

На правах рукописи



Феоктистов Андрей Владимирович

**РАЗВИТИЕ ТЕОРИИ ТЕПЛОВОЙ РАБОТЫ И
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОСНОВ РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЯ
В ТВЕРДОТОПЛИВНЫХ НИЗКОШАХТНЫХ ПЕЧАХ**

Специальность

05.14.04 – Промышленная теплоэнергетика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Красноярск – 2016

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Сибирский государственный индустриальный университет» на кафедре теплоэнергетики и экологии

Научный консультант: доктор технических наук, профессор
Скуратов Александр Петрович

Официальные оппоненты:

Султангузин Ильдар Айдарович, доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ», кафедра промышленных теплоэнергетических систем, профессор, г. Москва

Спирин Николай Александрович, доктор технических наук, профессор, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», кафедра теплофизики и информатики в металлургии, заведующий кафедрой, г. Екатеринбург

Богомоллов Александр Романович, доктор технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук», лаборатория проблем тепломассопереноса, ведущий научный сотрудник, г. Новосибирск

Ведущая организация:

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», г. Иваново

Защита диссертации состоится « 7 » декабря 2016 г. в 14:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.099.07 при ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» по адресу: 660074, г. Красноярск, ул. Ленина, 70, ауд. 204.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» <http://www.sfu-kras.ru>

Автореферат разослан «___» _____ 2016 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Сизганова Евгения Юрьевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Шахтные печи представляют собой группу тепловых аппаратов, входящих в существующее в настоящее время многообразие тепловых устройств. Они получили широкое распространение во многих отраслях современной промышленности. Применяются для обжига извести и руд, восстановительной плавки металлов, плавления чугуна и получения оксидных и силикатных расплавов. Шахтные печи перспективны, по сравнению с другими конструкциями печей аналогичного назначения имеют ряд конкурентных преимуществ, к которым обычно относят экономичность, низкие удельные расходы топлива, глубокую утилизацию тепла отходящих газов, относительную простоту конструкции и др. Отдельную группу шахтных печей составляют малые шахтные (низкошахтные) печи, типичными представителями которых являются литейные вагранки для переплава чугуна (в современной структуре металлургического и машиностроительного комплекса России на долю производства чугунных отливок приходится до 60 % ваграночного чугуна), кислородные вагранки для осуществления процесса Окси-Кап (Оху-Суп), вагранки для плавки силикатных материалов, базальтовых пород, шлаков и др.

Традиционным топливом для шахтных плавильных печей является металлургический кокс. Доля коксовых вагранок, находящихся в эксплуатации, достигает 98 %, а удельный расход кокса составляет 80 – 140 кг/т расплава. При этом стоимость кокса составляет 50 % от себестоимости производимой продукции.

Стратегическими задачами совершенствования конструкций низкошахтных печей, повышения эффективности тепловой работы и технологий плавки являются: интенсификация тепломассообменных процессов, переход на более дешевые виды топлива, уменьшение потребления энергоресурсов и вредных выбросов в атмосферу, обеспечивающие снижение себестоимости готовой продукции и, как следствие, повышение ее конкурентоспособности на отечественном и зарубежном рынках.

Развитие теории и технологии шахтной плавки реализуется в основном за счет углубленного изучения и уточнения основных закономерностей движения шихтовых материалов, газодинамики, тепломассопереноса на различных стадиях получения расплава. Перспективным направлением является разработка, исследование и применение комплекса мероприятий, обеспечивающих более полную реализацию скрытых резервов интенсификации тепломассообменных процессов, повышение энерго- и ресурсосбережения при получении расплавов в низкошахтных печах (НШП).

В связи с этим разработка и внедрение научно обоснованных энергоэффективных технологий плавки чугуна и силикатных материалов в твердотопливных низкошахтных печах является актуальной научной проблемой, решение которой имеет важное хозяйственное значение.

Работа выполнена в соответствии с перечнем критических технологий Российской Федерации – пункт «Технологии энергоэффективного производства и преобразования энергии на органическом топливе» и приоритетными направле-

ниями развития науки, технологий и техники Российской Федерации – пункт «Энергоэффективность, энергосбережение, ядерная энергетика», в рамках Государственного задания Министерства образования и науки, регистрационный номер 7.3909.2011. (2013 – 2016 гг.), в соответствии с планами НИР и ОКР отраслевых организаций и предприятий.

Цель и задачи диссертации

Развитие теории тепловой работы, технологических основ ресурсосбережения и повышения энергоэффективности твердотопливных низкошахтных печей на основе интенсификации тепломассообменных процессов и замены топлива с кокса на антрацит и тощие угли.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**:

1. Разработать теоретические основы сбережения энергетических ресурсов посредством замены кокса на антрацит, тощие угли и использования пылеугольного топлива при плавке чугуна и силикатных материалов в низкошахтных печах. Получить и научно обосновать основные зависимости и закономерности для расчета конструктивных, технологических и теплотехнических параметров низкошахтных печей при переходе на другие виды твердого топлива.

2. Разработать усовершенствованную комплексную детерминированную математическую модель процесса плавки материалов в низкошахтных печах, позволяющую исследовать влияние подогрева, обогащения дутья кислородом, применения пылеугольного топлива на тепловую работу печи и производить численные расчеты номограмм процессов плавки.

3. На основе теоретического анализа влияния теплотехнических параметров, особенностей теплогенерации, газодинамики и тепломассообмена на технологический процесс исследовать методы интенсификации и способы повышения эффективности плавки материалов в низкошахтных печах, разработать рекомендации по их рациональному практическому применению.

4. Разработать и сконструировать с учетом требований физического моделирования теплообменных и аэродинамических процессов, характеристик шихты, топлива, воздуходувных средств и рекуператора исследовательский полупромышленный комплекс на основе низкошахтной печи для исследования влияния различных технологических решений (подогрев, увлажнение, обогащение кислородом дутья, замена кокса, используемого в качестве топлива, на антрацит и тощие угли) на процессы теплогенерации, тепло- и массообмена в слое шихтовых материалов, показатели тепловой эффективности печи.

5. Разработать установку и методику исследования прочности твердого топлива под нагрузкой в процессе сжигания.

6. Выполнить комплексное исследование работы низкошахтной печи при замене кокса на антрацит и тощие угли в качестве топлива и установить зависимости, связывающие производительность и коэффициент полезного действия печи, температуру расплава на выходе из печи, удельный расход дутья, абсолютный и удельный расход топлива.

7. Исследовать влияние основных теплотехнических параметров работы низкошахтной печи при замене топлива и интенсификации процесса плавки на комплекс эксплуатационных свойств производимой продукции.

8. Расширить спектр конструкторско-технологических решений при замене кокса на другие виды топлива с обоснованием уровня загрузки материалов в низкошахтную печь и определением расхода дутья при его двухрядной подаче, определением основных конструкционных и технологических параметров рекуператоров, а также расхода воздуха по количеству сгоревшего топлива в единицу времени, рационального содержания кислорода в дутье.

9. Провести опытно-промышленные испытания, разработать и внедрить в производство энергоэффективные ресурсосберегающие технологии выплавки чугунов и силикатных материалов в низкошахтных печах.

Научная новизна

1. На основе теоретического анализа, с учетом требований теории подобия и натурального моделирования, научно обоснованы условия физического моделирования теплообменных и аэродинамических процессов в низкошахтных печах, а именно установлено, что температурный режим в топливной насадке и в зоне нагрева шихты не зависит от диаметра печи при условии выполнения основных соотношений между геометрическими параметрами печи (высотой топливной насадки $H_{тн}$, полезной высотой $H_{п}$, зоной подогрева $H_{пд}$ и внутренним диаметром D печи), размерами кусков топлива $\bar{d}_к$ и шихты $\bar{d}_ш$: $H_{тн} = 1,165\sqrt{D}$; $H_{п} = 4,345\sqrt{D}$; $H_{пд} = 3,18\sqrt{D}$; $\bar{d}_к = 0,081\sqrt{D}$; $\bar{d}_ш = 0,143\sqrt{D}$.

2. Разработаны научные основы сбережения энергетических ресурсов путем замены кокса на антрацит и тощие угли при плавке чугуна и силикатных материалов в низкошахтных печах, которые включают установленные и научно обоснованные новые и уточненные известные закономерности, позволяющие определять высоту кислородной зоны для слоевого сжигания твердого топлива в шахтных печах с учетом коэффициента формы кусков, высоту топливной насадки, температуру поверхности кусков твердого топлива, прогнозировать температуру расплава на выходе из печи, в частности:

– при переходе от кокса к использованию в качестве топлива антрацита или тощих углей на неподготовленной шихте высота печи уменьшается с $H_{п} = 4,345\sqrt{D}$ до $H_{п} = 3,249\sqrt{D}$;

– установлено, что высоты низкошахтных печей связаны с механикой движения шихтовых материалов к очагам горения по плоскостям скольжения, расположенным под углом внутреннего трения к горизонтальной плоскости, который для обеспечения стабильного движения шихты к очагу горения должен составлять $54 \pm 2^\circ$.

3. На основе теоретических исследований и математического моделирования выявлены особенности и установлены основные закономерности процессов сжигания пылеугольного топлива в неразрыхленном плотном слое очага горения низкошахтных печей.

4. Установлены новые закономерности влияния подогрева и увлажнения дутья на протекание основных тепломассообменных и газодинамических процессов при плавке чугуна и силикатных материалов в низкошахтных печах, при использовании антрацита и тощих углей в качестве топлива.

5. По результатам анализа данных, полученных при математическом моделировании и промышленных экспериментах, установлены и научно обоснованы новые закономерности влияния обогащения дутья кислородом на температуры расплава, отходящих газов и содержание в них CO_2 и CO .

6. Установлены закономерности влияния основных технологических и теплотехнических параметров плавки в низкошахтных печах при использовании в качестве топлива антрацита и тощих углей на химический состав, комплекс литейных и механических свойств чугуна, подтверждена возможность получения продукции заданного уровня качества.

Практическая значимость работы

Разработаны и внедрены в производство ресурсосберегающие энергоэффективные технологии плавки чугуна и силикатных материалов в твердотопливных низкошахтных печах, основанные на замене кокса другими видами топлива и обогащении дутья кислородом.

Для практического использования разработаны новые: способы плавки чугуна и оксидных материалов (пат. № № 2350659, 2378388, 2407804, 2394106), конструкции рекуператоров с улучшенными эксплуатационными и технико-экономическими характеристиками (пат. № № 89682, 89683, 89684, 99135), способ определения и лабораторная установка для исследования прочности твердого топлива, определяемой под нагрузкой в процессе сжигания, позволяющей воспроизвести технологические условия в период плавки в шахтной печи (пат. № № 2438124, 96963, 99616, 106953, 102386), питатель пневмотранспорта мелкодисперсных материалов (пат. № 150948).

Для проведения комплексных, многофакторных исследований процессов шахтной плавки создан исследовательский полупромышленный комплекс на основе низкошахтной печи, оснащенный устройствами для подогрева дутья, воздуходушными средствами, контрольно-измерительной аналогово-цифровой аппаратурой.

Разработана новая методика для аттестации топлив, используемых в низкошахтных печах, основанная на определении относительной прочности топлива при сжигании под нагрузкой.

Разработана усовершенствованная комплексная детерминированная математическая модель процесса плавки материалов в низкошахтных печах, позволяющая исследовать влияние подогрева, обогащения дутья кислородом, применения пылеугольного топлива на тепловую работу печи и производить численные расчеты номограмм процессов плавки.

Разработана серия номограмм процесса шахтной плавки для определения производительности печи, температуры расплава на выходе из печи, удельного расхода дутья, расхода твердого топлива от 10 до 20 % при концентрациях кислорода в дутье более 21 % и подогреве дутья более 27 °С.

Получены основные соотношения, зависимости и закономерности для осуществления инженерных расчетов конструктивных, технологических и теплотехнических параметров низкошахтных печей при переходе с кокса на другие виды твердого топлива.

Реализация результатов

Внедрение результатов исследований проводили на ООО «Изолит-НК» (г. Новокузнецк); АО «Завод Универсал» (г. Новокузнецк); ЗАО «Гурьевский металлургический завод» (г. Гурьевск), АО «ЕВРАЗ – Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат» (г. Новокузнецк). Внедрение результатов работы в производство подтверждается соответствующими актами и справками о внедрении.

Предмет защиты

На защиту выносятся:

1. Основные направления повышения энергоэффективности, ресурсосбережения и интенсификации плавки чугуна и силикатных материалов в низкошахтных печах.
2. Результаты теоретического анализа условий подобия физического моделирования теплообменных и аэродинамических процессов и полученные зависимости между основными геометрическими параметрами низкошахтных печей.
3. Результаты экспериментальных исследований влияния различных технологических (подогрев, увлажнение, обогащение кислородом дутья, замена кокса на антрацит и тощие угли) и конструктивных решений на процессы теплогенерации, тепло- и массообмена в слое шихтовых материалов, показатели тепловой эффективности печи.
4. Методика аттестации различных видов топлива для низкошахтных печей, их количественных соотношений и сравнения с эталонными значениями.
5. Результаты численного моделирования, использованные для построения номограмм процесса шахтной плавки, позволяющие определять температуры расплава на выпуске, производительность печи при подогреве и обогащении дутья кислородом, состав уходящих из печи дымовых газов, теплотери через стенки печи.
6. Ресурсосберегающие энергоэффективные технологии и способы интенсификации процесса шахтной плавки, внедренные в условиях промышленных предприятий, включая конструкторско-технологические решения, применяемые для подогрева и увлажнения дутья.

Объект исследования – ресурсосберегающие энергоэффективные технологии плавки материалов в твердотопливных низкошахтных печах.

Предмет исследования – тепломассообменные, газодинамические процессы и тепловая работа твердотопливной низкошахтной печи.

Методы исследований. Работа выполнена с привлечением современных методов исследования: численного и физического моделирования процесса шахтной плавки и тепловой работы печи; основ теории подобия и размерностей; термометрирования; дифференциально-термического анализа; газового анализа; измерения литейных и механических свойств сплавов.

Достоверность и обоснованность. Адекватность полученных результатов, выводов и рекомендаций основывается на: совместном использовании современных методов теоретического анализа и экспериментального исследования процессов теплообмена, горения, газообразования, механики движения материалов, протекающих в низкошахтных печах; сочетании воспроизводимых по точ-

ности методов физического и математического моделирования, качества измерений и статистической обработки результатов; применении широко распространенных и апробированных методов исследований; сопоставлении полученных результатов с данными других исследователей; высокой эффективности предложенных технологических решений, подтвержденных результатами промышленных испытаний и внедрением в производство.

Личный вклад автора заключается в постановке задач и проведении теоретических и экспериментальных исследований; разработке и компьютерной реализации усовершенствованной комплексной детерминированной математической модели процесса плавки материалов в низкошахтных печах; разработке и внедрении в производство энергоэффективных ресурсосберегающих технологий выплавки чугунов и силикатных материалов в низкошахтных печах; проведении организационно-технических мероприятий по промышленному освоению разработанных технологических процессов; обработке полученных результатов, анализе, обобщении, научном обосновании, формулировании выводов и рекомендаций.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы доложены и обсуждены на следующих научных конференциях и научных совещаниях: V Международной научно-практической конференции «Прогрессивные литейные технологии» (Москва, 2009 г.); VI Международной научно-практической конференции «Прогрессивные литейные технологии» (Москва, 2011 г.); IX Международной научно-практической конференции «Литейное производство сегодня и завтра» (Санкт-Петербург, 2012 г.); XIX Международной научно-практической конференции «Металлургия: технологии, инновации, качество» (Новокузнецк, 2015 г.); II Международной научно-практической конференции «Организационно-экономические проблемы повышения эффективности металлургического производства» (Новокузнецк, 2005 г.); Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы электрометаллургии, сварки, качества» (Новокузнецк, 2006 г.); Всероссийском научно-техническом совещании «Перспективные промышленные технологии и материалы» (Новокузнецк – Новосибирск, 2004 г.); VIII Всероссийской научно-практической конференции «Техника и технология производства теплоизоляционных материалов из минерального сырья» (Белокуриха – Бийск, 2008 г.); Всероссийской научно-практической конференции «Теория и практика литейных процессов» (Новокузнецк, 2012 г.); Всероссийской научно-практической конференции «Металлургия: новые технологии, управление, инновации и качество» (Новокузнецк, 2006, 2008, 2014 г.).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 65 печатных работ, в том числе 28 в изданиях, рекомендованных ВАК, две монографии, 14 патентов на изобретение и патентов на полезную модель, 5 свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ и базы данных.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, приложений. Изложена на 312 страницах, содержит 54 рисунка, 41 таблицу, список литературы из 312 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность решаемой проблемы, сформулированы цель и задачи исследования, изложена научная новизна и практическая значимость работы, а также приведены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе представлен критический анализ современного уровня теории тепловой работы, конструкций и особенностей технологий плавки чугуна и силикатных материалов в низкошахтных печах.

