На правах рукописи

ИСТОМИН Александр Сергеевич

РАЗРАБОТКА ЛОГИКО-ДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ С ЦЕЛЬЮ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВЫПЛАВКИ ЧУГУНА В ДОМЕННОЙ ПЕЧИ

05.16.02 – Металлургия черных, цветных и редких металлов

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Екатеринбург – 2017

Работа выполнена на кафедре «Теплофизика и информатика в металлургии» ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
СПИРИН Николай Александрович

Официальные оппоненты: **ДМИТРИЕВ Андрей Николаевич,** доктор технических наук, ФГБУН Институт металлургии Уральского отделения Российской академии наук, г. Екатеринбург, главный научный сотрудник лаборатории пирометаллургии черных металлов;

НЕЧКИН Георгий Александрович, кандидат технических наук, ОАО «Уральский институт металлов», г. Екатеринбург, заведующий лабораторией подготовки и качества железорудного и минерального сырья Научно-исследовательского центра подготовки сырья и руднотермических процессов

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет», г. Новокузнецк

Защита состоится «13» октября 2017 г. в 15:00 ч на заседании диссертационного совета Д 212.285.05 на базе ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» по адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира 19, ауд. И-420 (зал Ученого совета).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», http://lib.urfu.ru/mod/data/view.php?d=51&rid=269998

Автореферат разослан «___» августа 2017 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета Сулицин Андрей Владимирович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Для совершенствования технологии выплавки чугуна и решения задач управления такими сложными и энергоёмкими технологическими агрегатами как доменные печи должны использоваться интеллектуальные системы управления, включая блок прогнозирования. Анализ состояния вопроса по реально используемым математическим моделям в практике управления доменной плавкой в режиме реального времени позволяет констатировать, что в настоящее время такие методы и соответствующее программное обеспечение практически не разработаны, что определяет актуальность работы.

Степень разработанности темы исследования

Степень разработанности темы исследований недостаточна. Практически отсутствуют математические модели, позволяющие в режиме реального времени с учетом динамики процесса, прогнозировать тепловой, газодинамический и шлаковый режимы доменной плавки.

Анализ современного состояния управления доменной плавкой позволяет сделать вывод о том, что в первую очередь следует сосредоточиться на решении следующих научных проблем:

– разработке и исследованию динамической математической модели доменного процесса в целом и по отдельным каналам контроля и управления;

– поиску, исследованию, идентификации параметров состояния и прогнозу показателей доменного процесса.

Цель работы: повышение эффективности выплавки чугуна на основе разработки логико-динамической модели доменной плавки.

Задачи исследования:

1. Разработка структуры и функциональной модели логико-динамической подсистемы поддержки принятия решений для анализа и прогноза доменной плавки с учетом требований технологического персонала.
2. Усовершенствование математической модели доменного процесса УрФУ-ММК за счет учета динамики процесса и введения логической подсистемы диагностики хода доменной плавки.
3. Разработка математического, алгоритмического и программного обеспечения логико-динамической подсистемы поддержки принятия решений доменной плавки.
4. Интеграция логико-динамической подсистемы в информационно-моделирующую систему поддержки принятия решений доменного процесса УрФУ-ММК и решение технологических задач оценки и прогнозирования хода доменной плавки.

Научная новизна:

1. Разработана функциональная модель логико-динамической подсистемы поддержки принятия решений для управления доменной плавкой.
2. Усовершенствована математическая модель диагностики состояния и прогнозирования хода доменной плавки УрФУ-ММК за счет разработки логической подсистемы, использующей комплекс контролируемых параметров и расчетных по модели показателей.
3. Усовершенствована математическая модель доменного процесса УрФУ-ММК, позволяющая рассчитывать переходные процессы по различным каналам воздействий и прогнозировать параметры доменной плавки в реальном времени в количественном выражении.
4. Создана совокупность алгоритмов модельной системы поддержки принятия решений, позволяющих количественно оценивать ход доменной плавки и распознавать виды и вероятность отклонения плавки от нормального режима.
5. Разработано алгоритмическое и программное обеспечение логико-динамической подсистемы диагностики и прогноза хода доменной плавки.

