

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.2.324.01,  
СОЗДАННОГО НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО  
БЮДЖЕТНОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО  
ОБРАЗОВАНИЯ «МАГНИТОГОРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМ. Г.И. НОСОВА», МИНИСТЕРСТВО НАУ-  
КИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ, ПО ДИССЕР-  
ТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № \_\_\_\_\_

решение диссертационного совета от 22.04.2025 № 9

О присуждении Закуцкой Любови Анатольевне, гражданке Российской Феде-  
рации, ученой степени кандидата технических наук.

Диссертация «Научно обоснованные технологические решения комплексного использования кремниймарганцевых руд Ниязгуловского месторождения в металлургии чёрных металлов» по специальности 2.6.2. Металлургия черных, цветных и редких металлов принята к защите 12.02.2025 г. (протокол заседания № 3) диссертационным советом 24.2.324.01, созданном на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, 455000 г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38, приказ № 714/нк от 02.11.2012 г.

Соискатель Закуцкая Любовь Анатольевна, 26 декабря 1994 года рождения.

В 2019 году с отличием окончила магистратуру в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» по направлению 22.04.02 Металлургия, профиль «Металлургия черных металлов».

В 2023 году окончила аспирантуру, направление подготовки 22.06.01 «Технологии материалов», профиль «Металлургия черных, цветных и редких металлов», при федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова».

Работает инженером-технологом в обществе с ограниченной ответственностью «Научно-техническая производственная фирма «Эталон».

Диссертация выполнена на кафедре металлургии и химических технологий в ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Министерство науки и высшего образования Российской Федерации.

Научный руководитель – доктор технических наук, доцент, Харченко Александр Сергеевич, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», заведующий кафедрой металлургии и химических технологий.

Официальные оппоненты:

Заякин Олег Вадимович, доктор технических наук, член-корреспондент РАН, ФГБУН «Институт металлургии им. академика Н.А. Ватолина Уральского отделения Российской академии наук», г. Екатеринбург, заведующий лабораторией стали и ферросплавов,

Спирин Николай Александрович, доктор технических наук, профессор, ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет им. Первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, заведующий кафедрой теплофизики и информатики, дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)», г. Челябинск, в своем положительном отзыве, подписанном Гамовым Павлом Александровичем, кандидатом технических наук, доцентом, заведующим кафедрой пирометаллургических и литейных технологий, Роциным Василием Ефимовичем, доктором технических наук, профессором, главным научным сотрудником научно-исследовательской лаборатории водородных технологий в металлургии, указали, что диссертация Закуцкой Любови Анатольевны ... «по актуальности, научной новизне, практической значимости, степени достоверности полученных результатов является законченной научно-квалификационной работой и соответствует требованиям п. 9-14 «Положения о присуждении учёных степеней», утверждённого постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842, а ее автор, Закуцкая Любовь Анатольевна, заслуживает присуждения ей ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.2. Металлургия черных, цветных и редких металлов».

Соискатель имеет 13 опубликованных работ по теме диссертации, из них 4 статьи – в рецензируемых журналах из перечня изданий, рекомендованных ВАК РФ. Сведения об опубликованных работах достоверны. Авторский вклад соискателя объемом 1,05 п.л. в опубликованных работах общим объемом 5,9 п.л. состоит в формулировании структуры работы, проведении лабораторных исследований процессов твердофазного водородного и жидкофазного карботермического восстановления кремниймарганцевых руд и промышленных экспериментов по выявлению рациональных режимов их загрузки в доменную печь в качестве промывочного материала, математической обработке данных, анализе и интерпретации результатов исследования, формулировке основных положений и выводов.

К наиболее значимым научным публикациям относятся:

1. Результаты физического моделирования загрузки лотковым устройством марганцевой руды в качестве добавки к железорудному сырью доменной плавки / А. С. Харченко, Л. А. Закуцкая, М. В. Потапова, С. К. Сibaгатуллин // Черные металлы. – 2023. – № 5. – С. 4-7.

2. Изучение поведения марганца и кремния при получении силикомарганца из бедных марганцевых руд / А. С. Харченко, М. В. Потапова, Л. А. Закуцкая [и др.] // Теория и технология металлургического производства. – 2023. – № 2(45). – С. 13-18.

3. Определение рациональной доли бедных марганцевых руд в исходной шихте при получении ферросиликомарганца / В. А. Бигеев, А. С. Харченко, М. В. Потапова, Л. А. Закуцкая [и др.] // Теория и технология металлургического производства. – 2022. – № 4(43). – С. 4-8.