Создание основ теории теплообмена в плотном слое принадлежит ученым уральской школы теплотехники и тесно связано с профессором Б.И. Китаевым. В развитие его работ А.И. Чернятиным, Б.С. Фиалковым, Ю.Г. Ярошенко, Ю.Н. Овчинниковым исследованы закономерности движения газов и материалов в слое, Ю.Г. Ярошенко, Ф.Р. Шкляром, Д.М. Малкиным, В.С. Швыдким, Б.А. Боковиковым и др. усовершенствован математический аппарат процессов тепломассопереноса, а Я.М. Гордоном, В.Б. Щербатским, В.Я. Советкиным и Н.А. Спириным – математический аппарат газодинамических процессов.

Теории и практике плавки чугуна посвящены многочисленные работы отечественных и зарубежных теплотехников и металлургов. Теория горения топлива в слое создана усилиями Л.А. Вулиса, Д.А. Франк-Каменецкого, З.Ф. Чуханова, В.В. Померанцева, Ф. Бартльме. Вопросы газодинамики и теплообмена в зернистом слое разрабатывались З.Ф. Горбисом, М.Э. Аэровым, М.А. Гольдштиком, Л.С. Лейбензоном, применительно к доменным печам, совершенствованию доменной плавки и повышению ее эффективности – Б.И. Китаевым, Ю.Г. Ярошенко, Я.М. Гордоном, В.С. Швыдким, В.Г. Лисиенко, В.П. Тарасовым, С.А. Загайновым, С.К. Сибегатуллиным, А.В. Бородулиным, В.И. Большаковым, И.Г. Товаровским и др. Большой вклад в изучение процессов плавки чугуна в вагранках внесли Л.М. Мариенбах, В.А. Грачев, Н.А. Баринов, А.К. Юдкин, Ю.С. Сухарчук, Б.А. Носков, И.Ф. Селянин, В.И. Матюхин и др.

Низкошахтные печи выделены в отдельную группу шахтных печей. Для нее сформулированы и обоснованы характерные классификационные признаки: относительно небольшая высота столба шихтовых материалов (не более 4,5 – 5,0 м), ограниченные размеры горизонтального сечения (не более 2,0 – 3,0 м) используемого слоя, скорость движения вдуваемых газовых струй не более 75 – 80 м/с, низкая глубина физико-химических преобразований исходных материалов, относительно малая продолжительность пребывания шихты в шахте печи, как правило не более 2,5 – 3 ч. Основное назначение низкошахтных печей можно определить как плавку (расплавление) металлов, железоуглеродистых сплавов и силикатных материалов.

Развитие конструкций низкошахтных печей реализуется в направлении увеличения производительности, интенсификации процесса плавки и повышения их эффективности. Показано, что одним из основных направлений ресурсосбережения является поиск заменителей кокса для низкошахтных печей, переход на более дешевое и распространенное природное топливо, в частности антрацит, тощие угли и пылеугольное топливо.

Особую актуальность приобретают разработки новых способов и технологий эффективного ведения плавки в низкошахтных печах, обеспечивающих полную замену кокса. Критический анализ работ по поиску заменителей кокса для низкошахтных печей показывает, что наиболее привлекательным с экономической точки зрения является дешевое и распространенное природное топливо, в частности антрацит или тощие угли. В настоящее время стоимость антрацита по сравнению со стоимостью кокса (в зависимости от месторождения, марки и свойств) в 4 – 8 раз ниже, а стоимость тощих углей почти в 2 раза меньше, чем антрацита. Теплотехнические характеристики антрацита весьма высоки, его теплотворная способность выше, чем у кокса. Антрацит имеет меньшую по сравнению с коксом зольность и наибольший процент углерода из всех типов угля. Организация его подачи в печь, как правило, не требует дополнительных капитальных вложений. В то же время главной причиной ограничения его применения является склонность к растрескиванию и образованию мелких фракций в процессе нагрева. Это приводит к нарушению нормального хода плавки. Таким образом, особую актуальность приобретают разработки новых способов и технологий эффективного ведения плавки в низкошахтных печах, обеспечивающих полную замену кокса на антрацит и тощие угли, а также новой методики для аттестации топлив, используемых в низкошахтных печах, основанной на определении относительной прочности топлива при горении под нагрузкой.

При применении различных топлив или переводе печи с одного вида топлива на другой весьма важным является вопрос эффективности. Одной из наиболее совершенных в отношении оценки эффективности является теория интегрированной энерго-экологической эффективности, основанная на методе интегрированного энерго-экологического анализа, развиваемая в работах В.Г. Лисиенко.

Прогрессивным способом интенсификации и повышения эффективности плавки в низкошахтных печах является подогрев и обогащение дутья кислородом. Однако существующие конструкции рекуператоров имеют ряд недостатков, связанных с их низкой надежностью. Степень обогащения дутья кислородом для конкретных условий, параметров и конструкции низкошахтных печей имеет рациональное значение, обеспечивающее максимальную эффективность этого способа интенсификации плавки. В связи с этим такой метод интенсификаций плавки требует дальнейшей теоретической и практической проработки.

Проведенный обзор специальной технической литературы показал, что в области моделирования тепловой работы низкошахтных печей вопросы переноса и адекватности результатов плавки, полученных при физическом моделировании на лабораторных моделях низкошахтных печей, на промышленные объекты проработан не достаточно полно. Отсутствуют сведения об условиях подобия при переходе от шахтных печей малого диаметра к печам большего диаметра. Нет данных о влиянии геометрических параметров печи или их соотношений, а также размеров кусков кокса и шихты на температурный режим в топливной насадке и в зоне нагрева шихты. Необходимо продолжение работ по определению взаимосвязи между технологическими параметрами при разработке ресурсосберегающих технологий плавки чугуна и силикатных материалов в низкошахтных печах.

На основе проведенного обзора литературы и анализа современного состояния вопроса сформулированы задачи диссертационного исследования.

Во второй главе проведено теоретическое исследование особенностей физического моделирования теплообменных и газодинамических процессов в низкошахтных печах. Установлено, что геометрическое подобие выполняется четким соотношением между высотными параметрами печи и ее внутренним диаметром D :

$$\text{полезной высотой печи } H_{\text{п}} = 4,345\sqrt{D}, \quad (1)$$

$$\text{высотой топливной насадки } H_{\text{т.н}} = 1,165\sqrt{D}, \quad (2)$$

$$\text{высотой зоны подогрева } H_{\text{нд}} = 3,18\sqrt{D}. \quad (3)$$

Физические параметры дутья и газов (плотность, вязкость, теплопроводность и теплоемкость) в шахте печи любого диаметра постоянны, так как для плавки применяется твердое топливо (кокс, антрацит, тощие угли) одинакового состава, состав дутья идентичен, что ведет к выполнению условия $Pr = \text{idem}$. Установлено, что средний размер \bar{d}_k кусков кокса в топливной насадке подчиняется закономерности:

$$\bar{d}_k = 0,081\sqrt{D}, \text{ м.} \quad (4)$$

Это обеспечивает постоянство температурных условий в период плавки для низкошахтных печей любого диаметра. Постоянство основного критерия теплообмена в противотоке $\alpha_F F/W_r = \text{idem}$ (α_F – коэффициент теплообмена, F – площадь теплообмена, W_r – удельная теплоемкость потока газа) и симплекса $W_r/W_{\text{ш}} = \text{idem}$ ($W_{\text{ш}}$ – удельная теплоемкость потока шихты) для низкошахтных печей различных внутренних диаметров обеспечивается зависимостью среднего размера фрагмента шихты $\bar{d}_{\text{ш}} = 0,143\sqrt{D}$. Постоянство температуры перегрева капель жидкого чугуна в топливной насадке печи различного внутреннего диаметра гарантируется зависимостью высоты кислородной зоны $z_{\text{к.з}}$ от среднего размера куска топлива \bar{d}_k , а следовательно, и от диаметра печи. Удельная производительность печи не зависит от ее диаметра, а определяется удельной подачей дутья $q_0 = 1,9 - 2,2, \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$, расходом кокса $K, \%$, содержанием кислорода в дутье $O_2^0, \%$, углерода в топливе $C, \%$; CO_2 и $CO, \%$ в отходящих газах.

Проведен анализ сил, действующих на коксовую или угольную топливную насадку в низкошахтных печах при замене кокса на антрацит и тощие угли. Решена проблема определения стойкости топливной насадки под влиянием давления вышележащих слоев шихты на основе решения задачи анализа сил, действующих на столб шихты в период плавки. За основу анализа принято выражение для активного веса столба шихты (ΔF), действующего на топливную насадку:

$$\Delta F = F_{\text{ш}} - F_{\text{тр}} - \Delta F_r + F_{\text{к}}, \quad (5)$$

где $F_{\text{ш}}$ – полный вес столба шихты на уровне топливной насадки, Н; $F_{\text{тр}}$ – сила трения шихты о стенки шахты, Н; ΔF_r – сила подъема шихты за счет падения давления газового потока, Н; $F_{\text{к}}$ – сила всплывания кокса в горне печи за счет разности плотностей жидкого металла и кусков топлива, Н.

Полученные данные позволяют предварительно по размеру и форме кусков шихты спрогнозировать ее поведение в процессе шахтной плавки. Сделан вывод о том, что при переходе на антрацит и тощие угли для увеличения силы трения шихты о стенки необходимо тщательно подготавливать шихту до получения минимальных размеров кусков 0,07 – 0,08 м, это резко снижает угол зацепления и, следовательно, угол внутреннего трения, и увеличивает коэффициент бокового давления на стенки шахты. При переходе от кокса к использованию в качестве топлива антрацита или тощих углей на неподготовленной шихте высота печи уменьшается и составляет $H_n = 3,249\sqrt{D}$ вместо $H_n = 4,345\sqrt{D}$.

На рисунке 1 представлены результаты серии многовариантных расчетов сил давления столба шихты на топливную насадку для печей различного диаметра при использовании в качестве топлива кокса и антрацита.

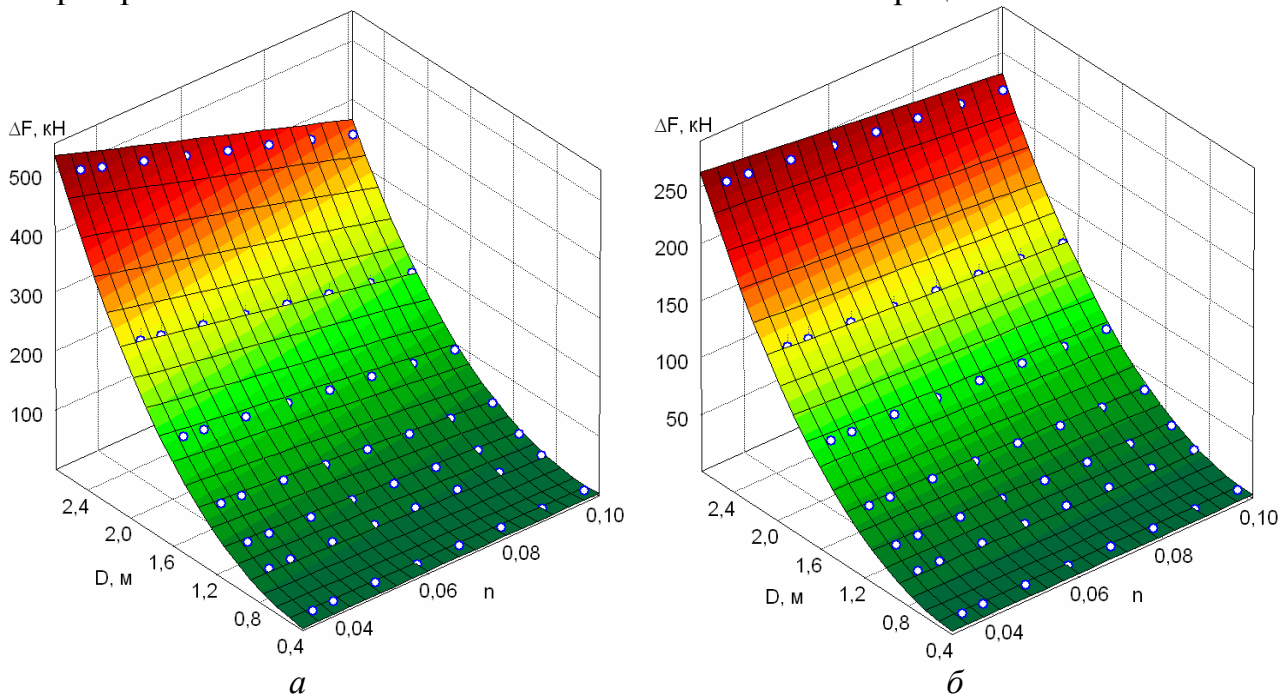


Рисунок 1 – Зависимость силы давления шихты на топливную насадку от диаметра шахты печи и коэффициента бокового давления при работе печи на коксе (а) и антраците (б)

Анализ данных, представленных на рисунке 1, показывает, что для всех вариантов отопления печи увеличение диаметра приводит к росту силы давления, который вызван в первую очередь увеличением высоты столба шихты, а повышение коэффициента n бокового давления, т.е. повышение качества подготовки шихты приводит к некоторому снижению силы давления. В частности, увеличение n с 0,035 до 0,1 при работе печей с диаметром шахты 0,5 – 2,65 м на коксе приводит к росту силы давления в 2,3 – 1,4 раза, а на антраците – в 1,4 – 1,1 раза соответственно. При работе печи на коксе силы давления на топливную насадку почти в 2 раза выше, чем при работе печи на антраците для всех исследованных диаметров.

На основе критериев конвективного теплообмена получены соотношения для определения геометрических параметров низкошахтных печей, необходи-

мых при проектировании новых и модернизации действующих и выходящих за пределы нормального ряда как в меньшую, так и в большую сторону.

По разработанной методике выполнен расчет высоты топливной насадки на основе механики движения материалов. При определении полезной высоты низкошахтных печей вскрыта общая природа ряда физических процессов, протекающих в рабочем пространстве печи. Выявлено, что высота печей связана с механикой движения шихтовых материалов к очагам горения по плоскостям скольжения, расположенным под углом внутреннего трения к горизонтальной плоскости. Движение кусков шихты и топлива в связанной системе осуществляется по плоскостям, которые расположены под углом φ^* к горизонту. В результате исследований установлено, что для стабильного хода плавки угол внутреннего трения для топливной насадки должен составлять $54 \pm 2^\circ$, для высоты топливной насадки ($H_{\text{тн}}$) выведена формула:

$$H_{\text{тн}} = 0,45 + 0,699D. \quad (6)$$

Третья глава посвящена разработке усовершенствованной комплексной детерминированной математической модели процесса плавки материалов в низкошахтных печах и анализу влияния теплотехнических параметров на технологический процесс. Одной из наиболее полных и комплексных моделей плавки материалов в низкошахтных печах является математическая модель, разработанная коллективом ученых под руководством И.Ф. Селянина, на ее основе была создана новая усовершенствованная математическая модель, отличающаяся наличием дополнительных блоков, позволяющих исследовать влияние подогрева, обогащения дутья кислородом, применения пылеугольного топлива на тепловую работу печи. На рисунке 2 представлена структура усовершенствованной математической модели (новые блоки выделены цветом). Блок 1.1 (используется при применении пылеугольного топлива (ПУТ)) предназначен для расчета времени горения ПУТ в кислородной зоне, блоки 2 и 3 изменены с учетом добавления ПУТ в дутье, подогрева и обогащения дутья кислородом.