Теоретическая и практическая значимость работы

Теоретическая значимость

– Разработаны принципы создания логико-динамической модели подсистемы поддержки принятия решений для стабилизации параметров доменной плавки в режиме реального времени.

– При создании математического, алгоритмического и программного обеспечения учтены значительные запаздывания в объекте, существенная инерционность в развитии процессов тепло- и массообмена и многовариантность возможных решений.

Практическая значимость

Разработанные математическое, алгоритмическое и программное обеспечения найдут практическое применение:

– при решении комплекса технологических задач по управлению доменной плавки в режиме реального времени;

– при совершенствовании режимов работы и систем управления технологическими, в частности металлургическими объектами;

– при разработке автоматизированных рабочих мест инженерно-технологического персонала сложных технологических объектов в металлургии;

– в преподавании дисциплин для студентов вузов соответствующих специальностей.

Использование результатов работы. Пакеты прикладных программ «Распознавание вида отклонений доменной плавки от нормального режима», «Моделирование динамики доменного процесса при изменении состава и

свойств железорудного сырья и кокса, дутьевых параметров» переданы управлению информационных технологий ОАО «ММК» для испытаний. Материалы диссертации внедрены в учебный процесс в ФГАОУ ВО УрФУ для подготовки *магистров* по направлениям: 22.04.02 – «Металлургия», образовательная программа «Металлургия черных, цветных и редких металлов; 09.04.02 – «Информационные системы и технологии», образовательная программ «Информационные системы и технологии в металлургии»; *бакалавров* по направлению 22.03.02 – «Металлургия», образовательная программа «Металлургия»; 09.03.02 – «Информационные системы и технологии», образовательная программа «Информационные системы и технологии в металлургии».

Методология и методы исследования

Базируются на закономерностях физико-химических, гидро-газодинамических процессов, протекающих в доменной печи; положениях теории тепло- и массообмена; на обобщении опыта инженерно-технологического персонала по управлению доменной плавкой; на использовании методов математического моделирования; на современных принципах разработки алгоритмического и программного обеспечения.

Положения, выносимые на защиту:

1) функциональная модель и структура логико-динамической подсистемы поддержки принятия решений доменной плавки;

2) усовершенствованная динамическая математическая модель доменного процесса, позволяющая прогнозировать параметры доменной плавки в реальном времени;

3) совокупность алгоритмов модельной системы поддержки принятия решений, позволяющих по реально доступной информации количественно оценивать ход доменной плавки и распознавать виды и вероятность отклонения плавки от нормального режима;

4) алгоритмическое и программное обеспечения логико-динамической подсистемы диагностики и прогноза хода доменной плавки.

Степень достоверности полученных результатов доказана соответствием полученных результатов современным закономерностям доменного процесса, сопоставлением результатов моделирования с производственными данными, соответствием общепринятой системе оценки явлений доменной плавки, а также использованием современных методов, технологии и средств разработки программного обеспечения, предназначенного для решения технологических задач.

Личный вклад автора состоит в разработке функциональной модели и структуры логико-динамической подсистемы поддержки принятия решений доменной плавки; усовершенствовании математической модели диагностики состояния и прогнозирования хода доменной плавки УрФУ-ММК; разработке

алгоритмического и программного обеспечения логико-динамической подсистемы диагностики и прогноза хода доменной плавки; анализе технологических показателей доменной плавки.