4. Изучение возможности вовлечения в металлургическое производство марганецсодержащего сырья Южного Урала / Н. В. Панишев, А. С. Харченко, В. А. Бигеев, ... Л. А. Закуцкая // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2019. – № 7(230). – С. 31-37.

На диссертацию и автореферат поступили отзывы (все отзывы положительные):

1. ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат», г. Магнитогорск, к.т.н. Павлов А. В.
2. ФГАОУ ВО НИТУ «МИСИС», г. Новотроицк, к.т.н. Братковский Е. В., к.т.н. Ганин Д. Р.

3. АО «ЕВРАЗ НТМК», г. Нижний Тагил, д.т.н. Метёлкин А. А.
4. ООО «НПВП «ТОРЭКС», г. Екатеринбург, к.т.н. Берсенев И. С.
5. ФГАО ВО «УрФУ им. первого Президента России Б. Н. Ельцина», г. Екатеринбург, д.т.н. Лавров В. В.
6. ФГБУН ИМЕТ УрО РАН, г. Екатеринбург, д.т.н. Дмитриев А. Н., к.т.н. Витькина Г. Ю., к.т.н. Алекторов Р. В.
7. ФГАОУ ВО НИТУ «МИСИС», г. Москва, к.т.н. Травянов А. Я.
8. ФГБУН ИМЕТ УрО РАН, г. Екатеринбург, д.т.н. Жучков В. И., к.т.н. Кель И. Н.
9. ФГАОУ ВО «УрФУ им. первого Президента России Б. Н. Ельцина», г. Екатеринбург, д.т.н. Шешуков О. Ю.
10. ФГАОУ ВО «НИ ТГУ», г. Томск, д.т.н. Зиатдинов М. Х.
11. ФГАОУ ВО «УрФУ им. первого Президента России Б. Н. Ельцина», г. Екатеринбург, д.т.н. Загайнов С. А.
12. ФГБОУ ВО СибГИУ, г. Новокузнецк, д.т.н. Уманский А. А., д.т.н. Протопопов Е. В.

В отзывах на автореферат содержатся следующие замечания.

1. Не указан полезный объем доменной печи, на которой были повышены технико-экономические показатели плавки и за счет чего.
2. Не указан рекомендованный состав доменной шихты с использованием кремниймарганцевой руды.
3. Не приведен полный химический состав чугуна на выпуске, хотя содержание марганца (0,4-0,6 %) указано, а содержание кремния – нет. Известно, что содержание кремния в чугуне существенно влияет на расход кокса.
4. Как изменились показатели доменной плавки после промывки горна с использованием кремниймарганцевой руды по сравнению с существующей технологией?
5. На стр. 4 Ниязгуловское месторождение ошибочно названо Ниязгуовским.
6. Возможно ли применить представленные в автореферате уравнения 1 и 2 при описании процессов, протекающих в доменных печах ЕВРАЗ НТМК, других предприятий или эти уравнение пригодны только для условий работы ПАО «ММК»?

7. Чем обусловлен выбор критериев оценки при восстановлении руды? Почему твердофазное восстановление происходило в среде  $H_2$ ?
8. Просим автора сообщить, оценивался ли сквозной выход марганца из руды в сталь (с учетом потерь в окислительном процессе)? Насколько «стоимость» легирующего марганца, поданного в доменную печь и поступившего в сталь, ниже стоимости марганца поступившего с лигатурой?
9. Просим автора сообщить, возможно ли использовать полученные закономерности загрузки и поведения марганца в доменной печи при использовании руд другого состава?
10. Просим автора сообщить, считает ли он необходимым включить подобный способ использования марганцевой руды в перечень НДТ? Если да, то какая при этом будет аргументация?
11. Как изменение температуры твердофазного восстановления влияет на выход целевого продукта с точки зрения степени восстановления марганца и кремния? Какие температурные диапазоны являются оптимальными для максимального извлечения марганца при минимальных потерях сырья и энергозатратах?
12. Какие допущения были приняты при построении математической модели загрузки кремниймарганцевой руды в доменную печь? Включена ли в математическую модель динамика изменения параметров шихты в процессе доменной плавки?
13. Какие параметры физической модели наиболее значимо влияют на результаты моделирования и почему?
14. Исследования проведены на примере руд одного месторождения (Ниязгуловское) и ориентированы на предприятие Челябинской области (ПАО «ММК»), т.е. обладают узкой географической направленностью. Возможно, требуется изучение месторождений бедных кремниймарганцевых руд страны.
15. Не представлены расчеты экономической эффективности комплексного использования кремниймарганцевой руды по сравнению с существующими схемами.