Для разработки детерминированной математической модели потребовалось уточнение ряда известных и получение новых расчетных соотношений для определения длины кислородной зоны (7), температуры поверхности кусков топлива в слое топливной насадки (8) и содержания СО в дымовых газах, уходящих из печи (9):

$$z_{\text{кз}} = \frac{\ln(O_2^0/O_2^*) \cdot d_{\text{к}}(1 + Sm_1)}{0,343Re^{-0,17} \cdot 6(1 - \varepsilon_{\text{к}}) \cdot \psi_{\text{к}}}; \quad (7)$$

здесь $O_2^* = O_2(z_{\text{кз}})$ – остаточное содержание кислорода после достижения максимального содержания CO_2 в зоне горения топлива; $d_{\text{к}}$ – диаметр канала, мм; Sm_1 и Re – числа подобия Семенова и Рейнольдса; $\varepsilon_{\text{к}}$ – порозность слоя в кислородной зоне; $\psi_{\text{к}}$ – статистический коэффициент формы;

$$T_{\text{с}} = \frac{0,2186E}{a \cdot 10^{-4}E + b - \lg\beta}, \quad (8)$$

где E – энергия активации, кДж/моль; a и b – координаты полюса горения

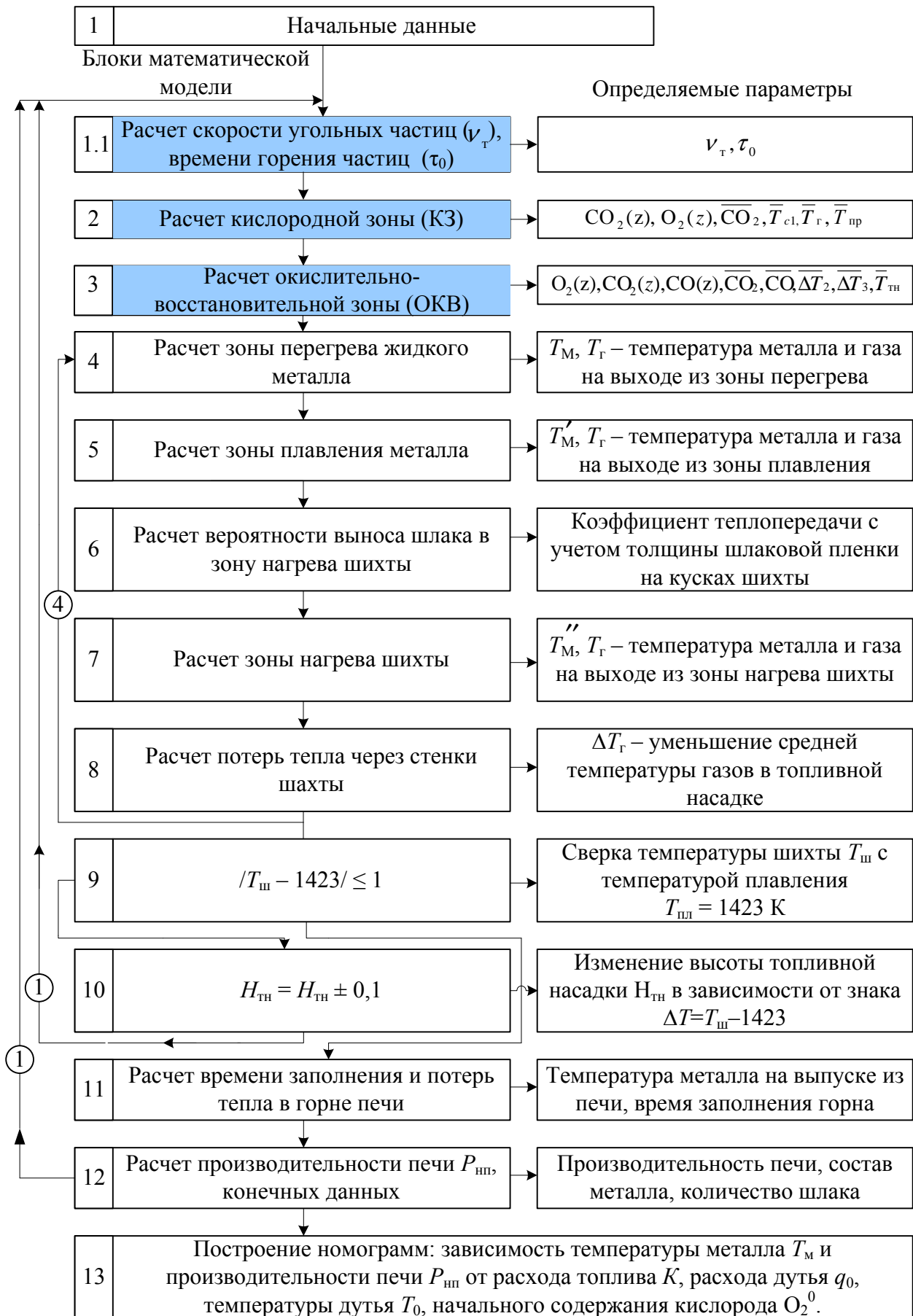


Рисунок 2 – Структура математической модели

(по данным В.В. Померанцева $a = 0,869$, $b = 1,0$; по данным Г.Ф. Кноре и др. $a = 0,991$, $b = 0,398$);

$$CO = \frac{2(O_2^0 - CO_2 - O_2)}{1 + 0,01O_2^0}, \quad (9)$$

где O_2^0 – содержание кислорода в дутье; CO_2 и O_2 – содержание диоксида углерода и кислорода в отходящих газах.

Для расчета процессов теплообмена с участием запыленного потока получена новая критериальная зависимость:

$$Nu_{\Pi} = Nu \left(1 + 6,7 Re^{-0,3} Re_T^{-0,33} \mu \frac{c_T}{c_T} \right), \quad (10)$$

где Nu_{Π} и Nu – числа подобия Нуссельта для запыленного и чистого газового потока; Re_T – число подобия Рейнольдса для твердых частиц; μ – массовая концентрация твердых частиц в потоке; c_T и c_T – теплоемкости твердой и газовой составляющей потока.

Настройку и верификацию математической модели проводили с использованием результатов промышленных экспериментов по плавке чугуна в низкошахтных печах с применением дутья, обогащенного кислородом. На рисунке 3, в качестве примера, показаны результаты математического моделирования, а именно расчета с применением разработанной модели температуры чугуна в зависимости от содержания кислорода в дутье (сплошная линия), точками показаны экспериментальные данные. Погрешность расчета температуры чугуна не превышает ± 12 °С. Принимая во внимание комплексность математической модели, возможность учета взаимосвязи факторов и процессов, имеющих различную физическую природу, а также ее область применения и назначение, модель признана достоверной, а ее точность удовлетворительной для прогнозных и инженерных расчетов.

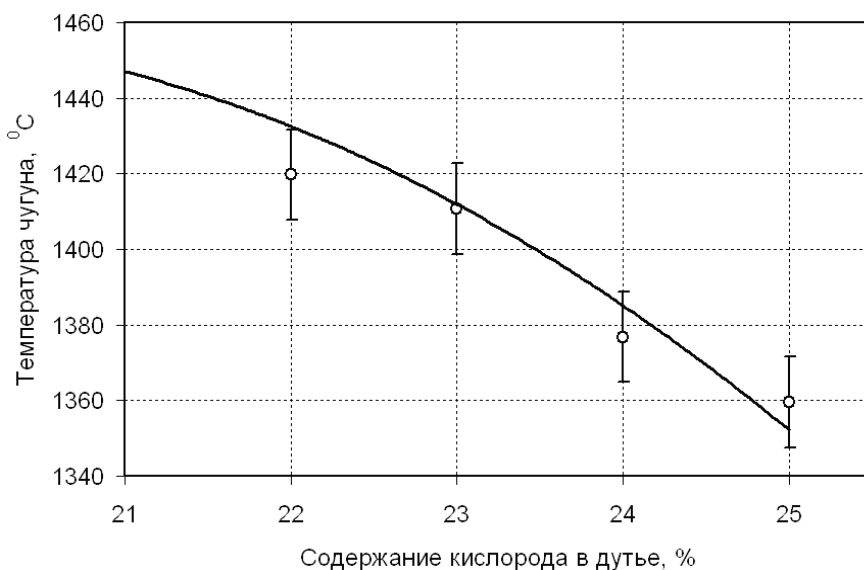


Рисунок 3 – Результаты определения температуры чугуна в зависимости от обогащения дутья кислородом: сплошная линия – математическое моделирование, точки – экспериментальные данные

В главе разработаны основы технологии применения пылеугольного топлива при плавке чугуна и силикатных материалов в низкошахтных печах. Решена задача прогнозирования времени выгорания угольной частицы, а также скорости

ее движения по каналам слоя кокса топливной насадки (с учетом соударений угольных частиц и кусков кокса) для получения максимального теплового эффекта. На основе математической модели проведено исследование влияния диаметра d_T угольных частиц на их скорость V_T и длину l_T пути (рисунок 4). Для обеспечения полного сгорания угольных частиц в пределах кислородно-окислительной зоны длина пути соответственно должна быть меньше высоты этой зоны. Проведенные расчеты показывают, что угольные частицы диаметром от 0,001 до 1 мм полностью сгорают в пределах кислородно-окислительной зоны, поскольку их длина пути не превышает 50 мм, что значительно меньше высоты этой зоны в действующих печах.

С применением разработанной математической модели проведено исследование влияния различных способов интенсификации плавки материалов в НШП, в частности подогрева и обогащения дутья кислородом, на газообразование и высоту кислородной зоны в топливной насадке.

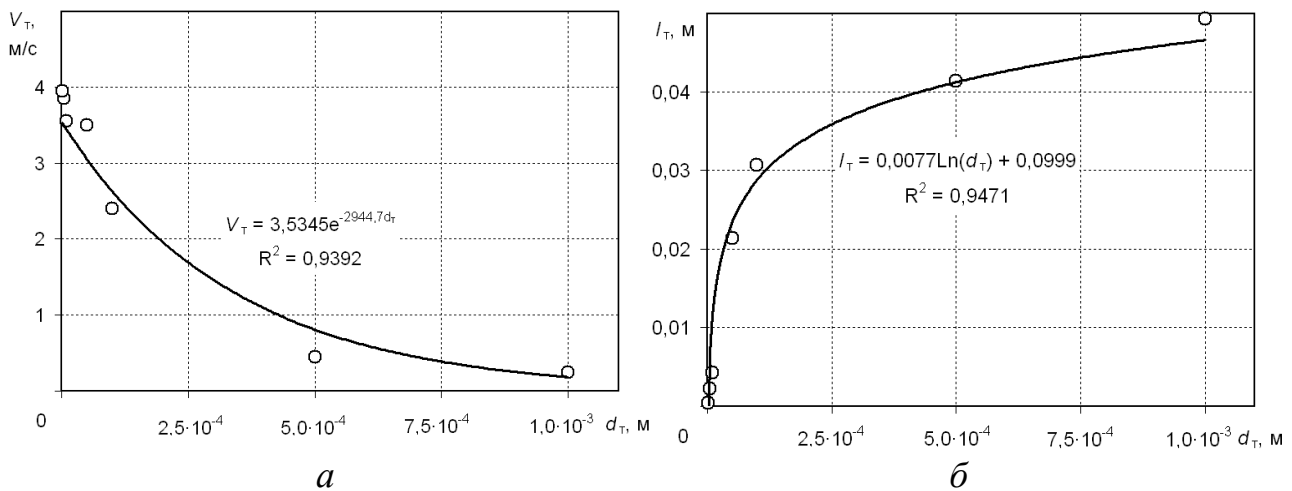


Рисунок 4 – Влияние диаметра угольных частиц на скорость (а) и длину пути (б)

При проведении многовариантных расчетов температуру дутья задавали в интервале 300 – 700 К, содержание кислорода в дутье 21 – 25 %, порозность кокса 0,5, размер кусков кокса 60 мм, удельную подачу дутья $1,75 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$, среднюю температуру газа 1900 К. На рисунках 5, а и б представлены распределения газов по высоте топливной насадки при различных значениях температуры подогрева дутья и содержания кислорода в дутье соответственно.

Анализ полученных результатов показывает, что подогрев и обогащение дутья кислородом оказывают существенное влияние на процессы горения кокса и газообразование. Подогрев дутья с 300 до 700 К приводит к снижению длины кислородной зоны, которая может быть идентифицирована по максимуму содержания CO_2 (на рисунке 5 показаны точками) с почти 0,4 до 0,2 м, т.е. фактически в 2 раза, уменьшению содержания CO_2 и увеличению содержания CO . Обогащение дутья кислородом с 21 до 25 % оказывает на высоту кислородной зоны аналогичное влияние, сокращая ее в 1,8 раза. Характерно, что обогащение дутья кислородом при снижении высоты кислородной зоны приводит к росту содержания CO при почти неизменном распределении содержания CO_2 по высоте топливной насадки, но при одновременном увеличении содержания остаточ-

ного кислорода от 0,5 до 2,0 %, который расходуется на окисление примесей чугуна.

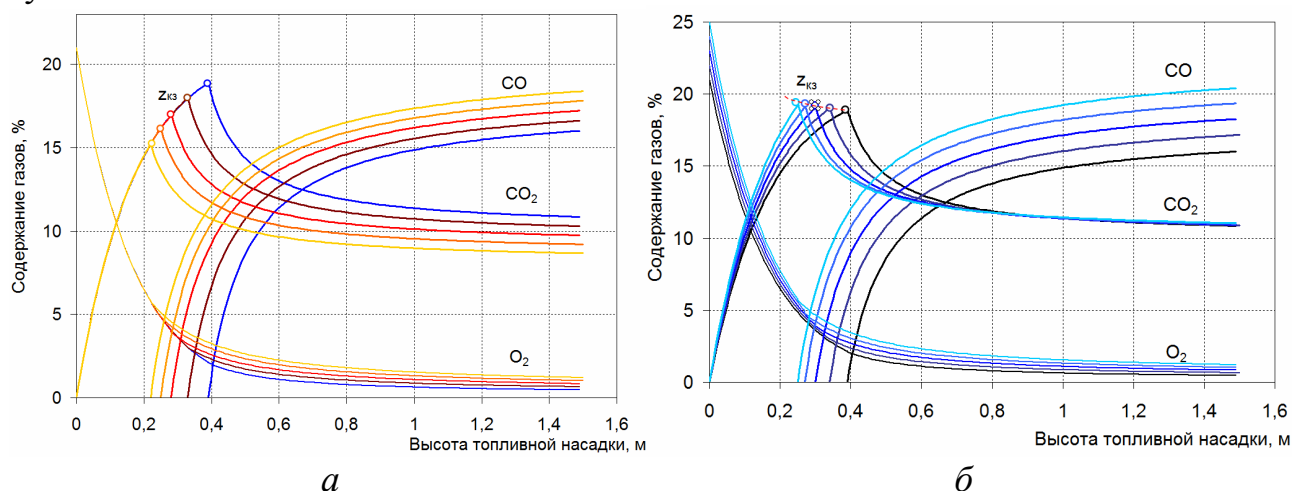


Рисунок 5 – Распределение газов по высоте топливной насадки при различных значениях (а) – температуры подогрева дутья (— 300 К, — 400 К, — 500 К, — 600 К, — 700 К) и (б) – содержания кислорода в дутье (— 21 %, — 22 %, — 23 %, — 24 %, — 25%)

В главе приведено физико-химическое обоснование основных методов интенсификации процесса шахтной плавки. Обогащение дутья кислородом способствует увеличению скорости выгорания углерода v_c и росту производительности $P_{\text{пн}}$ печи:

$$P_{\text{пн}} = \frac{v_c 10^4}{KC}, \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с}) \quad (11)$$

и увеличению скорости $v_{\text{ш}}$ схода шихты:

$$v_{\text{ш}} = \frac{P_{\text{пн}}}{\rho_{\text{ш}}(1 - \epsilon_{\text{ш}})}, \text{ м}/\text{с}, \quad (12)$$

где K – расход кокса, %; C – содержание углерода в коксе, %; $\rho_{\text{ш}}$ – плотность куска шихты; $\rho_{\text{ш}}(1 - \epsilon_{\text{ш}})$ – насыпная масса шихты в укладке с порозностью $\epsilon_{\text{ш}}$.

