0,5 п.л./0,5 п.л.