16. Основное внимание уделено использованию крупной фракции для промывки горна доменных печей, при этом вопрос утилизации и переработки мелких фракций кремниймарганцевой руды недостаточно проработан.
17. Неясно обоснование выбора температур 900 и 1100 °С при проведении твердофазного восстановления водородом.
18. Насколько обоснован выбор водорода в качестве источника восстановителя при твердофазном протекании процесса?
19. В работе рассматривается получение ферросиликомарганца при совместном использовании руд Ниязгуловского месторождения и богатого низкофосфористого марганцевого сырья. Хотелось бы знать мнение автора о возможности использования этой руды с бедными по марганцу и богатыми по фосфору рудами, которые преобладают в месторождениях Российской Федерации.
20. Коэффициент достоверности аппроксимации ( $R^2$ ) уравнения 2 (страница 10) составляет 0,60. Насколько адекватно это уравнение описывает предложенную зависимость?
21. На основании каких физико-химических закономерностей, уравнений и т.д. получены поправочные коэффициенты 1,14 для Mn, 1,3 для Si, при жидкофазном восстановлении шихты?
22. Целесообразно было бы в автореферате представить химизм изучаемых процессов, полученные составы шихты при добавлении руды Ниязгуловского месторождения, помимо составов самой руды. Это облегчило бы ознакомление с представленной информацией по проведенным исследованиям.
23. Указанные в автореферате пункты научной новизны достаточно полно отражают прикладной эффект от предлагаемых технологических решений, однако не раскрывают научного вклада в работу.
24. Актуальность исследования марганецсодержащих руд в доменном производстве, наряду с отмеченной в автореферате, также заключается в положительном влиянии повышенного содержания марганца в чугуна при дальнейшем переделе его в сталь.
25. Нет объяснения отличия фактического содержания Si и Mn в ферросиликомарганце от их значений в действующем стандарте.

26. В качестве замечания по содержанию автореферата следует отметить отсутствие данных о гранулометрическом составе марганцевой руды. Это не позволяет в полной мере оценить представительность данных о промышленных испытаниях.
27. На странице 10 автореферата приводятся данные о вводе поправочных коэффициентов для марганца и кремния с целью адаптации результатов лабораторных испытаний к промышленным условиям и приводится величина указанных поправочных коэффициентов, составляющих 1,14 и 1,3 для марганца и кремния соответственно. При этом информация о методике определения величин таких коэффициентов в автореферате отсутствует.
28. Автором на основании результатов физического и математического моделирования получены уравнения регрессии, описывающие долю кремниймарганцевой руды, поступающей на порядковую станцию лотка загрузочного устройства доменной печи (уравнения на стр.10 автореферата). При этом отсутствуют данные о проверке адекватности указанных уравнений промышленным условиям; приведенные коэффициенты детерминации отражают лишь насколько математически точно полученные уравнения описывают взаимосвязи рассмотренных параметров в лабораторных условиях.
29. В автореферате отсутствует обоснование граничной крупности 20 мм, отделяющей применение руды в качестве промывочного материала от ее использования в качестве сырья для производства ферросиликомарганца.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновываются их известными систематическими исследованиями и научными работами, опубликованными в высокорейтинговых рецензируемых журналах по проблемам диссертационного исследования в области теории и практики доменного и ферросплавного производства, в том числе анализу хода процессов в горне печи, связанных с движением жидких продуктов плавки через слой кокса, математического и физического моделирования процессов твердофазного и жидкофазного восстановления, теплообмена, газодинамики и плавления, исследованию процесса производства ферросплавов из комплексных руд, применению водорода при переработке железомарганцевых руд.

**Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:**

**разработана** концепция комплексного использования бедной кремниймарганцевой руды Ниязгуловского месторождения, обеспечивающая эффективную промывку горна доменной печи за счет новых принципов распределения кремниймарганцевой руды в колошниковом пространстве доменной печи на основе локальной загрузки ее в рудный гребень, периферийную или осевую зоны печи, в зависимости от горячей прочности кокса по CSR, и импортозамещение при производстве ферросиликомарганца за счет формирования рациональных составов шихт;

**предложен** эффективный подход к расширению сырьевой базы металлургических предприятий Российской Федерации комплексным использованием бедных кремниймарганцевых руд Ниязгуловского месторождения при производстве металла;

**доказана** перспективность применения в практике работы доменных печей установленного влияния локального размещения кремниймарганцевой руды в колошниковом пространстве печи на эффективность промывки в зависимости от горячей прочности кокса по CSR;

**введены** в научную практику поправочные коэффициенты, позволяющие адаптировать результаты лабораторных испытаний к промышленным условиям, основываясь на различии химического состава ферросплава, полученного в промышленных и лабораторных условиях. Для марганца и кремния их величины составили соответственно 1,14 и 1,3.