Установлено, что излишки кислорода (ΔO_2) в дутье, способствуя увеличению скорости $v_{\text{ш}}$ схода шихты, как следствие, приводят к уменьшению времени τ_1 нагрева шихты до температуры плавления $T_{\text{пн}} = 1200$ °С. Одновременно растет высота зоны нагрева z_1 по отношению к начальной высоте z_0 при $O_2^0 = 21$ % :

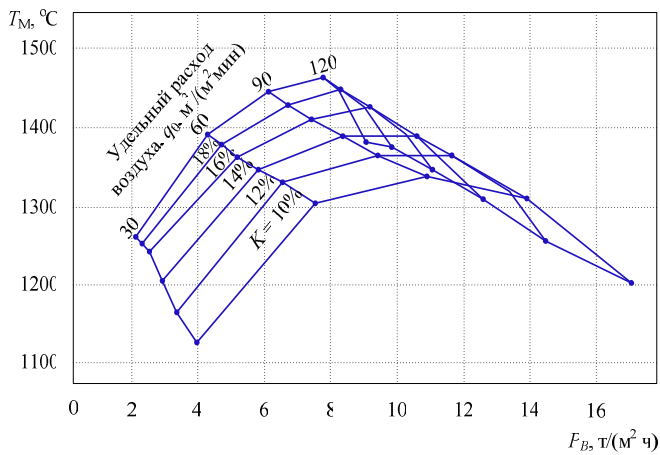
$$z_1 = v_1 \tau_1 = v_1 \tau_0 \frac{v_1}{v_2} = z_0 \frac{21 + \Delta O_2}{21}, \quad (13)$$

где τ_1 , τ_0 и v_1 , v_2 – время и скорость схода шихты при $O_2 = 21 + \Delta O_2$ и $O_2^0 = 21$ % .

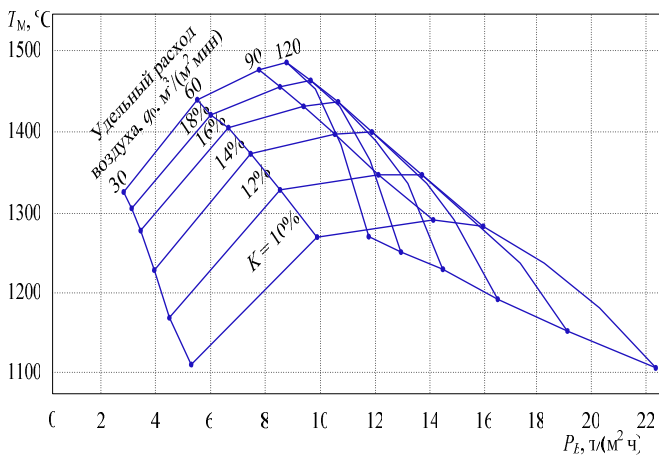
Высота топливной насадки уменьшается и будет равна

$$H_{\text{тн}} = H_{\text{п}} - z_1. \quad (14)$$

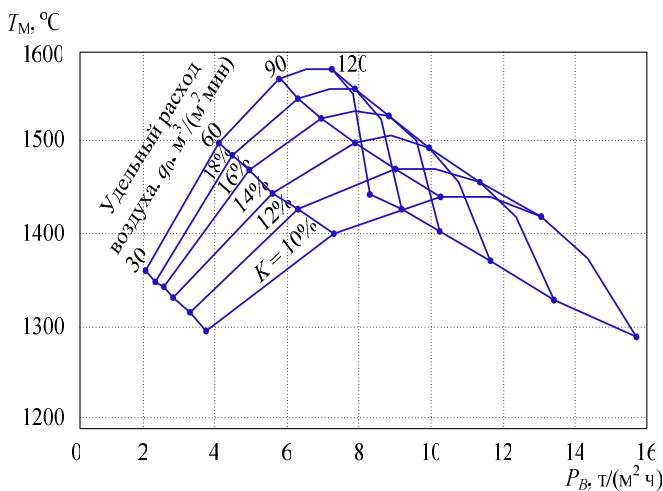
Для иллюстрации возможностей математической модели на рисунке 6 приведены расчетные номограммы процесса шахтной плавки при обогащении дутья кислородом до 30 % и при подогреве дутья до 727 °С.



а



б



в

а – $O_2^0 = 25\%$ и $T_q = 27^\circ\text{C}$; б – $O_2^0 = 30\%$ и $T_q = 27^\circ\text{C}$; в – $O_2^0 = 21\%$ и $T_q = 727^\circ\text{C}$

Рисунок 6 – Расчетные номограммы процесса шахтной плавки

При низком расходе дутья ($q_0 = 30 - 60 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{мин})$) номограммные кривые при $O_2^0 = 25\%$ идут ниже таковых при $O_2^0 = 21\%$. При $q_0 = 60 - 90 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{мин})$ температура металла (T_M) примерно одинакова для $O_2^0 = 21\%$ и $O_2^0 = 25\%$. И только при высоком расходе кокса ($K = 16 - 20\%$) температура металла на выпуске при $O_2^0 = 25\%$ становится выше, чем T_M при $O_2^0 = 21\%$. Обогащение дутья кислородом приводит к увеличению скорости выгорания углерода, к росту производительности печи ($P_{\text{нп}}$) и скорости схода шихты ($v_{\text{ш}}$). Одновременно растет высота зона нагрева шихты (z_1) в соответствии с (14) и падает высота топливной насадки. Так как $v_{\text{ш}}$ пропорциональна произведению ($q_0 \cdot O_2^0$), то есть $v_{\text{ш}} \sim q_0 \cdot O_2^0$, то для поддержания оптимальной высоты топливной насадки (т.е. $v_C = \text{const}$) с увеличением O_2^0 в дутье необходимо пропорционально уменьшить количество дутья (q_0), подаваемого в печь. При большом количестве дутья ($q_0 > 90 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{мин})$) для поддержания оптимальной высоты топливной насадки необходимо увеличивать расход кокса в завалку ($K \geq 16\%$). Только при таких условиях плавки температура металла на выпуске выравнивается с таковой при дутье с $O_2^0 = 25\%$, а при $K = 20\%$ – даже превышает на $10 - 15^\circ\text{C}$ при номинальном параметре дутья ($O_2^0 = 21\%$).

Особенно наглядно проявляется влияние увеличения содержания кислорода в дутье на параметры T_m и $P_{тн}$ при $O_2^0 = 30\%$ (рисунок 6, б). Здесь отмечается резкое снижение температуры металла при $K = 10\%$ и $K = 12\%$ во всем диапазоне изменения величины q_0 ($30 \leq q_0 \leq 120 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{мин})$). Производительность печи растет в соответствии с выражением (9).

Подогрев дутья до 727°C при $O_2^0 = 21\%$ (рисунок 6, в) резко увеличивает выходные параметры процесса: температуру металла и производительность печи во всем диапазоне изменения основных входных параметров: $10 \leq K \leq 20\%$; $30 \leq q_0 \leq 120 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{мин})$.

Четвертая глава посвящена проектированию, конструированию исследовательского полупромышленного комплекса (ИПК) на основе низкошахтной печи. Разработанные методы расчета могут служить основой для проектирования промышленных плавильных комплексов на основе низкошахтных печей.

В исследовательских целях в ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет» (СибГИУ) был спроектирован и введен в эксплуатацию ИПК, который включает в себя низкошахтную печь с внутренним диаметром 200 мм, высотой 1500 мм, оборудованную рекуператором. По всей высоте зоны топливной насадки через каждые 104 мм выполнены измерительные отверстия для забора газообразных продуктов сгорания и измерения температуры поверхности топлива. Сформированная развертка рабочего пространства печи позволяет производить измерения во всем объеме шахты. В структуру ИПК входит специальная установка для исследования прочности твердого топлива, определяемой в процессе горения под нагрузкой. Установка обеспечивает возможность проверки качества топлива и воспроизводит условия в период плавки в шахтной печи. Конструкция установки и методы эксплуатации защищены патентами РФ №№ 96963, 106953, 102386, 99616, 2438124 (Свид. о гос. рег. базы данных № 2012620487).

Аппаратно-лабораторная база для исследования состава газовой фазы, средств измерения расходов, обеспечивающих дутьевой режим, измерения температуры топлив и металла, представлена современным оборудованием, прошедшим процедуру поверок в установленном порядке. Расчеты производились на лицензионном программном обеспечении и пакетах прикладных программ, защищенных свидетельствами о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Геометрические параметры конструкции низкошахтной печи ИПК были выбраны исходя из сложившейся проектной практики, характерной для промышленных печей, основанной на существующей эмпирической зависимости, связывающей высоту топливной насадки с внутренним диаметром печи.

Для расчета технологических параметров рекуператора конструкции «труба в трубе» разработана математическая модель. Ее особенностью является возможность одновременного расчета состава колошниковых газов; температуры воздуха и дымовых газов на выходе из рекуператора; коэффициентов теплообмена и теплопередачи на дымовой стороне; температуры подогрева воздуха для противотока и прямотока; температуры подогрева воздуха для прямотока; коли-

чества воздуха на дожигание монооксида углерода в колошниковых газах. Конструкция рекуператора защищена патентами РФ №№ 89682, 89683, 89684, 99135. Для расчета всех технологических параметров рекуператора конструкции «труба в трубе» была разработана программа в среде Borland Delphi, позволяющая моделировать протекающие процессы теплообмена в рекуператоре (Свид. о гос. рег. прогр. для ЭВМ № 2011617034).

В пятой главе представлены результаты экспериментальных исследований плавки чугуна и силикатных материалов в низкосахтных печах с использованием в качестве топлива антрацита и тощих углей.

В результате экспериментов на установке по определению прочности топлива при горении была рассчитана степень измельчения топлива (кокса и антрацита) по формуле:

$$C_T = \frac{(\bar{d}_{\text{до}} - \bar{d}_{\text{после}})}{\bar{d}_{\text{до}}} \cdot 100 \% , \quad (15)$$

где C_T – степень измельчения топлива; $\bar{d}_{\text{до}}$ и $\bar{d}_{\text{после}}$ – средний размер куса топлива до и после плавки, мм.

Установлено, что на степень измельчения кусков кокса подогрев и увлажнение дутья практически не влияют, небольшие изменения размеров куса кокса связаны в большей степени с его выгоранием и в меньшей – с его растрескиванием. Степень измельчения кокса при проведении плавки на холодном дутье составляет $C_T = 12 \%$; после плавки на подогретом дутье $C_T = 6 \%$; на подогретом увлажненном дутье $C_T = 9 \%$.

Анализ плавок, проведенных на холодном дутье с использованием в качестве топлива антрацита, показывает, что последний сильно растрескивается на мелкие куски, $C_T = 38 \%$. Растрескивание происходит за счет высоких механических и термических напряжений по объему куса топлива в кислородной зоне, где его поверхность разогревается до $2000 - 2100 \text{ }^\circ\text{C}$. Система видеосъемки поведения кускового топлива ИПК позволила фиксировать стадии зарождения, развития трещин и разрушения кусков антрацита (рисунок 7).

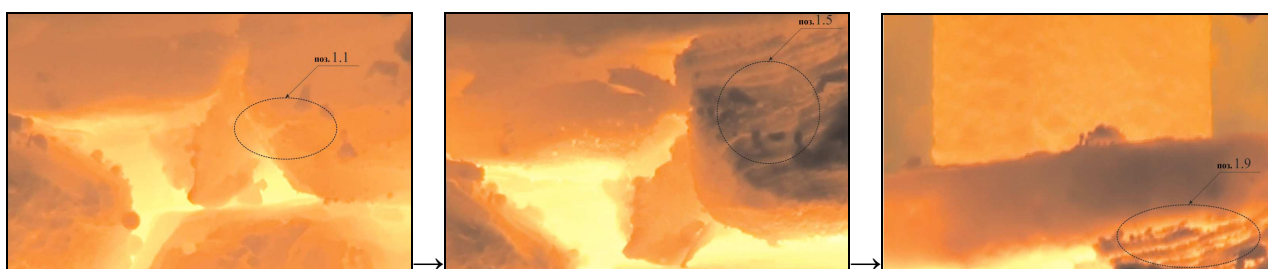


Рисунок 7 – Видеосъемка процесса развития трещин в антраците

Для снижения термических напряжений в кусках антрацита необходимо резко уменьшить градиенты температуры на его поверхности, это возможно осуществить при подогреве и увлажнении дутья. Дополнительно стойкость антрацита против растрескивания повышается за счет увлажнения подогретого дутья, степень измельчения составляет $C_T = 20 \%$. В кислородной зоне восстановление водяного пара углеродом антрацита резко интенсифицируется при скоро-

сти дутья свыше 0,5 м/с и протекает по реакции $2C + 3H_2O = CO + CO_2 + 3H_2 - 210,036$ МДж/кмоль, которая идет с большим поглощением тепла. В результате протекания данной реакции резко понижается температура поверхности антрацита в кислородной зоне с 2000 до 1800 – 1850 °С, но одновременно увеличивается высота этой зоны, что увеличивает перегрев жидких капель металла, снижает температурные градиенты и, следовательно, напряжения в поверхностных слоях куска топлива. При плавках с одновременным подогревом и увлажнением дутья антрацит меньше подвергся растрескиванию. Температура чугуна на выходе достигает 1350 °С. Это дает возможность вести плавку в устойчивом режиме.

На установке для исследования прочности твердого топлива была определена степень измельчения кокса $C_T = 10$ % и антрацита и $C_T = 36$ %, что совпадает с данными, полученными на ИПК. Для определения оптимальных соотношений содержаний различных видов топлива в топливных насадках и обеспечения устойчивой работы низкошахтных печей разработана методика аттестации топлив, основанная на определении относительной прочности топлива при горении под нагрузкой (ε_h) и относительной прочности, зависящей от разрушения и газификации (ε_T), определяемой по формуле:

$$\varepsilon_T = \varepsilon_h (2 - \rho_1 / \rho_0), \quad (16)$$

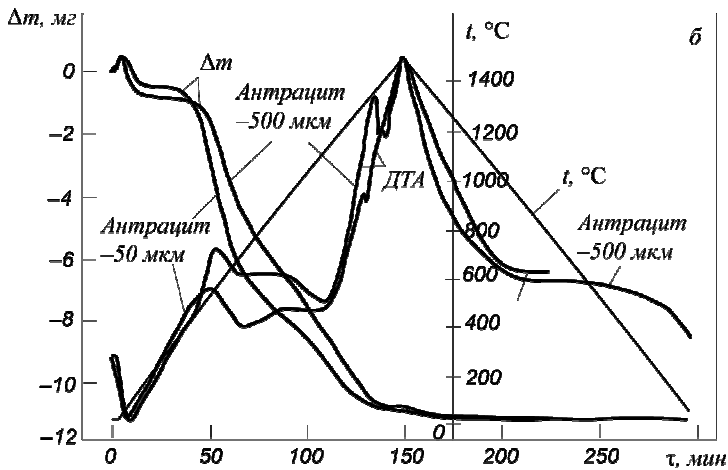
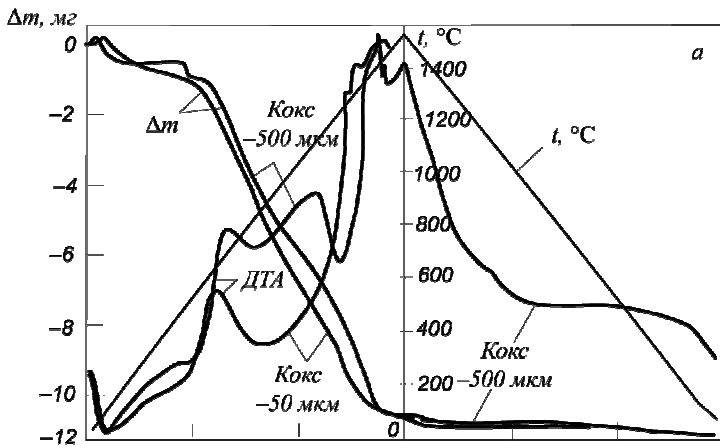
где ρ_0 и ρ_1 – насыпная масса топлива до и после опыта.