Апробация работы

Основные результаты диссертационной работы были доложены и обсуждены на конференциях *международного уровня: «*Многоконцептуальность в науке» (Екатеринбург, 2011); *«*Творческое наследие В. Е. Грум-Гржимайло: история, современное состояние, будущее» (Екатеринбург, 2014); «Энергосберегающие технологии в промышленности. Печные агрегаты. Экология» (Москва, 2014), «Перспективы развития металлургии и машиностроения с использованием завершенных фундаментальных исследований и НИОКР» (Екатеринбург, 2015); «Современные научные достижения металлургической теплотехники и их реализация в промышленности» (Екатеринбург, 2015); *всероссийского уровня*: III и IV научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Теплотехника и информатика в образовании, науке и производстве ТИМ’2014, ТИМ’2015» (Екатеринбург, 2014, 2015); IX и X научно-практической конференции «Системы автоматизации в образовании, науке и производстве AS'2013, AS'2015» (Новокузнецк, 2013, 2015); III и IV научно-практической конференции «Моделирование и наукоемкие информационные технологии в технических и социально-экономических системах» (Новокузнецк, 2011, 2016).

Публикации

По материалам диссертационной работы опубликовано 16 научных работ, в том числе 5 статей в рецензируемых научных журналах, входящих в перечень ВАК, из них 2 статьи представлены в изданиях, индексируемых в Scopus (WOS), а также получено 3 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем работы

Диссертационная работа изложена на 181 странице машинописного текста, включая 41 рисунок, 18 таблиц, и состоит из общей характеристики работы, 5 глав, заключения, библиографического списка из 133 источников отечественных и зарубежных авторов, 6 приложений.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** сформулированы актуальность темы, цели и задачи работы, дана характеристика ее научной новизны и практической ценности, отражены внедрение результатов работы и ее апробация, приведены структура и объем диссертации.

В **первой главе** *«Состояние вопроса, постановка основных задач диссертационной работы»* проведен анализ состояния вопроса в области решения задач управления сложными металлургическими агрегатами (на примере доменного производства). Рассмотрены современные тенденции развития систем поддержки принятия решений для решения комплекса

технологических задач сложных технологических систем в металлургии, особенности управления доменной плавкой в современных условиях.

Анализ в целом состояния вопроса по реально используемым математическим моделям в практике решения технологических задач по управления доменной плавкой показал, что в настоящее время следует выделить научные и технические проблемы:

– использование современных достижений в области математического моделирования технологических процессов, моделирования знаний, распознавания образов для повышения эффективности выплавки чугуна в доменной печи;

– разработка на основе современных принципов математического, алгоритмического и программного обеспечения;

– создание интегрированных интеллектуальных компьютерных систем поддержки принятия решений для управления как доменной печью, так и комплексом доменных печей, цеха в целом.

На основании проведённого аналитического обзора состояния вопроса сформулированы цель и задачи работы.

Во **второй главе** «*Структура логико-динамической модели поддержки принятия решений для управления доменной плавкой в режиме реального времени»* рассмотрены вопросы функционального моделирования, структурной декомпозиции системы поддержки принятия решений для управления доменной печью в режиме реального времени с учетом современных требований выплавки чугуна. Структура логико-динамической модели поддержки принятия решений для управления доменной печью в режиме реального времени представлена на рисунке 1.

Основными подсистемами являются:

1. Подсистема диагностики отклонений хода доменной плавки от нормального режима. Эта подсистема призвана в режиме реального времени отслеживать показатели доменной плавки и на их основе в численном выражении указывать на возможное наличие отклонения от нормального режима. В случае обнаружения такого отклонения подсистема определяет его вид и вероятность возникновения.

2. Подсистема моделирования динамики доменного процесса. В рамках данной подсистемы отслеживается изменение входных параметров доменной плавки и их влияние на тепловое состояние доменной печи.

Декомпозиция первого уровня функциональной модели приведена на рисунке 2. В основу метода, используемого при проектировании автоматизированной логической подсистемы поддержки принятия решений, положены идеи и методики структурного анализа и проектирования IDEF0. Использование этой методики позволило создать функциональную структуру программного комплекса, выявить производимые им действия и связи между

этими действиями, управляющие воздействия и механизмы выполнения каждой функции.