**Теоретическая значимость исследований обоснована тем, что:**

**доказан** вклад в развитие теории локального воздействия промывочных материалов на движение жидких расплавов через коксовую насадку в горне доменной печи. На доменных печах №№ 6 и 10 ПАО «ММК» достигнуто повышение производительности в среднем на 0,48 % и снижение удельного расхода кокса в среднем на 0,43 % на каждые 10 кг/т чугуна кремниймарганцевой руды в интервале 21,4-40,6 кг/т чугуна.

**применительно к проблематике диссертации результативно** (эффективно, то есть с получением обладающих новизной результатов) **использованы:** статистический анализ, методы планирования эксперимента с получением результатов, обладающих новизной, в том числе зависимости, описывающие характер движения

кремниймарганцевой руды в объеме шихты, поступающей в колошниковое пространство доменной печи из лоткового загрузочного устройства;

**раскрыт** и выявлен вклад в решение проблемы, связанной с технологическим суверенитетом металлургической отрасли Российской Федерации, путём комплексного использования кремниймарганцевых руд, обеспечивающего вовлечение в процесс переработки всех разновидностей их составляющих по крупности;

**изложены** доказательства эффективности применения кремниймарганцевой руды, в качестве промывочного материал при проведении доменной плавки, за счёт удаления спели и мелочи кокса и высокоосновных составляющих из горна, с внедрением результатов; изложены доказательства технологии производства ферросиликомарганца, соответствующего ГОСТ 4759-91, частичной заменой богатого марганцевого концентрата бедной кремниймарганцевой рудой, и получения ферросиликомарганца с содержанием марганца и кремния 41,8 и 22,6 %, 44,9 и 20,5 % соответственно при полной замене богатого концентрата на сырую кремниймарганцевую руду и предварительно восстановленную в среде водорода;

**изучены** химический и фазовый состав бедной кремниймарганцевой руды Ниязгуловского месторождения в исходном состоянии и после восстановления ее в среде водорода при температуре 1100 °С. В исходной руде марганец в основном находился в форме браунита  $(\text{Mn}^{+2}\text{Mn}^{+3})\text{SiO}_{12}$  с подчиненными количествами родохрозита  $\text{MnCO}_3$  и пьмонтита  $\text{Ca}_2\text{MnAl}_2(\text{SiO}_4)(\text{Si}_2\text{O}_7)\text{O}(\text{OH})$ , а железо – в виде гематита  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . Вмещающая порода была представлена в основном кварцем  $\text{SiO}_2$ . В восстановленной в среде водорода руде марганец находился в составе марганецсодержащих фаз оксида марганца (II)  $\text{MnO}$ , силиката марганца  $\text{Mn}_2\text{SiO}_4$ , а также смешанных силикатов марганца-железа  $(\text{Fe},\text{Mn})_2\text{SiO}_4$  и марганца-алюминия  $\text{Mn}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3$ ;

**проведена модернизация** существующих математических моделей загрузки, уточнением их закономерностями движения кремниймарганцевой руды по ходу выгрузки ее в смеси с железорудным сырьем в колошниковое пространство печи.

**Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что: разработаны и внедрены** в ПАО «ММК» рациональные режимы загрузки кремниймарганцевой руды Ниязгуловского месторождения, обеспечивающие эффективную промывку горна доменной печи от спели, ме-

лочи кокса и высокоосновных составляющих в зависимости от горячей прочности кокса по CSR;

**определены** пределы содержания бедной кремниймарганцевой руды Ниязгуловского месторождения в составе шихты для производства ферросиликомарганца, соответствующего ГОСТ 4756-91. Доля кремниймарганцевой руды Ниязгуловского месторождения, равная 30-50 % от массы шихты, позволяет получить металл с содержанием марганца в интервале 60,6-67,6 % и кремния 15,9-19,8 %;

**созданы** научные и технологические основы комплексного использования бедных кремниймарганцевых руд, обеспечивающие вовлечение в процесс переработки всех разновидностей их составляющих по крупности;