Для реального прочного топлива $\varepsilon_T = (0,85 - 0,95) \varepsilon_h$, для топлива средней прочности $\varepsilon_T = (0,7 - 0,85) \varepsilon_h$, а для малопрочных топлив $\varepsilon_T = (0,5 - 0,7) \varepsilon_h$. Лабораторные исследования позволили сформировать критериальный ряд (таблица 1) соотношений содержаний кокса и антрацита (К–А) с изменением концентраций через 10 %; при соотношении 60 % антрацита и 40 % кокса $\varepsilon_T = 0,85$, что является минимальным требованием к относительной прочности.

Таблица 1 – Относительная прочность твердого топлива

К–А, %	100–0	90–10	80–20	70–30	60–40	50–50	40–60	30–70	20–80	10–90	0–100
ε_T	0,95	0,93	0,90	0,87	0,85	0,81	0,70	0,62	0,53	0,48	0,40

Проведен термогравиметрический анализ на дериватографе фирмы Setaram образцов литейного кокса и антрацита (рисунок 8) методом разбавления навески в порошкообразном термоинертном растворителе. В результате сравнительных исследований установлено, что при нагревании кокса уже при низких температурах происходит его беспламенное окисление с выделением тепла («тихое горение»), что в условиях низкоинтенсивного теплоотвода может привести к разогреву и воспламенению. При нагревании антрацита такого процесса практически не наблюдается. Содержащиеся в золе углеродистых материалов оксиды железа при температурах 1000 – 1400 °С в присутствии твердого углерода и восстановительной атмосферы диссоциируют (восстанавливаются) до металлического железа, которое в окислительной атмосфере при высоких температурах вновь окисляется до FeO, Fe₃O₄, Fe₂O₃.



При использовании антрацита для выплавки железоуглеродистых сплавов уже при температурах менее 1000 °С может образоваться значительное количество легкоплавкого расплава золы (кислого вязкого шлака с содержанием около 80 % SiO_2) в количестве примерно 7,5 % от рабочей массы антрацита, что может привести к расстройству технологического процесса.

Рисунок 8 – Влияние крупности углеродистого материала на кинетику изменения массы и энтальпии кокса (а) и антрацита (б)

При плавке оксидных материалов (например доменного шлака для производства минераловатных изделий) использование антрацита предпочтительнее

кокса, так как легкоплавкий кислый шлак золы антрацита повышает кислотность оксидного расплава, что повышает механические свойства минеральной ваты и увеличивает показатели качества продукта. Увеличение плотности углеродистых материалов приводит к уменьшению скорости образования CO_2 и увеличению скорости образования CO , что может привести к изменению температурных зон и состава газовой фазы в шахтных печах. В процессе нагревания до 1500 °С поведение кокса и антрацита отличается незначительно. Проведенные исследования являются подтверждением возможности замены кокса на антрацит в качестве топлива для низкошахтных печей.

Результаты газового анализа плавки с использованием кокса и антрацита, подогревом и увлажнением дутья показывают, что с использованием кокса при холодном дутье кислородная зона длиннее, чем с использованием антрацита, так как последний измельчается. Чем выше температура подогрева дутья, тем выше температура металла на выходе. При температуре дутья 100 °С температура металла на выходе держалась в пределах 1260 °С, при максимальном подогреве дутья до 200 °С температура металла достигала 1310 °С. Следовательно, параметры горения по высоте кислородной зоны несколько выравниваются, а граница между кислородной и восстановительной зонами несколько сглаживается. Значения $z_{\text{к.з}}$ при плавках на антраците приближаются к значению $z_{\text{к.з}}$ при плавках на коксе. При подогреве и одновременном увлажнении дутья длина кислородной зоны при плавке на антраците приближается к длине при плавке на коксе.

На рисунке 9 представлены результаты сопоставления газового анализа (показаны областями) и данных математического моделирования (сплошные линии).

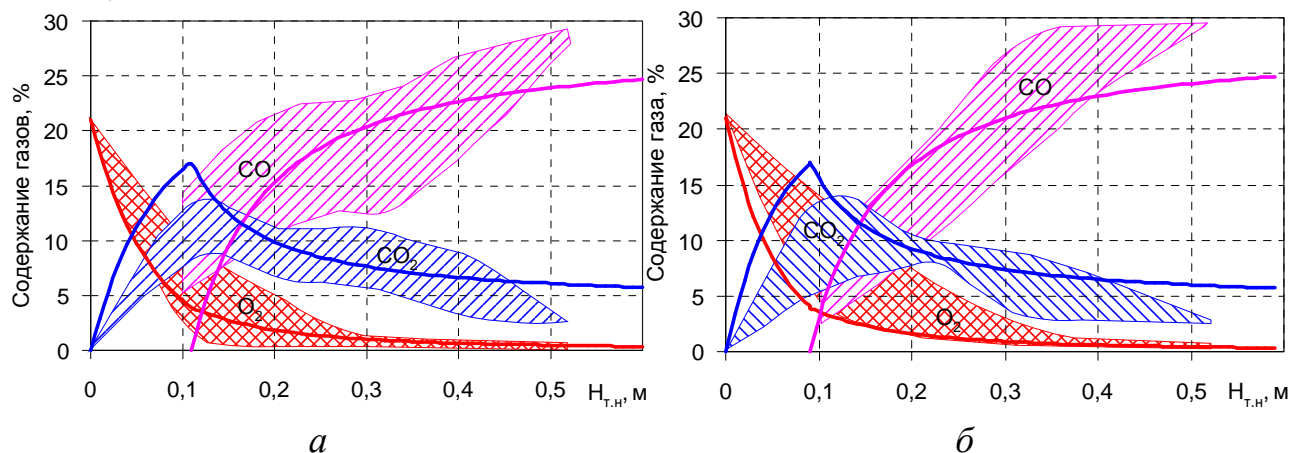


Рисунок 9 – Распределение газов по высоте топливной насадки при использовании в качестве топлива кокса (а) и антрацита (б) с подогревом дутья до 200 °С

Концентрационные области построены по минимальным и максимальным концентрациям газов на различном расстоянии от фурмы на соответствующих высотах топливной насадки на основе массива данных экспериментальных замеров. Как видно из графиков содержание газов значительно меняется не только по высоте топливной насадки, но и по диаметру печи, т.е. расстоянию от среза фурмы. Данные математического моделирования отражают общую динамику изменения концентрации CO , CO_2 , O_2 по высоте топливной насадки.

В процессе плавки на ИПК измеряли температуру поверхности куска топлива по высоте печи. Результаты измерений представлены на рисунке 10.

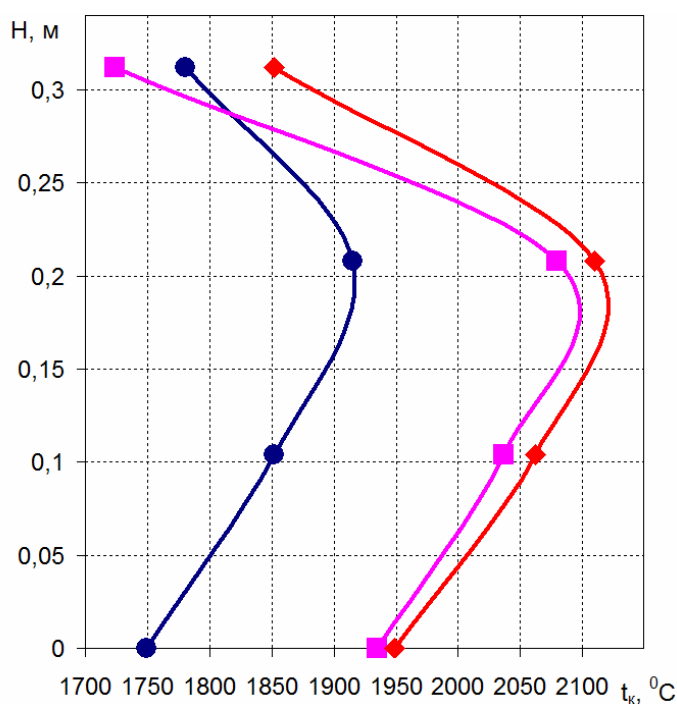


Рисунок 10 – Температура поверхности кусков топлива: \blacklozenge – кокс, холодное дутье; \bullet – антрацит, холодное дутье; \blacksquare – антрацит, подогретое и увлажненное дутье

Измерения проводились в тех же точках, в которых производился забор газов. Полученные расчетные результаты по параметру T_C попадают в интервал практических температур поверхности кусков топлива и представлены на рисунке 10. По полученным данным можно косвенно оценить размеры кислородной зоны ($z_{\text{к.з}}$), так как начало эндотермической реакции восстановления CO_2 будет сопровождаться падением температуры в

этой зоне. Видно, что температура поверхности антрацита начинает падать несколько раньше, чем температура кокса, это свидетельствует о границе между кислородной и окислительно-восстановительной зонами ($z_{к.з} < 200$ мм). Длина кислородной зоны при плавке на антраците с применением подогретого и увлажненного дутья приближается к длине при плавке на коксе; температура поверхности куска топлива, достигаемая максимума в кислородной зоне на холодном дутье, составляет: для кокса $T_k = 2110$ °С, для антрацита $T_a = 2080$ °С, а при использовании подогретого и увлажненного дутья, в зависимости от его параметров, температура может быть снижена на 150 – 200 °С.

В шестой главе представлены результаты промышленного внедрения и освоения энергоэффективных ресурсосберегающих технологий выплавки серых чугунов и силикатных материалов в низкошахтных печах при замене кокса на антрацит.

В результате промышленных экспериментов на НШП с внутренним диам. 700 мм установлено, что обогащение дутья кислородом до 25 % приводит к повышению температуры чугуна на 30 – 40 °С в течение 10 – 15 мин от начала вдувания. При дальнейшем увеличении времени подачи кислорода температура чугуна уменьшается и устанавливается на 30 – 40 °С ниже базового уровня. Производительность печи всегда остается выше базовой. Дутье, обогащенное кислородом до 25 %, дает прирост производительности печи на 18 – 20 % при расходе кокса 14 %.

На рисунке 11 показаны результаты исследования влияния содержания кислорода в дутье на состав уходящих газов и высоту топливной насадки. Сплошной линией показаны результаты расчетов с применением усовершенствованной детерминированной математической модели, точками показаны результаты экспериментальных данных. При математическом моделировании исходные данные задавали аналогичными промышленным условиям.

Анализ графиков, представленных на рисунке 11, показывает, что повышение содержания кислорода в дутье с 21 до 25 % не оказывает существенного влияния на содержание CO_2 в уходящих газах. Расхождение данных моделирования и экспериментальных замеров в абсолютных значениях не превышает $\pm 0,14$ %. Увеличение содержания кислорода в дутье с 21 до 25 % приводит к росту содержания CO в уходящих газах примерно с 20 до 28 %. Данные моделирования и экспериментальных замеров близки как в количественном, так и в качественном отношении, в абсолютных значениях расхождение не превышает $\pm 2,0$ %. Результаты математического моделирования и анализ экспериментальных данных свидетельствуют о снижении высоты топливной насадки с ростом содержания кислорода. В исследуемом интервале обогащения дутья кислородом высота топливной насадки снижается почти в 2,5 раза. Относительная погрешность моделирования не превышает ± 7 %. Влияние содержания кислорода в дутье на температуру расплава чугуна показано на рисунке 3.

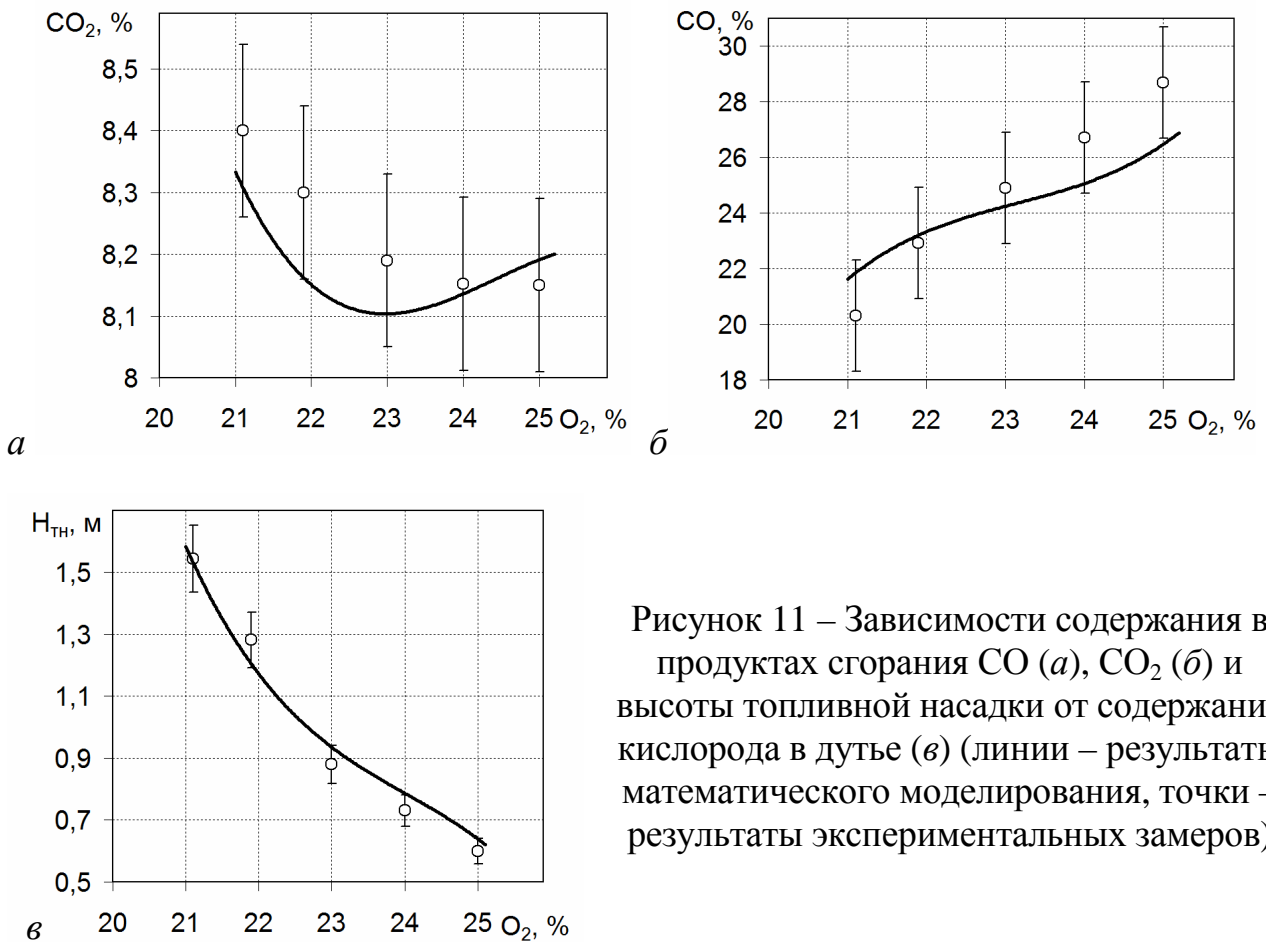


Рисунок 11 – Зависимости содержания в продуктах сгорания CO (а), CO₂ (б) и высоты топливной насадки от содержания кислорода в дутье (в) (линии – результаты математического моделирования, точки – результаты экспериментальных замеров)