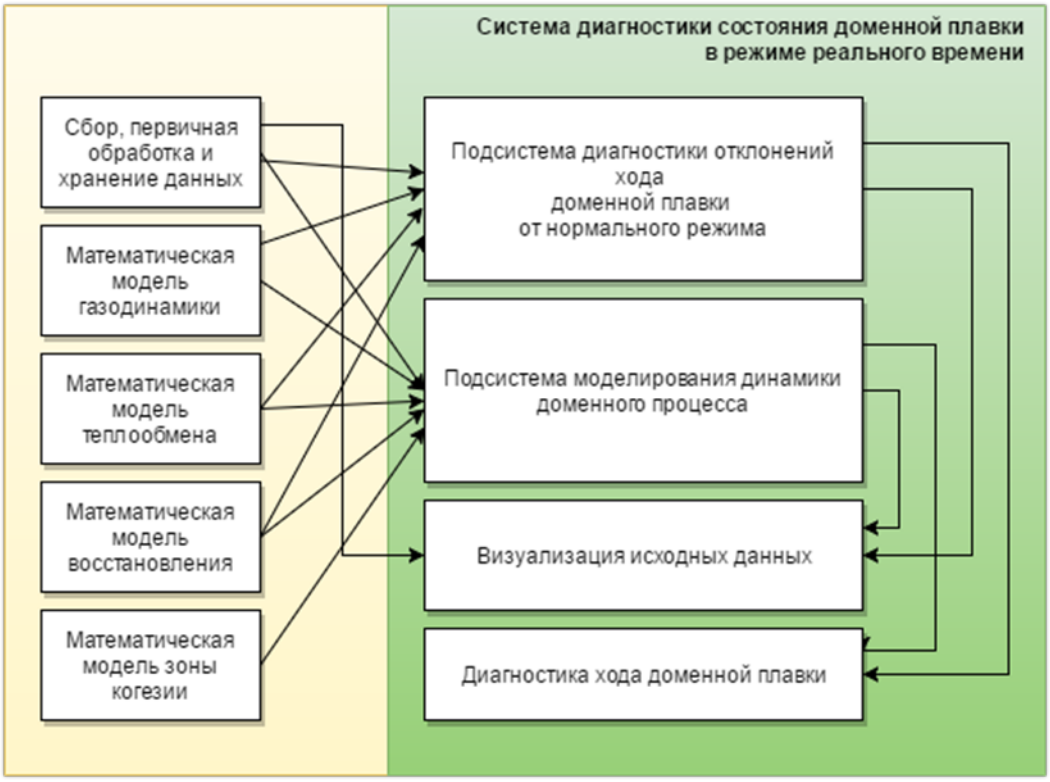

Рисунок 1 – Структура логико-динамической модели поддержки принятия решений для управления доменной печью в режиме реального времени

Функция «Использование существующих программных пакетов для диагностики и управления доменной плавкой» (А2). В ходе проведения расчетов состояния доменной плавки использован значительный объем информации, часть из которой является измеряемой и непосредственно используется в качестве исходных данных в модели, другая часть параметров – расчетные. Для определения расчетных параметров используется существующее программное обеспечение, разработанное в УрФУ ранее, и реализованное в соответствующих модулях информационной системы управления доменной плавкой.

Функция «Диагностика отклонений хода доменной плавки от нормального режима» (А3). Данная функция представляет собой отдельный раздел настоящего исследования, в котором сосредоточен материал по решению задачи оценки текущего состояния хода доменной плавки. Для ее решения использован набор как измеряемых, так и расчетных параметров. В случае отклонения от нормального хода проводится дальнейший анализ с целью установления того или иного вида отклонения в ходе плавки, а также вероятность его возникновения. Всего в расчетах используется 94 признака.