**представлены** рекомендации по совершенствованию технологии загрузки кремниймарганцевой руды в доменные печи в зависимости от горячей прочности кокса по CSR:

- в зону с повышенной рудной нагрузкой, если горячая прочность кокса более 40 %;
- в различные зоны, если горячая прочность кокса менее 40 %:
- а) в зону с пониженной рудной нагрузкой при уменьшении более чем на 0,5 %, абс.;
- б) в зону с повышенной рудной нагрузкой при увеличении более чем на 0,5 %, абс.;
- в) в среду агломерата при варьировании горячей прочности кокса в интервале  $\pm 0,5$  %, абс.

#### **Оценка достоверности результатов исследования выявила:**

**эксперименты** проведены с использованием автоматизированного комплекса физико-химических исследований фирмы LECO, (фирма R.V. AUTOMAZIONE s.r.l., Италия), химический состав кремниймарганцевой руды и ферросиликомарганца, полученного в лабораторных условиях, определяли на рентгенофлуоресцентном энергодисперсионном спектрометре ARL QUANT'X компании Thermo Scientific, фазовый состав исследовали методами рентгеноструктурного анализа на приборе «SHIMADZU XRD-7000» и термического анализа на синхронном термоаналитическом приборе STA (Jupiter 449 F3) фирмы NETZSCH.

**теория** диссертационной работы построена на базе современных достижений в области изучения теории формирования зернистого слоя шихты, движения газового потока, жидкостей, горения топлива, плавления и шлакообразования, теплопередачи, массообмена, кристаллизации;

**идеи базируются** на фундаментальных положениях теории и практики получения чугуна и ферросиликомарганца, не противоречат результатам, представленным в независимых источниках;

**использованы** сравнения полученных автором данных с данными, представленными в независимых научных источниках;

**установлено** качественное совпадение результатов математического моделирования с экспериментальными данными, полученными в результате проведенных исследований;

**использованы** современные методики сбора и обработки исходной информации компьютерным способом с применением современного программного обеспечения, измерительные приборы и пакеты прикладных программ (ARL Quant'X WinTrace-based Analytical Software, Proteus (NETZSCH Analyzing & Testing)), обширный литературный материал.

**Личный вклад соискателя состоит** в формулировании структуры работы, проведении лабораторных исследований процессов твердофазного водородного и жидкофазного карботермического восстановления кремниймарганцевых руд и промышленных экспериментов по выявлению рациональных режимов их загрузки в доменную печь в качестве промывочного материала, математической обработке данных, анализе и интерпретации результатов исследования, формулировке основных положений и выводов, обобщении их в форме диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук.

**В ходе защиты диссертации были высказаны следующие критические замечания. В отзыве ведущей организации:**

1. Неясны причины использования лабораторной установки фирмы «Leco» в процессе проведения исследований по восстановлению кремниймарганцевой руды в среде водорода в ручном режиме. Представляется интересным результаты согласно стандартному протоколу, которые доступны в автоматическом режиме работы устройства.
2. В литературном обзоре диссертации (глава 1) не раскрыта информация об использовании некондиционных марганцевых руд за рубежом, в частности в Китае, Индии, Украине, Казахстане.

3. Диссертация явно перегружена сведениями в виде 47 таблиц, содержащих большое количество разнообразных параметров и результатов. При этом в диссертации много картинок, не несущих никакой информации: внешний вид печи «Лесо», внешний вид и разрез стандартной индукционной печи, внешний вид обычных тиглей, внешний вид руды, вид окатышей, столов, на которых разложены листы бумаги с навесками шихтовых материалов. В то же время нет фотографий микроструктур, образующихся в процессах восстановления фаз, мало графиков. Необходимо отметить, что автор должен обрабатывать материал с целью его визуализации и представлять результаты в удобном для читателя виде – в виде уравнений, графиков или диаграмм.
4. Фрагмент исследований по предварительному восстановлению железа и марганца водородом в диссертационной работе не вписывается в технологический процесс производства чугуна и вряд ли вообще имеет смысл в этой работе.