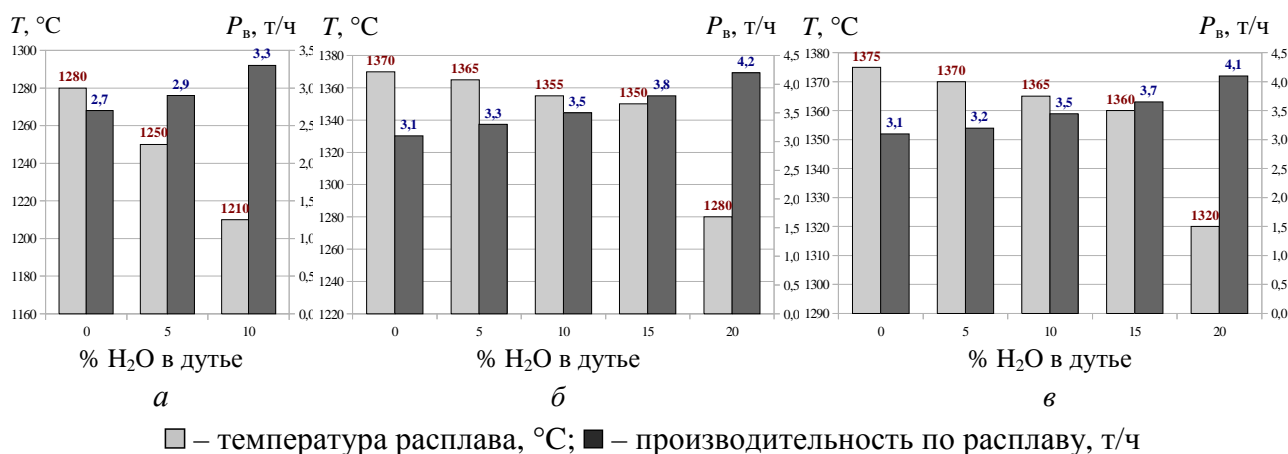
Внедрение результатов исследований по замене кокса на антрацит проводили на ООО «Изолит-НК» на малой шахтной печи с внутренним диаметром 1250 мм. Технологии защищены патентами РФ №№ 2350659, 2378388. Печь оснащена рекуператором конструкции «труба в трубе». Высота рекуператора составляла 13 м, использовалось все свободное расстояние от завалочного окна до искрогасителя. Рекуператор данной конструкции позволяет подогревать дутье до 450 °С. Срок службы рекуператора составляет 2 года и до настоящего времени не наблюдается каких-либо нарушений в его работе.

Установлено, что подогрев дутья до 450 – 550 °С с одновременным его увлажнением до 10 – 15 % обеспечивает рациональные параметры ведения плавки по температуре расплава (1350 – 1355 °С) и производительности печи (3,5 – 3,8 т/ч) (рисунок 12). Подачу в кислородную зону подогретого дутья необходимо осуществлять в равных количествах на двух горизонтах с расстоянием между ними, равным длине кислородной зоны.

В главе проведены исследования тепловой эффективности НШП при реализации ресурсосберегающих технологий. Анализировали влияние замены топлива, подогрева, увлажнения и обогащения дутья кислородом на коэффициент полезного действия (КПД) печи и удельный расход условного топлива, определяемый по соотношению

$$B_{\text{уд}} = \frac{B \cdot Q_{\text{н}}^{\text{п}}}{29,3 \cdot M_{\text{ч}}}, \text{ кг у.т./т чугуна,} \quad (17)$$

где B – масса топлива, кг; Q_H^P – низшая теплота сгорания топлива, МДж/кг; $M_{\text{ч}}$ – масса расплава чугуна, т.



а – паровоздушное холодное дутье; б – паровоздушное дутье, подогретое до 450 ÷ 550 °С; в – паровоздушное дутье, подогретое до 450° С, во второй ряд фурм, в первый ряд фурм – сухое дутье с тем же подогревом

Рисунок 12 – Результаты промышленных плавков

В качестве базовой технологии принимали плавку с использованием кокса, холодного дутья с содержанием 1,2 – 1,5 % H₂O. Многовариантные расчеты проводили для разработанной технологии, обеспечивающей полную замену кокса на антрацит в качестве топлива, при этом температуру подогрева дутья варьировали в пределах 200 – 500 °С, а содержание паров воды в дутье 5 – 15 %. При исследовании влияния обогащения дутья кислородом на тепловую эффективность работы печи в расчетах варьировали его содержание от 21 до 29 %. При задании одинаковых параметров работы печи (производительности, температуры расплава и др.) определяли расходы топлива и составляли тепловые балансы для каждого из исследуемых вариантов. В таблице 2 и на рисунках 13, 14 представлены результаты исследования.

Сжигание антрацита в комплексе с подогревом и увлажнением дутья (кроме вариантов 2А, 3А, 6А) обеспечивает более высокую тепловую эффективность работы печи по сравнению с применением кокса и холодного дутья без дополнительного увлажнения. Фактически увлажнение и подогрев дутья оказывают противоположное влияние на показатели тепловой эффективности, в частности удельный расход условного топлива и КПД. Подогрев дутья является приходной статьей и обеспечивает дополнительный приток теплоты в печь. Повышение температуры подогрева дутья с 200 до 500 °С увеличивает соответствующую приходную статью с 8 % до почти 20 %.

Однако увлажнение дутья оказывает отрицательное влияние на тепловую эффективность печи. В частности, повышение влажности дутья с 5 до 15 % приводит к росту потерь тепла на испарение влаги дутья с 3 до 10 – 12 %. При относительно низких температурах подогрева 200 – 300 °С и высокой влажности дутья на уровне 10 – 15 % H₂O (варианты 2А, 3А, 6А) отрицательный эффект увлажнения дутья преобладает над положительным эффектом подогрева.

Таблица 2 – Тепловые балансы низкошахтной печи при работе на коксе и антраците

Вариант	$t_d, ^\circ\text{C}$	$\text{H}_2\text{O}, \%$	Приходные статьи, %				Расходные статьи, %								
			$Q_{\text{хт}}$	Q_d	$Q_{\text{ок}}$	$Q_{\text{шо}}$	$Q_{\text{ч}}$	$Q_{\text{ш}}$	$Q_{\text{ри}}$	$Q_{\text{ивт}}$	$Q_{\text{ивд}}$	$Q_{\text{фуг}}$	$Q_{\text{хуг}}$	$Q_{\text{ф}}$	
1 К	20	1,5	93,6	0,8	4,8	0,7	37,6	3,7	3,7	0,4	0,8	20,3	27,3	6,3	
1 А	200	5	86,9	7,7	4,6	0,7	36,0	3,6	3,5	0,7	3,1	20,9	26,1	6,0	
2 А	200	10	86,8	8,2	4,4	0,6	34,1	3,4	3,3	0,7	7,0	20,9	24,8	5,7	
3 А	200	15	86,6	8,6	4,1	0,6	31,9	3,2	3,1	0,7	11,8	20,7	23,2	5,3	
4 А	300	5	83,4	11,2	4,7	0,7	36,1	3,6	3,5	0,7	3,0	20,9	26,2	6,0	
5 А	300	10	83,1	11,8	4,4	0,6	34,3	3,4	3,3	0,7	6,7	21,0	24,9	5,7	
6 А	300	15	82,8	12,4	4,1	0,6	32,1	3,2	3,1	0,7	11,3	20,8	23,3	5,4	
7 А	400	5	80,2	14,5	4,7	0,7	36,1	3,6	3,5	0,7	2,9	20,9	26,2	6,0	
8 А	400	10	79,7	15,2	4,4	0,6	34,4	3,4	3,4	0,7	6,4	21,0	25,0	5,7	
9 А	400	15	79,2	16,0	4,2	0,6	32,3	3,2	3,2	0,7	10,8	21,0	23,5	5,4	
10 А	500	5	77,0	17,6	4,7	0,7	36,2	3,6	3,5	0,7	2,8	21,0	26,3	6,0	
11 А	500	10	76,4	18,5	4,5	0,6	34,5	3,4	3,4	0,7	6,2	21,1	25,0	5,8	
12 А	500	15	75,8	19,4	4,2	0,6	32,5	3,2	3,2	0,6	10,3	21,1	23,6	5,4	

Примечание: Q_d – физическая теплота дутья, $Q_{\text{ок}}$ – теплота окисления примесей чугуна, $Q_{\text{шо}}$ – теплота шлакообразования, $Q_{\text{ри}}$ – теплота разложения извести, $Q_{\text{ивт}}$ – теплота испарения влаги топлива, $Q_{\text{ивд}}$ – теплота испарения влаги дутья, $Q_{\text{фуг}}$ – физическая теплота уходящих газов, $Q_{\text{хуг}}$ – химическая теплота уходящих газов, $Q_{\text{ф}}$ – потери тепла через футеровку в окружающую среду.

Это приводит к тому, что для этих вариантов работы печи удельный расход условного топлива при отоплении антрацитом больше, чем аналогичный параметр при отоплении печи коксом, а КПД соответственно имеет меньшие значения. В остальных исследованных вариантах эффект от подогрева дутья при соответствующей влажности преобладает, это обеспечивает повышение тепловой эффективности работы печи, снижение удельного расхода условного топлива и повышение КПД.

Полученные данные хорошо согласуются с результатами промышленных экспериментов, которые показали, что наиболее эффективно применять антрацит в комплексе с увлажнением и подогревом дутья. Применение увлажнения дутья без его подогрева, приводят к снижению температур расплава. Подогрев дутья до 400 – 500 °С и увлажнение дутья до 10 – 15 % H_2O обеспечивают оптимальные параметры по температуре расплава и производительности печи.

Анализ результатов проведенных расчетов показывает, что применение антрацита, подогрева до 500 °С и увлажнение дутья до 10 % H_2O обеспечивает удельный расход условного топлива на уровне 100,1 кг у.т./ т чугуна, а КПД 49,6 %, по сравнению с применением для отопления кокса, это приводит к экономии 12,5 кг у.т./ т чугуна (на 11 % снижает удельный расход условного топлива), и повышению КПД печи на 5,5 %.

Обогащение дутья кислородом с 21 до 29 % приводит к уменьшению объемов окислителя, подаваемого на горение, и соответственно объемов продуктов сгорания на 28 %.

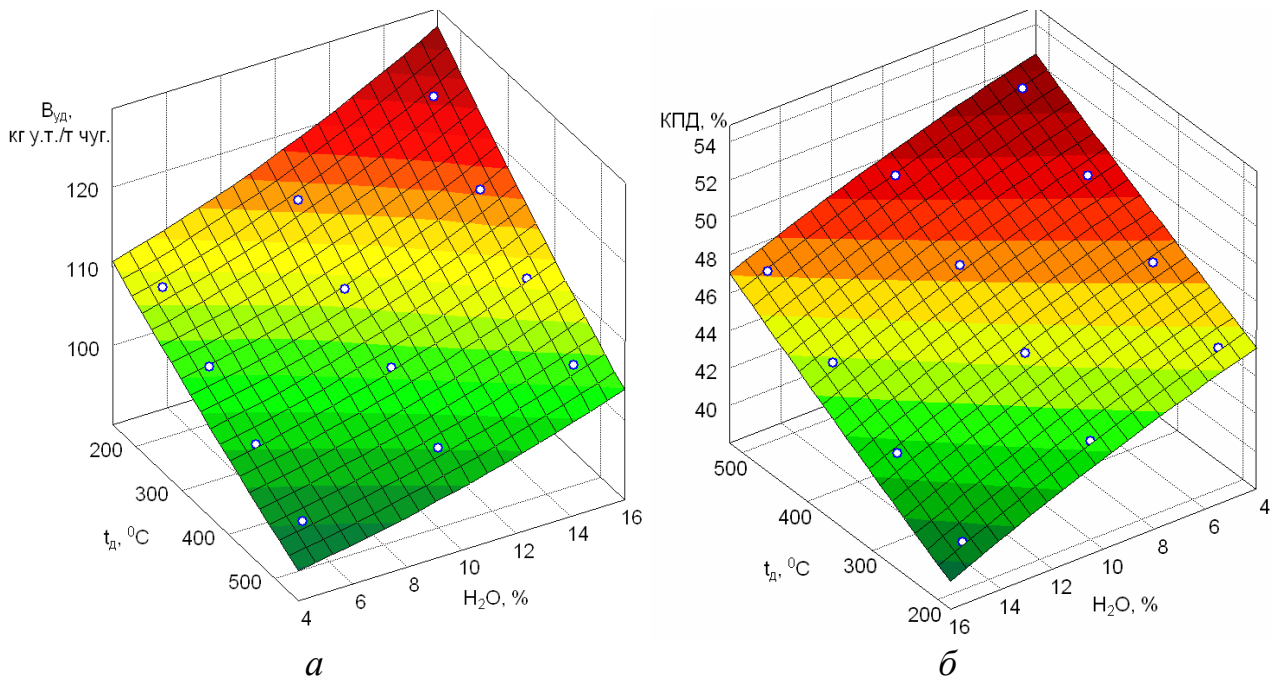


Рисунок 13 – Зависимость удельного расхода топлива (*а*) и коэффициента полезного действия (*б*) от температуры подогрева и влажности дутья

В случае работы печи на коксе без подогрева дутья обогащение воздуха подаваемого на горение кислородом до 29 % приводит к снижению потерь тепла с уходящими газами с 20,3 до 15,6 %, это обеспечивает повышение КПД печи с 44,1 до 46,9 %, т.е. почти на 3 % и экономию 6,8 кг у.т. / т чугуна.

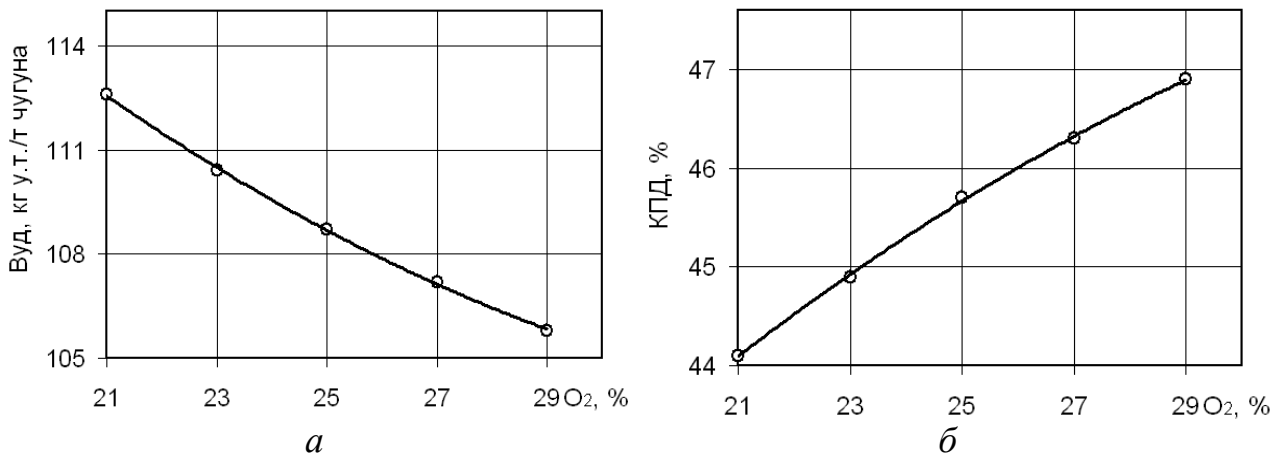


Рисунок 14 – Зависимость удельного расхода топлива (*а*) и коэффициента полезного действия (*б*) от содержания кислорода в дутье при работе печи на коксе

Для оценки экономической эффективности применения кислорода проведено исследование влияния соотношения цен на топливо и кислород на общие затраты при проведении плавки. Анализ уровня цен на литейный кокс показывает, что в зависимости от качества и поставщиков они колеблются в среднем в интервале 25 – 30 руб/кг. Для кислорода разброс цен значительно выше и обусловлен в том числе фактором его доступности. В частности, при эксплуатации низкошахтных печей в условиях крупных металлургических предприятий, имеющих в своем составе кислородно-конвертерное производство, цена кисло-

рода может составлять 2 – 3 руб/м³, в то же время при использовании технического кислорода, транспортируемого в баллонах, его стоимость может достигать 27 – 30 руб/м³.