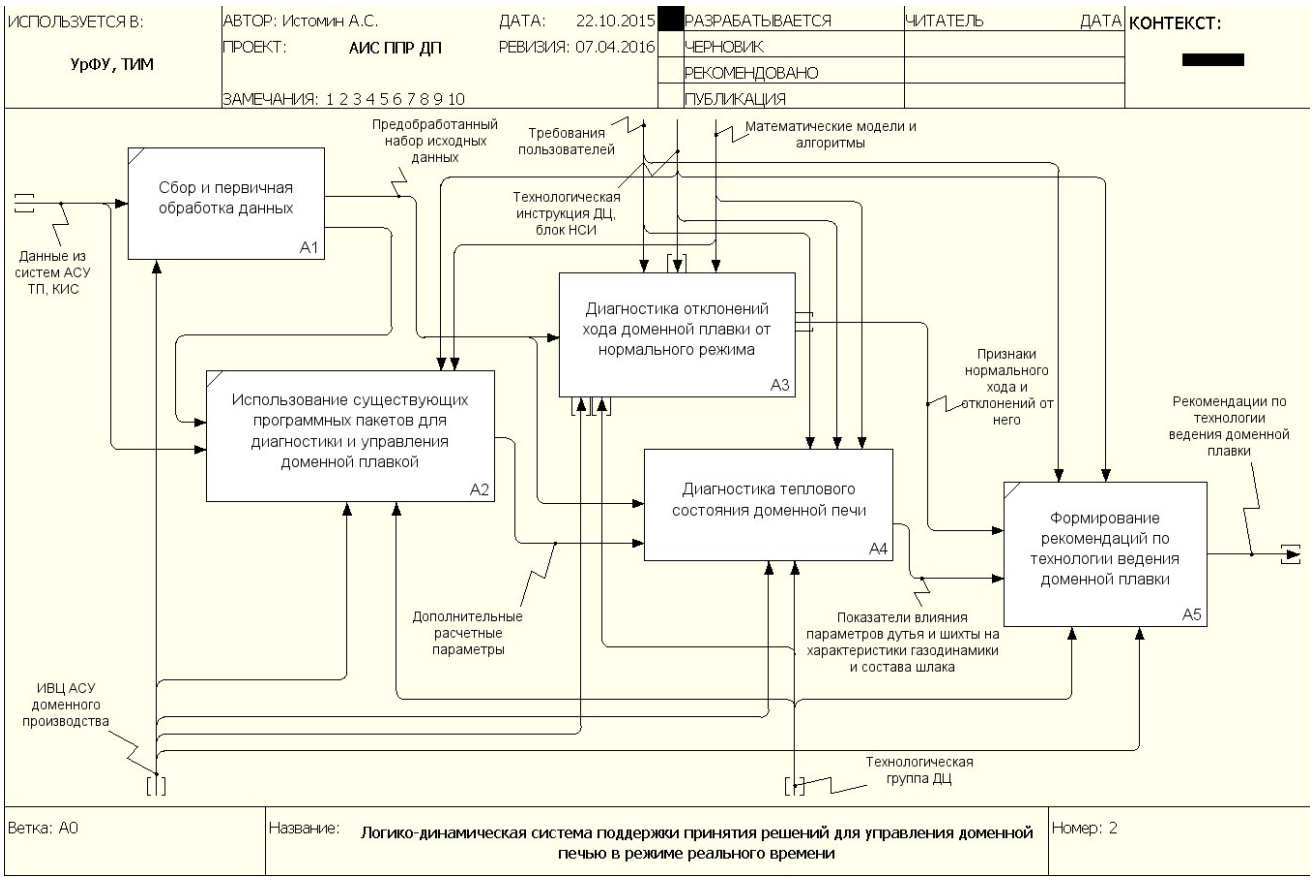

Рисунок 2 – Декомпозиция первого уровня функциональной модели

Функция «Диагностика теплового состояния доменной печи» (A4) описывает задачи, решение которых позволяет диагностировать тепловое состояние печи путем прогнозирования изменения содержания кремния в чугуне в динамике на основе данных об изменении параметров дутья и шихтовых материалов. При этом дополнительно решается ряд смежных задач, например, определение газодинамических показателей работы печи в зависимости от изменения рудной нагрузки. Для решения описанных задач применяется комбинированный подход на основе математических моделей доменного процесса, созданных в УрФУ и ВНИИМТ.