**В отзыве официального оппонента О. В. Заякина:**

1. В доменной печи оксиды марганца могут образовывать силикатные соединения видов: родонит, тефроит, кнебелит. Необходимо пояснить механизм их воздействия на промывку горна доменной печи. Какой из этих силикатов сильнее действует на очистку от спели, а какой – от высокоосновных соединений?
2. При применении марганцевой руды в доменной печи следует учитывать сквозное влияние всех вносимых элементов: марганца, кремния и вредных примесей на состав и качество металла с учетом последующих переделов.
3. Необходимо рассчитать сквозную степень извлечения марганца в металл.
4. На большинстве металлургических предприятий, особенно использующих в дутье ПУТ, горячая прочность по CSR существенно превышает характеристики исследуемых в работе материалов, применимых исключительно для условий ПАО «ММК». Возможно ли обеспечить применимость полученных в работе результатов для других металлургических предприятий?
5. В чем причина разнонаправленного изменения показателей дренажа горна?
6. На страницах 96 диссертации и 15 автореферата указано, что использование в процессе жидкофазного восстановления кремниймарганцевой руды, предварительно восстановленной в среде водорода при температуре 1100 °С, позволит сэкономить 46,5 и 160,5 кг кокса на 1 тонну руды. Чем обусловлено различие в

экономии кокса? Можно ли рекомендовать предприятиям промышленное внедрение установок по предварительному восстановлению элементов марганцевой руды водородом, на основе полученных в работе результатов?

7. Результаты и выводы, представленные в работе, относятся к кремниймарганцевым рудам Ниязгуловского месторождения. Необходимо уточнить возможность использования полученных результатов для марганцевых руд других месторождений в зависимости от разнообразия их химического и минералогического составов.

**В отзыве официального оппонента Н. А. Спирина:**

1. В таблице 1.3 показана исключительная нестабильность состава кремниймарганцевых руд Ниязгуловского месторождения: содержание Mn и SiO<sub>2</sub> изменяется в 2-3 и более раз. В дальнейших исследованиях эта проблема автором даже не обсуждается.
2. В работе прослеживается связь между показателями дренажной способности горна и локальной зоной доменной печи (периферия, рудный гребень или осевая), имеющей затруднение при движении продуктов плавки через слой кокса. Опираясь на эти результаты, определяется режим загрузки кремниймарганцевой руды в колошниковое пространство печи. При этом изменение режима загрузки осуществляют исходя из величины горячей прочности кокса по CSR. Таким образом, автор работы заранее предполагает, что причиной ухудшения дренажа горна является низкая величина CSR кокса, притом, что причины могут быть различны. Например, ухудшение условий фильтрации жидких продуктов плавки через слой кокса может быть следствием использования в шихте коксовой фракции, неполное ее расходование до горизонта фурм и загромождение насадки в горне мелочью.
3. Для расчета вязкости шлака используется степень приближения фактического коэффициента распределения серы между чугуном и шлаком к его равновесному значению (3.1) и дана ссылка [136] на книгу Куликова И. С. В данной книге такой формулы рецензент не нашел. Отсутствует обоснование и выбор численного значения K – коэффициент, учитывающий условия работы печи. Чем объясняется невозможность использования обоснованного и широко ис-

пользуемого и надежного метода расчета вязкости шлака с использованием шлаковых диаграмм.

4. Уравнения 3.6-3.10 в диссертации, полученные в результате проведения физического моделирования на установке бесконусного загрузочного устройства, были применены при проведении промышленных экспериментах на доменных печах ПАО «ММК» для выявления рациональных режимов загрузки кремний-марганцевой руды на поверхность засыпи. Чем обоснована сходимость результатов лабораторного и промышленного экспериментов?
5. В таблицах с 3.2 по 3.19 представлены усредненные данные работы доменной печи № 6, а в таблицах с 3.20 по 3.25 - № 10 в исследуемые периоды. Во всех таблицах без исключения указано на загрузку конвертерного шлака. Известно, что ввод конвертерного шлака в доменную шихту без корректировки режимных параметров работы нецелесообразен, так как существенно ухудшает показатели работы доменной печи. Ввод в шихту доменных печей конвертерного шлака можно производить для повышения концентрации магнезии и монооксида марганца в шлаке и использовать его в качестве основного флюса. Использование конвертерного шлака позволяет увеличить расход неофлюсованных окатышей без изменения основности агломерата, стабилизировать сход шихты в печи при искажении ее профиля без уменьшения интенсивности плавки, обеспечить «срабатывание» излишнего слоя гарнисажа. Только комплекс этих технологических мероприятий обеспечивает повышение экономичности доменной плавки.