Анализ результатов расчетов показывает, что экономически целесообразно (увеличение затрат на применение кислорода меньше, чем снижение затрат от сокращения расхода кокса) использовать обогащение дутья кислородом при превышении стоимости 1 кг кокса над стоимостью 1 м³ кислорода минимум примерно в 7 – 8 раз. Учитывая, что стоимость кокса значительно выше чем стоимость антрацита и тощих углей, то обогащение дутья кислородом в большей степени ориентировано на низкошахтные печи, работающие на коксе.

Сопоставление результатов расчетов теплового баланса и результатов промышленных экспериментов по обогащению дутья кислородом при плавке чугуна в низкошахтных печах показывает, что на практике обогащение дутья кислородом при сохранении расхода кокса оказывает влияние одновременно на температуру расплава и производительность печи. Оценка изменения физического тепла чугуна, например, при повышении производительности печи на 20 % и снижении температуры расплава на 50 °С (с 1300 до 1350 °С) (показатели, полученные при промышленных экспериментах) показывает, что в первом случае оно увеличится примерно на 220 – 230 кДж/кг расплава, а во втором снижается примерно на 30 кДж/кг, что обеспечивает положительный совокупный эффект в 190 – 200 кДж/кг и подтверждает повышение тепловой эффективности печи при обогащении дутья кислородом.

В главе проведены исследование и анализ свойств чугуна, выплавляемого по разработанным технологиям. Установлено, что химический состав и литейные свойства чугуна, полученного с применением в качестве топлива антрацита, находятся на высоком технологическом уровне. Из полученного расплава можно изготавливать отливки, соответствующие по своему химическому составу и механическим свойствам требованиям ГОСТов.

Внедрение результатов исследований проводили на ООО «Изолит-НК» (г. Новокузнецк); АО «Завод Универсал» (г. Новокузнецк); АО «ЕВРАЗ - Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат» (г. Новокузнецк); ЗАО «Гурьевский металлургический завод» (г. Гурьевск).

За счет внедрения разработанных технологий, новых конструкторско-технологических решений и выход на рациональное ведение плавки на низкошахтной печи ООО «Изолит-НК» (г. Новокузнецк) достигнута полная замена кокса антрацитом. Это позволило получить общий годовой экономический эффект 20 млн. руб. (в ценах 2015 года).

На АО «Завод Универсал» (г. Новокузнецк) разработана и внедрена технология плавки при использовании антрацита в качестве топлива, проведены промышленные плавки чугуна на низкошахтной печи с внутренним диам. 1000 и 700 мм соответственно. Количество антрацита в топливных колошах последовательно составляло 20, 30, 40 % от общей массы топливной завалки. В процессе плавки осуществлялся подогрев дутья до 450 °С специально смонтированной технологической установкой (горелки с фиксацией пламени в камере полного сжигания), позволяющей осуществлять подогрев и увлажнение дутья одновременно. Общая

масса используемого антрацита в эксперименте составила 60 т. Использование антрацита в топливных колошах позволяло получать чугун на выпуске из печи с температурой 1360 – 1380 °С с сохранением качества получаемого металла. Это позволило получить общий годовой экономический эффект 18 млн. руб. (в ценах 2015 года).

На АО «ЕВРАЗ – Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат» (г. Новокузнецк) разработана и внедрена технология плавки с обогащением дутья кислородом; разработан и передан на предприятие комплект нормативно-технической документации, включающий: технологическую инструкцию по расчету оптимального содержания кислорода в низкошахтной печи диам. 700 мм; технологическую инструкцию по определению порозности шихты, оказывающей существенное влияние на аэродинамические и теплотехнические параметры низкошахтной плавки, а также результаты математического моделирования по основным технологическим параметрам: содержанию CO, %, CO₂, %, температуре металла на выпуске. При производстве литья ответственного назначения в течение 5 лет низкошахтные печи предприятия работали на обогащенном кислородом дутье, что позволило увеличить выход годного на 5 – 7 %.

На ЗАО «Гурьевский металлургический завод» (г. Гурьевск) разработаны и внедрены технологии по применению кислорода и комбинированного дутья в низкошахтной печи, а также исследовано дилатантное поведение шихты в период плавки. За счет использования разработанных технологий и технологических приемов в реальных условиях литейного цеха предприятия процент брака литья был сокращен на 25 %, а эффективность от внедрения в общем объеме составила 3 млн. руб. в год.

В результате внедрения исследований были разработаны энергоэффективные ресурсосберегающие технологии, нашедшие отражение в комплектах нормативно-технической документации, переданных на вышеперечисленные предприятия.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований разработаны теоретические и технологические основы ресурсосбережения и повышения энергоэффективности твердоотопливных низкошахтных печей на основе интенсификации тепломассообменных процессов и замены топлива с кокса на антрацит и тощие угли. Решение задач, поставленных в работе, позволило сделать следующие выводы:

1. Доказана и научно обоснована эффективность и перспективность замены кокса на антрацит и тощие угли при плавке чугуна и силикатных материалов в низкошахтных печах. Получены основные зависимости и закономерности для расчета конструктивных, технологических и теплотехнических параметров низкошахтных печей при переходе на другие виды твердого топлива.

2. На основе теоретического анализа научно обоснованы условия подобия физического моделирования теплообменных и аэродинамических процессов в низкошахтных печах, установлено, что температурный режим в топливной насадке и в зоне нагрева шихты не зависит от диаметра печи при условии выполнения полученных в работе основных соотношений между геометрическими па-

раметрами печи, размерами кусков топлива и шихты: $H_{\text{тн}} = 1,165\sqrt{D}$; $H_{\text{н}} = 4,345\sqrt{D}$; $H_{\text{нд}} = 3,18\sqrt{D}$; $\bar{d}_{\text{к}} = 0,081\sqrt{D}$; $\bar{d}_{\text{ш}} = 0,143\sqrt{D}$.

3. Выявлены особенности и установлены основные закономерности процессов горения пылеугольного топлива в неразрыхленном плотном слое очага горения низкошахтных печей. Установлено, что максимальный эффект от сжигания ПУТ достигается при его полном сгорании в пределах кислородно-окислительной зоны.

4. Спроектирован и введен в эксплуатацию исследовательский полупромышленный комплекс на основе твердотопливной низкошахтной печи для разработки ресурсосберегающих технологий. Определены рациональные соотношения содержаний антрацита и кокса в топливных насадках, позволяющие обеспечить устойчивую работу низкошахтных печей. Разработана методика аттестации топлив, основанная на определении относительной прочности топлива, зависящей от горения, разрушения и газификации топлива. Проведенные на спроектированной установке исследования прочности твердого топлива позволили сформировать критериальный ряд соотношений содержаний кокса и антрацита с изменением их концентраций на 10 %.

5. Установлен механизм влияния подогрева и увлажнения дутья на процесс плавки чугуна и силикатных материалов в низкошахтных печах при использовании в качестве топлива антрацита, произведено его теоретическое и технологическое обоснование. Применение холодного дутья и антрацита в качестве топлива негативно сказывается на технологическом режиме плавки из-за высоких градиентов температуры, механических и термических напряжений по объему куска топлива в кислородной зоне. Снижение температуры поверхности антрацита, напряжения в поверхностных слоях куска топлива в кислородной зоне достигается за счет подогрева и увлажнения дутья по разработанным и внедренным в условиях промышленного производства технологическим регламентам дутьевых режимов.

6. Установлены закономерности взаимосвязи пиковых значений содержания газов и границ основных технологических зон (кислородной и окислительно-восстановительной) при различных количествах в топливных насадках кокса и антрацита и разных дутьевых режимах, выявленные в результате газового анализа по содержанию CO , CO_2 , O_2 рабочего пространства низкошахтной печи. Экспериментальные данные подтверждены результатами математического анализа по определению высоты топливной насадки, обоснованию высоты кислородной зоны, расчета температуры поверхности топлива. Установлено, что длина кислородной зоны соответствует максимуму содержания CO_2 в топливной насадке; сделан вывод о том, что длина кислородной зоны при плавке на антраците с применением подогретого и увлажненного дутья приближается к длине при плавке на коксе; температура поверхности куска топлива, достигаемая максимума в кислородной зоне на холодном дутье, составляет: для кокса $T_{\text{к}} = 2110$ °С, для антрацита $T_{\text{а}} = 2080$ °С, а при использовании подогретого и увлажненного дутья в зависимости от его параметров температура может быть снижена на 150 – 200 °С.

7. Разработана усовершенствованная комплексная детерминированная математическая модель процесса плавки материалов в низкошахтных печах, позволяющая исследовать влияние подогрева, обогащения дутья кислородом, применения пылеугольного топлива на тепловую работу печи. С использованием модели разработаны номограммы процесса плавки в диапазоне изменения основных входных параметров: расхода кокса – от 10 – 20 %; количества дутья – от 30 до 120 м³/(м² · мин). По результатам построения номограмм процесса шахтной плавки, при концентрациях кислорода в дутье более 21 % и подогреве дутья более 27 °С были выявлены и математически описаны основные закономерности, возникающие при обогащении дутья кислородом. Доказано, что для поддержания рациональной высоты топливной насадки с увеличением содержания кислорода в дутье необходимо пропорционально уменьшить количество дутья, подаваемого в печь. При большом количестве дутья ($q_0 > 90$ м³/(м² · мин)) для поддержания рациональной высоты топливной насадки необходимо увеличивать расход кокса в завалку ($K \geq 16$ %).

8. Обоснован уровень загрузки материалов в низкошахтную печь и определены рациональные расходы дутья при двухрядной подаче, установлено, что плавку чугуна и силикатных материалов в печах, использующих антрацит в качестве топлива, необходимо вести при уровне загрузки материалов в печь, составляющем $(2,5 \div 2,8)\sqrt{D_{\text{шт}}}$, подогреве дутья до 450 – 550 °С с одновременным его увлажнением до 10 – 15 %. В этом случае достигаются рациональные параметры плавки по температуре расплава и производительности печи. Подачу в кислородную зону подогретого дутья необходимо осуществлять в равных количествах на двух горизонтах с расстоянием между ними, равным длине кислородной зоны.

9. Замена кокса на антрацит в качестве топлива для низкошахтных печей в совокупности с подогревом до температур не ниже 400 °С и увлажнением дутья до 10 – 15 % обеспечивает высокие показатели шахтной плавки (температуру расплава и производительность печи), повышение тепловой эффективности печи (экономия 12,5 кг у.т./ т чугуна и повышение КПД на 5,5 %), снижение себестоимости производимой продукции за счет использования более дешевого топлива.

10. Разработаны на основе трактовки результатов теоретических и экспериментальных исследований методы интенсификации и энергоэффективные ресурсосберегающие технологии плавки чугуна и силикатных материалов в низкошахтных печах, внедренные и освоенные на предприятиях – ООО «Изолит-НК» (г. Новокузнецк); АО «Завод Универсал» (г. Новокузнецк); ЗАО «Гурьевский металлургический завод» (г. Гурьевск), АО «ЕВРАЗ – Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат» (г. Новокузнецк).

ОСНОВНЫЕ ТРУДЫ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в периодических изданиях, рекомендованных ВАК

1. Дилатантное поведение ваграночной шихты в период плавки / И.Ф. Селянин, А. В. Феоктистов, В. Б. Балыко [и др.] // Изв. вузов. Черная металлургия. – 2005. – № 8. – С. 45 – 46.

2. Определение оптимальных параметров вдувания угольной пыли в ваграночном процессе / И.Ф. Селянин, А.В. Феоктистов, С.А. Бедарев [и др.] // Литейщик России. – 2007. – № 8. – С. 15 – 18.
3. Технология ваграночной плавки чугуна и оксидных материалов с применением в качестве топлива антрацита / И.Ф. Селянин, А.В. Феоктистов, С.А. Бедарев [и др.] // Изв. вузов. Черная металлургия. – 2007. – № 12. – С. 36 – 39.
4. Теоретические основы обогащения дутья кислородом в ваграночном процессе / И.Ф. Селянин, А.В. Феоктистов, В.В. Пашков [и др.] // Изв. вузов. Черная металлургия. – 2007. – № 12. – С. 42 – 45.
5. Геометрические размеры лабораторных вагранок, шихты и топлива / И.Ф. Селянин, А.В. Феоктистов, С.А. Бедарев [и др.] // Заготовительные производства в машиностроении. – 2008. – № 4. – С. 10 – 11.
6. Технология подогрева и увлажнения дутья в ваграночном процессе / И.Ф. Селянин, А.В. Феоктистов, С.А. Бедарев [и др.] // Изв. вузов. Черная металлургия. – 2008. – № 6. – С. 44 – 45.
7. Селянин, И. Ф. К расчету состава ваграночных газов по заданной полноте горения твердого топлива / И.Ф. Селянин, А. В. Феоктистов, О.Г. Ротенберг // Изв. вузов. Черная металлургия. – 2008. – № 8. – С. 67 – 68.
8. О расчете оптимального соотношения содержания кислорода и природного газа в комбинированном дутье для шахтных печей / И.Ф. Селянин, А.В. Феоктистов, С.А. Бедарев [и др.] // Изв. вузов. Черная металлургия. – 2008. – № 8. – С. 31 – 33.
9. Механика движения материалов в шахтных печах и высота коксовой насадки / И.Ф. Селянин, А.В. Феоктистов, С.А. Бедарев [и др.] // Заготовительные производства в машиностроении. – 2008. – № 9. – С. 9 – 11.
10. Геометрические параметры шахтных печей, определенные по критериям конвективного теплообмена / И.Ф. Селянин, А.В. Феоктистов, С. А. Бедарев [и др.] // Заготовительные производства в машиностроении. – 2009. – № 1. – С. 11 – 13.
11. Селянин, И. Ф. Интенсификация технологического процесса в шахтных печах с применением комбинированного дутья / И.Ф. Селянин, А.В. Феоктистов, С. А. Бедарев // Изв. вузов. Черная металлургия. – 2010. – № 6. – С. 56 – 59.
12. Селянин, И. Ф. Влияние влажности и нагрева дутья на интенсификацию технологического процесса в шахтных печах / И.Ф. Селянин, А.В. Феоктистов, С.А. Бедарев // Изв. вузов. Черная металлургия. – 2010. – № 8. – С. 35 – 37.
13. Селянин, И. Ф. Шахтная печь малого диаметра для исследования ваграночного процесса / И.Ф. Селянин, А.В. Феоктистов, С.А. Бедарев // Изв. вузов. Черная металлургия. – 2010. – № 8. – С. 54 – 56.
14. Феоктистов, А. В. Исследование фракционного состава топлива при плавке чугуна в лабораторной вагранке / А.В. Феоктистов // Изв. вузов. Черная металлургия. – 2011. – № 12. – С. 23 – 26.
15. Определение расхода воздуха в вагранке по количеству сгоревшего топлива / А.В. Феоктистов, К.М. Шакиров, С.А. Бедарев [и др.] // Металлургия машиностроения. – 2012. – № 6. – С. 5 – 7.
16. Теплотехнический расчет рекуператора для ваграночного комплекса / И.Ф. Селянин, А.В. Феоктистов, С.А. Бедарев [и др.] // Литейщик России. – 2012. – № 10. – С. 33 – 36.

17. Установка для исследования прочности твердого топлива, используемого в шахтных печах / И.Ф. Селянин, А.В. Феоктистов, И.Н. Филинберг [и др.] // Изв. вузов. Черная металлургия. – 2012. – № 6. – С. 23 – 26.

18. Феоктистов, А. В. Опыт эксплуатации ваграночного рекуператора конструкции «труба в трубе» / А.В. Феоктистов / Изв. вузов. Черная металлургия. – 2012. – № 12. – С. 68 – 69.