Функция «Формирование рекомендаций по технологии ведения доменной плавки» (A5) подводит итог вычислениям, выполненным по алгоритмам двух предыдущих функций. Назначение данного блока в информировании пользователя о ходе доменного процесса как в виде оперативной информации, представленной в графическом интерфейсе, так и в виде отчетной информации за указанный промежуток времени.

В диссертации проиллюстрирована методология дальнейшей декомпозиции модели (до третьего уровня включительно) функций *A2, A3, A4* и *A5*, вклад которых, с точки зрения обработки информации, наиболее существенен для успешного функционирования системы.

Третья глава *«Математическое, алгоритмическое и информационное обеспечение логической подсистемы диагностики хода доменной плавки»* посвящена решению задач по диагностике режимов доменной плавки.

Распознавание нормального режима работы доменной печи

При нормальном режиме работы отклонение по модулю *i*-го признака ΔX_i, характеризующего работу печи в базовом $X_i^Б$ (заданные значения) и проектном периодах $X_i^П$ не должно превышать допустимого значения $\Delta X_i^{доп}$, которое является настройкой модели.

$$\Delta X_i = \left| X_i^Б - X_i^П \right| \le \Delta X_i^{доп}. \qquad (1)$$

Если условие (1) выполняется («Истина»), то значению *i*-го идентификатора признака P_i присваивается значение «1», в противном случае («Ложь») – значение «0». При этом все признаки ранжируются. Каждому из них присваивается значение его ранга R_i изменяющегося в диапазоне от «0» до «1», определяемого методом экспертного оценивания.

Вероятность нормальной работы доменной печи ($B_н$), рассчитывается по следующему соотношению:

$$B_н = \sum_{i=1}^{n} \left(P_i \times \frac{R_i}{\sum_{i=1}^{n} R_i} \right) = \sum_{i=1}^{n} \left(P_i \times \alpha_i \right), \qquad (2)$$

где α_i – весовой коэффициент *i*-го идентификатора признака, изменяющийся в диапазоне от 0 до 1; *n* – число признаков.

В расчетах принимались следующие условия: если вероятность $B_н$ более 0,8 (нормативно-справочная информация), то доменная плавка имеет ровный ход плавки без существенных отклонений от заданного режима; если вероятность $B_н$ находится в диапазоне от 0,6 до 0,8 (нормативно-справочная информация), то на рассматриваемой печи присутствует нормальный режим плавки; в ином случае на печи присутствует неровный ход печи и необходимо корректировать ход печи для ликвидации отклонений плавки от нормального режима.

Для распознавания нормального режима работы доменной печи значения показателей $X_i^Б$ используются для настройки модели и корректируются для условий работы конкретной доменной печи. Число контролируемых признаков, используемых в модели для распознавания нормального режима работы доменной печи, составляет 12. В отличие от известных работ других авторов в данном исследовании осуществляется интеграция комплексов контролируемых признаков и расчетных параметров доменной плавки. В математическом и программном обеспечении используется дополнительно комплекс 9 основных расчетных показателей, используемых в модели доменного процесса УрФУ-

ММК и адаптируемых применительно к условиям ОАО «ММК». Таким образом, число признаков достигает 21.