**От членов диссертационного совета:**

1. Какие высокоосновные составляющие образуются в доменной печи и в какой ее зоне происходит их формирование?
2. Какие критерии оценки адекватности экспериментов использовались при проведении лабораторных экспериментов?
3. На основании чего была выбрана температура 1100 °С для твердофазного восстановления в среде водорода?
4. Почему не были поданы заявки на получение охранных документов по результатам интеллектуальной деятельности на разработанные технологические решения?

5. Исходя из условий потребления кремниймарганцевой руды ПАО «ММК», каким будет баланс распределения ее на промывку в доменных печах, на производство ферросиликомарганца соответствующего ГОСТ или ТУ и зеркального чугуна?
6. Какая экономическая эффективность использования кремниймарганцевой руды в металлургии черных металлов, исходя из количества запасов данного сырья?
7. Как оценивалась эффективность промывки горна доменной печи в период проведения промышленных исследований в ПАО «ММК»?
8. Для каких шихтовых условий был получен поправочный коэффициент при проведении жидкофазного восстановления в лабораторной печи?

**Соискатель Закуцкая Л. А. ответила на задаваемые ей в ходе заседания вопросы и привела собственную аргументацию.**

В работе рассматривали эффективное использование кремниймарганцевой руды фракции 20-40 мм в качестве промывочного материала доменных печей ПАО «ММК» для улучшения дренажа продуктов плавки в горне по межкусковым пустотам кокса к лёткам. Содержащийся в ней марганец обеспечивает очистку горна от спели и мелочи кокса, а кремнезём – от тугоплавких высокоосновных составляющих, таких как ларнит и ранкенил. Фракцию менее 20 мм предложено использовать в составе шихты для производства ферросиликомарганца частичной или полной заменой импортного богатого марганцевого концентрата.

Потребность ПАО «ММК» в кремниймарганцевой руде фракции 20-40 мм составляет около 150 тыс. тон в год. При её добыче и подготовке образуется около 15 тыс. тон фракции менее 20 мм. Такое количество позволяет производить около 15 тыс. тон в год ферросиликомарганца, соответствующего ГОСТ, для условий использования ее в составе шихты с долей 30 %, или около 5 тыс. тон в год ферросиликомарганца, соответствующего техническим условиям, или порядка 5 тыс. тон в год зеркального чугуна при формировании шихты полностью из кремниймарганцевой руды.

В рамках диссертационного исследования разработаны принципы локальной загрузки кремниймарганцевой руды на поверхность засыпи колошникового пространства доменных печей, основанные на закономерностях поступления шихтовых

материалов из бункера бесконусного загрузочного устройства в его распределительный лоток и на особенностях движения жидких расплавов через слой кокса в горне. Внедрение их позволило повысить производительность печей в среднем на 0,48 % и снизить удельный расход кокса в среднем на 0,43 % на каждые 10 кг/т чугуна кремниймарганцевой руды для условий работы доменных печей №№ 6 и 10 ПАО «ММК» полезным объемом соответственно 1370 и 2014 м<sup>3</sup>.

Существенное влияние на распределение руды по локальным кольцевым зонам поперечного сечения печи оказывает ее последовательность загрузки в бункер бесконусного загрузочного устройства и выбор станций углового положения лотка для выгрузки содержимого бункера. При проведении физического моделирования и построении модели использовали усредненные результаты распределения руды по ходу выпуска для различных шихтовых условий, ввиду малого различия значений выходного параметра от расхода руды и доли окатышей в массе железорудного сырья, в связи с чем, в модели отсутствует динамика изменения параметров шихты в процессе доменной плавки. Применение полученных уравнений возможно для доменных печей различных предприятий при адаптации к условиям их работы.

Соблюдением равенства критерия Ньютона оценивали адекватность полученных уравнений промышленным условиям для реальной печи и модели при физическом моделировании, на загрузочном устройстве, изготовленном в масштабе 1:5 по отношению к размерам реальных загрузочных устройств, установленных на доменных печах ПАО «ММК».

Эффективность промывки горна доменных печей оценивали по изменению производительности и удельного расхода кокса. При этом дренажную способность горна в локальных зонах характеризовали комплексом показателей: «количество, остающегося в горне шлака после выпуска жидких продуктов плавки» и «вязкость шлака по степени приближения фактического коэффициента распределения серы между чугуном и шлаком к его равновесному значению» для зоны с повышенной рудной нагрузкой, «степень приближения фактического содержания углерода в чугуне к равновесной величине» для осевой зоны и «индекс DMI» для периферийной части печи.