19. Расчетный способ определения расхода воздуха в ваграночном процессе по количеству сгоревшего топлива // И.Ф. Селянин, А.В. Феоктистов, С.А. Бедарев [и др.] // Изв. вузов. Черная металлургия. – 2013. – № 8. – С. 21, 22.

20. Феоктистов, А. В. Геометрические параметры вагранки и высоты столба шихты при замене кокса на антрацит и тощие угли / А.В. Феоктистов // Известия Изв. вузов. Черная металлургия. – 2013. – № 11. – С. 70, 71.

21. Феоктистов, А. В. Анализ сил, действующих на коксовую или угольную топливную насадку в шахтных печах малого диаметра (вагранках) / А.В. Феоктистов, О.Г. Модзелевская // Изв. вузов. Черная металлургия. – 2014. – № 4. – С. 29 – 34.

22. Высокотемпературное моделирование движения газов и кокса в фурменном очаге вагранки / А.В. Феоктистов, А.Г. Чернятевич, Е.В. Протопопов [и др.] // Изв. вузов. Черная металлургия. – 2014. – № 6. – С. 25 – 30.

23. Ваграночный комплекс с использованием в качестве топлива антрацита и тощих углей // А.В. Феоктистов, Е.В. Протопопов, С.А. Бедарев [и др.] // Металлург. – 2014. – № 10. – С. 24 – 27.

24. Особенности физического моделирования теплообменных и аэродинамических параметров ваграночного процесса / А.В. Феоктистов, О.Г. Модзелевская, С.А. Бедарев [и др.] // Изв. вузов. Черная металлургия. – 2014. – Т. 57, № 10. – С. 10 – 14.

25. Шихта ваграночной плавки при замене кокса на угли / А.В. Феоктистов, Е.В. Протопопов, С.А. Бедарев [и др.] // Литейщик России. – 2014. – №11. – С. 21 – 23.

26. Феоктистов, А. В. Определение относительной прочности твердого топлива при различном соотношении содержаний кокса и антрацита в топливных колошах в шахтных печах/ А.В. Феоктистов, О.Г. Модзелевская, С.А. Бедарев // Изв. вузов. Черная металлургия. – 2014. – Т. 57, № 12. – С. 37 – 39.

27. Термогравиметрический анализ изменения параметров литейного кокса и антрацита / А.В. Феоктистов, Н.Ф. Якушевич, В.М. Страхов [и др.] // Изв. вузов. Черная металлургия. – 2015. – Т. 58, № 11. – С. 837 – 845.

28. Оценка тепловой эффективности низкошахтных печей при применении различных видов топлив / А.В. Феоктистов, А.П. Скуратов, И.Ф. Селянин [и др.] // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2016. – № 8 (115). – С. 146 – 153.

Монографии

1. Селянин, И. Ф. Теория и практика интенсификации технологического процесса в шахтных печах малого диаметра. В 3-х т. Т. 1 / И.Ф. Селянин, А.В. Феоктистов, С.А. Бедарев. – Москва : Теплотехник, 2010. – 379 с.

2. Феоктистов, А. В. Теоретические основы разработки ресурсосберегающих технологий и интенсификации ваграночного процесса / А.В. Феоктистов. – Москва : Теплотехник, 2012. – 280 с.

Статьи в других изданиях

1. Экспериментальное и аналитическое определение скорости движения дисперсных частиц по каналам слоя топлива / А.В. Феоктистов, О.Г. Модзелевская, И.Ф. Селянин [и др.] // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. – 2015. – № 3 (13). – С. 9–13.

2. Практика и перспективы промышленного применения низкошахтных печей / А.В. Феоктистов, А.П. Скуратов, И.Ф. Селянин [и др.] // Вестник Российской академии естественных наук. Западно-Сибирское отделение : сб. науч. тр. / Сиб. гос. индустр. ун-т ; ред. кол.: Е.В. Протопопов (главн. ред.) [и др.]. – Новокузнецк : СибГИУ, 2016. – Вып. 18. – С. 69–77.

3. Исследование тепловой эффективности низкошахтных печей при обогащении дутья кислородом / А.В. Феоктистов, А.П. Скуратов, И.Ф. Селянин [и др.] // Вестник горно-металлургической секции Российской академии естественных наук. Отделение металлургии : сб. науч. тр. / Сиб. гос. индустр. ун-т ; ред. кол.: Е.В. Протопопов (главн. ред.) [и др.]. – Новокузнецк : СибГИУ, 2016. – Вып. 36. – С. 70–77.

4. Совершенствование комплексной детерминированной математической модели процесса плавки материалов в твердотопливной низкошахтной печи / А.В. Феоктистов, А.П. Скуратов, И.Ф. Селянин [и др.] // Вестник горно-металлургической секции Российской академии естественных наук. Отделение металлургии : сб. науч. тр. / Сиб. гос. индустр. ун-т ; ред. кол.: Е.В. Протопопов (главн. ред.) [и др.]. – Новокузнецк : СибГИУ, 2016. – Вып. 36. – С. 78–94.

Труды научно-практических конференций и иностранные публикации

1. Обогащение дутья кислородом в ваграночном процессе. Экспериментальные данные. Аналитический анализ данных лабораторных и промышленных испытаний / И.Ф. Селянин, А.В. Феоктистов, В.А. Мыльников [и др.] // Перспективные промышленные технологии и материалы : науч. тр. СибГИУ / Сиб. гос. индустр. ун-т ; отв. ред. В.Е. Громов, С.М. Кулаков. – Новосибирск, 2004. – С. 197–212.

2. Основные подходы к определению конструкции лабораторных вагранок / И.Ф. Селянин, А.В. Феоктистов, С.А. Бедарев [и др.] // Вестник горно-металлургической секции Российской академии естественных наук. Отделение металлургии : сб. науч. тр. / Сиб. гос. индустр. ун-т ; под ред. проф. Г.В. Галевского. – Новокузнецк, 2008. – Вып. 21. – С. 33–35.

3. Применение антрацита для повышения эффективности плавления минерального сырья в вагранке / И.Ф. Селянин, А.В. Феоктистов, В.В. Пашков [и др.] // Техника и технология производства теплоизоляционных материалов из минерального сырья : докл. 13 всерос. науч.-практ. конф., 21–23 мая 2008 г., Белокураиха – Бийск : БТИ АлтГТУ, 2008. – С. 48–51.

4. Селянин, И. Ф. Интенсификация ваграночного процесса при плавке чугуна и оксидных материалов на антраците / И.Ф. Селянин, А.В. Феоктистов, С.А. Бедарев // Прогрессивные литейные технологии : тр. 4-ой Междунар. науч.-практ. конф., 22–28 октября 2008 г. / МИСиС ; под ред. проф. В.Д. Белова. – Москва, 2007. – С. 87–90.

5. Селянин, И. Ф. Лабораторный комплекс для исследования ваграночного процесса / И.Ф. Селянин, А.В. Феоктистов, С.А. Бедарев // Ползуновский альманах. – Барнаул : АлтГТУ, 2010. – № 1. – С. 207 – 209.

6. Феоктистов, А. В. Исследование фракционного состава топлива при плавке чугуна на лабораторно-ваграночном комплексе / А.В. Феоктистов // Вестник горно-металлургической секции Российской академии естественных наук. Отделение металлургии : сб. науч. тр. / Сиб. гос. индустр. ун-т ; ред. кол.: Л.П. Мышляев (главн. ред.) [и др.]. – Новокузнецк : СибГИУ, 2011. – Вып. 28. – С. 43 – 47.

7. Феоктистов, А. В. Теоретические основы и практика промышленной эксплуатации современных ваграночных комплексов / А.В. Феоктистов // Теория и практика литейных процессов : сб. тр. Всерос. науч.-практ. конф. – Новокузнецк, 2012. – С. 15 – 33.

8. Selyanin, I. F. Utilization of Oxidized Cast-Iron and Steel Scrap in Small-Diameter Shaft Furnaces / I.F. Selyanin, A.V. Feoktistov, S.A. Bedarev // Steel in Translation. – 2009. – № 6. – P. 460 – 462.

9. Feoktistov, A. V. Technology of Cast Iron and Oxide Materials Cupola Melting with Anthracite Used as a Fuel / A.V. Feoktistov, I.F. Selyanin, S.A. Bedarev // World Applied Sciences Journal. – 2012. – V. 20. – P. 324 – 331.

10. Разработка ресурсосберегающих технологий ваграночного процесса на специализированном исследовательском комплексе / И.Ф.Селянин, А.В. Феоктистов, О.Г. Модзелевская [и др.] // Металлургия: технологии, управление, инновации, качество : сб. тр. Всерос. науч.-практ. конф. – Новокузнецк, 2014. – С. 150 – 155.

11. Physical modeling of cupola processes / A.V. Feoktistov, O.G. Modzelevskaya, S.A. Bedarev [et al.] // Steel in Translation. – 2015. – V. 44. – № 10. – P. 707 – 711.

12. Cupola complex operated with the use of anthracite and lean coals as fuel / A.V. Feoktistov, E.V. Protopopov, S.A. Bedarev [et al.] // Metallurgist. – 2015. – V. 58. – № 9 – 10. – P. 849 – 852.

Патенты, свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ и базы данных

1. Пат. 2350659 Российская Федерация, МПК F27B1/00, C21C1/08. Способ ваграночной плавки чугуна и оксидных материалов на антраците / И.Ф. Селянин, А.В. Феоктистов, С.А. Бедарев [и др.] ; ГОУ ВПО «СибГИУ». – № 2007139393/02 ; заявл. 23.10.07 ; опубл. 27.03.09. – 6 с.

2. Пат. 2378388 Российская Федерация, МПК F27B1/00, C21C1/08. Способ ваграночной плавки чугуна и оксидных материалов на антраците / В.В. Пашков, И.Ф. Селянин, А.В. Феоктистов [и др.]. – № 2007119705/02 ; заявл. 28.05.07 ; опубл. 10.01.10. – 6 с.

3. Пат. 89682 Российская Федерация, МПК F27B1/00, F23L15/04. Рекуператор вагранки / В.В. Пашков, И.Ф. Селянин, А.В. Феоктистов [и др.] ; ГОУ ВПО «СибГИУ». – № 2009128152/22 ; заявл. 21.07.09 ; опубл. 10.12.09. – 2 с.; 1 л. ил.

4. Пат. 89683 Российская Федерация, МПК F27B1/00. Рекуператор вагранки / В.В. Пашков, И.Ф. Селянин, А.В. Феоктистов [и др.] ; ГОУ ВПО «СибГИУ». – № 2009128151/22 ; заявл. 21.07.09 ; опубл. 10.12.09. – 2 с.; 1 л. ил.

5. Пат. 89684 Российская Федерация, МПК F27B1/00. Рекуператор вагранки / В.В. Пашков, И.Ф. Селянин, А.В. Феоктистов [и др.] ; ГОУ ВПО «СибГИУ». – № 2009128149/22 ; заявл. 21.07.09 ; опубл. 10.12.09. – 2 с. ; 1 л. ил.

6. Пат. 2407804 Российская Федерация, МПК С 21С1/08, С03В5/12. Способ ваграночной плавки на тощих углях / А.В. Феоктистов, И.Ф. Селянин, С.А. Бедарев [и др.]; ГОУ ВПО «СибГИУ». – № 2009100337/02 ; заявл. 11.01.09 ; опубл. 27.12.10. – 6 с.

7. Пат. 99135 Российская Федерация, МПК F28D1/00. Рекуператор вагранки / И.Ф. Селянин, В.В. Пашков, А.В. Феоктистов [и др.] ; ГОУ ВПО «СибГИУ». – № 2010125296/02 ; заявл. 18.06.10 ; опубл. 10.11.10. – 2 с. ; 1 л. ил.

8. Пат. 2394106 Российская Федерация, МПК С21С1/08, F27B1/00. Способ ваграночной плавки чугуна и оксидных материалов / И.Ф. Селянин, А.В. Феоктистов, С.А. Бедарев [и др.]; ГОУ ВПО «СибГИУ». – № 2009100336/02 ; заявл. 11.01.09 ; опубл. 10.07.10. – 5 с.

9. Пат. 96963 Российская Федерация, МПК G01N1/18, G01N33/22. Лабораторная установка для исследования прочности твердого топлива / И.Ф. Селянин, А.И. Куценко, А.В. Феоктистов [и др.]; ГОУ ВПО «СибГИУ». – № 2010110764/22 ; заявл. 22.03.10 ; опубл. 20.08.10. – 2 с. ; 1 л. ил.

10. Пат. 106953 Российская Федерация, МПК G01N1/18. Установка для определения прочности твердого топлива / И.Ф. Селянин, А.И. Куценко, А.В. Феоктистов [и др.] ; ГОУ ВПО «СибГИУ». – № 2010148931/05 ; заявл. 30.11.10 ; опубл. 27.07.11. – 2 с. ; 1 л. ил.

11. Пат. 102386 Российская Федерация, МПК G01N33/22. Установка для определения прочности твердого топлива / И.Ф. Селянин, А.И. Куценко, А.В. Феоктистов, [и др.] ; ГОУ ВПО «СибГИУ». – № 2010140641/15 ; заявл. 04.10.10 ; опубл. 27.02.11. – 2 с. ; 1 л. ил.

12. Пат. 99616 Российская Федерация, МПК G01N33/22. Лабораторная установка для исследования прочности твердого топлива / И.Ф. Селянин, А.И. Куценко, А.В. Феоктистов [и др.] ; ГОУ ВПО «СибГИУ». – № 2010110765/05 ; заявл. 22.03.10 ; опубл. 20.11.10. – 2 с. ; 1 л. ил.

13. Пат. 2438124 Российская Федерация, МПК G01N33/22. Способ определения прочности твердого топлива и устройство для ее определения / И.Ф. Селянин, А.В. Феоктистов, А.И. Куценко [и др.]; ГОУ ВПО «СибГИУ». – № 2010110979/28 ; заявл. 22.03.10 ; опубл. 27.12.11. – 2 с. ; 2 л. ил.

14. Пат. 150948 Российская Федерация, МПК В65G53/46. Питатель пневмотранспорта мелкодисперсных материалов / А.В. Феоктистов, В.В. Пашков, И.Ф. Селянин [и др.]; ФГБОУ ВПО «СибГИУ». – № 2014139768/11 ; заявл. 30.09.14 ; опубл. 10.03.15. – 2 с. ; 1 л. ил.

15. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. 2011617034 Российская Федерация. Расчет технологических параметров ваграночного рекуператора конструкции «труба в трубе» / И.Ф. Селянин, А.В. Феоктистов, С.А. Бедарев [и др.] ; заявл. 12.07.11 ; зарег. 09.09.11.

16. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. 2012660713 Российская Федерация. Расчет состава газовой фазы кислородной зоны по высоте холостой колоши для построения номограмм ваграночного

процесса / И.Ф. Селянин, А.В. Феоктистов, С.А. Бедарев [и др.] ; заявл.08.10.12 ; зарег. 28.11.12.

17.Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. 2012660714 Российская Федерация. Расчет состава газовой фазы кислородной и восстановительной зон для построения номограмм ваграночного процесса / И.Ф. Селянин, А.В. Феоктистов, С.А. Бедарев [и др.] ; заявл. 08.10.12 ; зарег. 28.10.12.

18.Свидетельство о государственной регистрации базы данных. 2012620487. Российская Федерация. Определение прочности твердого топлива при горении в шахтных печах / А.В. Феоктистов, И.Ф. Селянин, С.А. Бедарев [и др.] ; ФГБОУ ВПО «СибГИУ». – № 2012620227 ; заявл. 02.04.12 ; зарег. 30.05.12.

19.Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. 2015619033 Российская Федерация. Программа расчёта горения пылеугольного топлива в шахтной печи «Pylgar» / И.Ф. Селянин, А.А. Куценко, О.Г. Модзелевская, А.И. Куценко, А.В. Феоктистов ; заявл. 25.06.15 ; зарег. 21.08.15.

Подписано в печать _____

Формат бумаги 60×84 1/16. Бумага писчая. Печать цифровая.

Усл. печ. л. 2,0 Тираж 100 экз. заказ ____

ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный
университет»

654007, г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42

Издательский центр СибГИУ