Основные комплексные расчетные параметры для диагностики хода доменной плавки относятся к следующим режимам:

– тепловой режим – обобщенные параметры, характеризующие тепловое состояние: верхней (индекс теплового состояния шахты) и нижней части доменной печи (индекс теплового состояния низа);

– газодинамический режим – степень уравновешивания шихты газом в верхней и нижней частях печи, в отдельных кольцевых зонах и др. Прогнозирование и расчет критических газодинамических параметров доменной плавки;

– шлаковый режим – вязкость и политермы вязкости конечного шлака: вязкость шлака при заданной температуре, градиент вязкости шлака в диапазоне от 2,5 до 0,7 Па*с, Па*с/ °С, градиент вязкости шлака в пределах от 1400 до 1500°С, Па*с / °С;

– интенсивность проплавки (объём проплавленной шихты за единицу времени, м^3/ мин.). Является аналогом скорости схода шихты на колошнике печи.

Распознавание отклонений от нормального режима доменной печи

Предусмотрена диагностика следующих отклонений от нормального режима доменной печи:

1. Нарушение устойчивости газового потока (периферийный, центральный газовые потоки).
2. Нарушение теплового режима плавки (горячий и холодный ход плавки).
3. Нарушение ровного схода шихты в печи (подвисание шихты: верхнее и нижнее, тугой ход).

Для выявления вида отклонения плавки от нормального режима работы доменной печи сочли целесообразным использовать сравнение между собой параметров двух периодов – базового, для которого значения параметров плавки $X_i^Б$ являются настройкой модели и характеризует его нормальный режим работы. Вторым для распознавания видов отклонения от нормального режима работы доменной печи выбирается проектный период, в котором производится сбор информации в течении 2 часов.

При наличии отклонения от нормального режима доменной плавки разность значений *i*-го признака ΔX_i, характеризующего работу печи в базовом $X_i^Б$ и проектном периодах $X_i^П$, превышает допустимое значения $\Delta X_i^{доп}$

$$\Delta X_i = \left(X_i^Б - X_i^П\right) \geq \Delta X_i^{доп}. \qquad (3)$$

Вероятность распознавания видов отклонения от нормального режима, значение критерия $B_н^{отк}$ рассчитывается по соотношению, аналогичному уравнению 2.

Диагностика видов отклонений от нормального режима доменной плавки, количество контролируемых и расчетных (по модели) параметров для оценки этих режимов представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Количество контролируемых и расчетных (по модели) параметров для оценки видов отклонений от нормального режима доменной плавки

Вид отклонений от нормального режима	Количество контро-лируемых параметров	Количество комплексных расчетных параметров	Итого
Нарушение устойчивости газового потока:			
– периферийный газовый поток;	9	3	12
– центральный газовый поток.	8	2	10
Нарушение теплового режима плавки:			
– горячий ход плавки;	8	4	12
– холодный ход плавки.	7	5	12
Нарушение ровного схода шихты в печи:			
– верхнее подвисание шихты;	6	3	9
– нижнее подвисание шихты;	3	3	6
– тугой ход печи.	6	6	12
Итого:	47	26	73

Четвертая глава «*Математическое, алгоритмическое и информационное обеспечение подсистемы прогнозирования хода доменной плавки в режиме реального времени».* Выполненное математическое моделирование процессов нестационарного теплообмена в слое отдельно к условиям верхней и нижней ступеней теплообмена показывает, что общая закономерность заключается в апериодическом (не колебательном) характере переходных процессов. Однако это положение справедливо только при условии постоянства отношения теплоемкостей потоков материалов и газа по высоте рассматриваемого участка слоя, что в полной мере не отражает характера развития теплообменных процессов по высоте доменной печи. Таким образом, результаты моделирования процессов нестационарного теплообмена в слое, учитывающие тепловые эффекты процессов восстановления, наличие компонентов кокса, чугуна и шлака, причем каждая из них, в свою очередь, пребывает в состоянии теплообмена между собой, дают лишь количественную оценку длительности

переходных процессов и общие представления о характере переходных процессов в отдельных участках слоя, но не для печи в целом.

Моделирование динамики доменного процесса осуществляли в следующей последовательности.

По усредненным данным работы печи в базовом периоде (10 часов):

1. Расчет доменной шихты с определением удельного расхода кокса и железорудных материалов по методу А.Н. Рамма выполняется после ввода исходных данных как для базового, так и прогнозного вариантов.