Показатель дренажа горна «степень приближения фактического коэффициента распределения серы между чугуном и шлаком к его равновесному значению» ха-

рактирует вязкость шлака с учетом наличия твёрдых включений в расплаве (мелочь кокса, спель и др.), содержания в доменном шлаке различных оксидов, в том числе  $MnO$ , которые не учитываются в шлаковых диаграммах доменного производства.

Численное значение  $K$ , используемое в формуле для расчета вязкости по степени приближения фактического коэффициента распределения серы между чугуном и шлаком к его равновесному значению, определяли на основе результатов работы печей №№ 6 и 10 ПАО «ММК» за предшествующие исследованию 6 месяцев, используя данные о химическом составе жидких продуктов плавки и параметрах дутья.

Выполненные исследования показали, что локальную зону горна, требующую промывку, определяет в основном величина горячей прочности кокса по CSR. При CSR более 40 % кремниймарганцевую руду необходимо загружать в зону с повышенной рудной нагрузкой, при CSR менее 40 % в различные зоны по вариантам: в зону с повышенной рудной нагрузкой, пониженной рудной нагрузкой и равномерно по сечению.

Ввод в состав шихты кремниймарганцевой руды позволял использовать конвертерный шлак, имеющий повышенные величины основности и содержания  $MgO$ . При этом доведение концентрации оксида магния в шлаке до рациональных величин обеспечивало снижение его вязкости и способствовало повышению экономичности доменной плавки.

Для повышения эффективности извлечения марганца из кремниймарганцевой руды при производстве ферросиликомарганца провели предварительное твердофазное восстановление в среде водорода на лабораторной установке фирмы «LECO» в специальном режиме, обеспечивающем достижение поставленной задачи для существующих параметров процесса.

Выполненный термодинамический расчет показал, что температура 900 °C обеспечивает полное восстановление железа из его оксидов. Однако, значительной металлизации железа при данной температуре не наблюдали. Восстановление до металлической фазы стало возможным при повышении температуры до 1100 °C, что позволило повысить эффективность извлечения марганца на 5,2 %. Дальнейшее повышение температуры нецелесообразно, так как приводит к размягчению материала.

Экономия, равная 46,5 кг кокса на тонну руды, полученная в результате жидкофазного восстановления предварительно восстановленной в среде водорода кремниймарганцевой руды, дает основание рекомендовать такую составляющую технологии к внедрению в условиях развития водородной энергетики и повышенной экологичности металлургического процесса.

В связи с тем, что лабораторная индукционная печь отличается от промышленного агрегата меньшим объемом выплавляемого металла и большими удельными потерями тепла, получали ферросиликомарганец, который не соответствовал по содержанию марганца и кремния значениям, установленным ГОСТ. Для адаптации результатов лабораторных испытаний к промышленным условиям выявили поправочные коэффициенты. Они получились равными 1,14 для марганца и 1,3 для кремния.

Для использования при производстве ферросиликомарганца руды, являющейся бедной по марганцу и богатой по фосфору, необходимо дополнительно рассматривать технологии плавки, включающие дефосфорацию марганцевых расплавов. Переход на руды с другим составом по марганцу и железу будет влиять на эффективность промывки и изменит долю руды в составе шихты для производства ферросиликомарганца.

Сквозное извлечение марганца в металл по предлагаемой схеме составит 7,6-13,5 %. При этом сквозная эффективность использования марганца будет значительно выше за счет роли марганца в промывке горна, проявляясь как экономия кокса и рост производительности печей, достигаемые применением выявленных рациональных режимов загрузки руды, содержащей марганец.

На заседании 22.04.2025 г. диссертационный совет принял решение присудить Закуцкой Любови Анатольевне ученую степень кандидата технических наук за разработку научно обоснованных технологических решений комплексного использования бедных кремниймарганцевых руд Ниязгуловского месторождения в металлургии черных металлов, которые обеспечивают увеличение производительности доменных печей и снижение удельного расхода кокса за счет повышения эффективности промывки горна от спели и мелочи кокса, а также расширяют сырьевую базу металлургических предприятий РФ для производства востребованного ферросиликомарганца. Разработанные решения имеют существенное значение для развития металлургической отрасли страны.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 18 человек, из них 7 докторов наук по специальности 2.6.2. Metallургия черных, цветных и редких металлов, участвовавших в заседании, из 21 человека, входящих в состав совета, проголосовали: за 18, против нет, недействительных бюллетеней нет.

Председатель диссертационного совета:



Валерий Михайлович  
Колокольцев

Ученый секретарь диссертационного  
совета

Игорь Юрьевич  
Мезин

22.04.2025