2. Определение удельного выхода шлака и его состава, расхода флюса при заданной основности шлака, а также свойств конечного шлака.

3. Моделирование газодинамического режима доменной плавки.

4. Определение расположения и конфигурации зоны вязкопластичного состояния железорудных материалов.

5. Определение коэффициентов для проведения факторного анализа (коэффициентов передачи по различным каналам воздействий) по алгоритму УрФУ и оценка области применения линеаризованных моделей.

6. Расчет времени от начала загрузки шихты до момента ее прихода к фурмам (время одного оборота шихты).

7. Расчет переходных процессов газодинамического сопротивления слоя шихты при изменении состава железорудной части и содержания мелочи в агломерате (фр. 0-5 мм).

8. Расчет переходных процессов доменной плавки по различным каналам управления:

– воздействия изменения рудной нагрузки на производительность печи и содержание кремния в чугуне;

– воздействия изменения расхода природного газа и кислорода на производительность печи и содержание кремния в чугуне;

– содержание кремния в чугуне при изменении влажности и температуры дутья, а также основности доменного шлака.

9. По данным изменения входных параметров во времени в проектном периоде осуществляется прогнозирование газодинамического и теплового режима доменной плавки в реальном времени на длительность проектного периода, равного 2,0-2,5 оборота шихты. Учитывая гипотезу линейности рассматриваемого объекта, реакцию системы на любую сумму *n* входных воздействий можно рассчитать по следующему уравнению:

$$\Delta Si(t) = \sum_{j=1}^{n} \int_{0}^{t} h_{si}^{j}(t-\tau) \frac{dX_{вх}^{j}(\tau)}{d\tau} d\tau , \qquad (4)$$

где $\Delta Si(t)$ – изменение во времени приращения [Si];

$h_{si}^{j}(\tau)$ – переходная функция системы по *j*-му каналу воздействия;

$X_{вх}^{j}(\tau)$ – изменение во времени приращения *j*-го входного воздействия.

Время запаздывания при изменении свойств и расходов шихтовых материалов было принято равным времени одного оборота шихты. Для определения вида и показателей переходного процесса (апериодический, колебательный, величина перерегулирования) использовали результаты расчетов переходных процессов по модели ВНИИМТ.

Динамика газодинамического сопротивления слоя шихты при изменении доли окатышей приведена на рисунке 3.

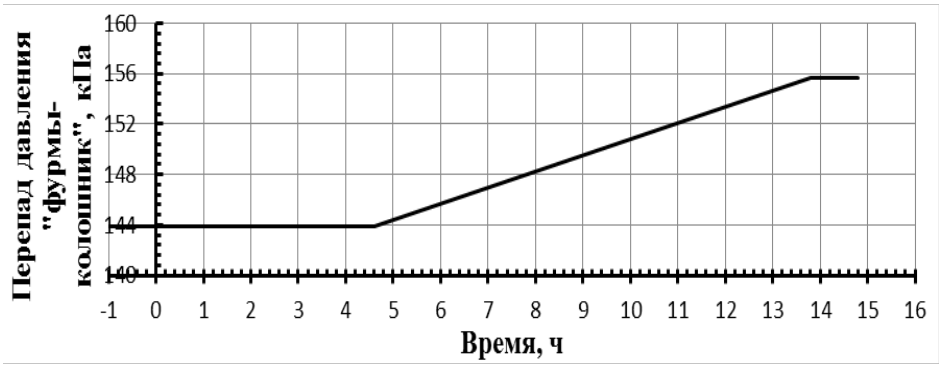

Рисунок 3 – Изменение общего перепада давления газа по высоте слоя шихты при увеличении доли окатышей в железорудной части шихты с 0,342 т/т до 0,541 т/т

Поскольку температурный интервал плавления окатышей шире, чем у офлюсованного агломерата, то увеличение доли железорудных окатышей в шихте доменных печей будет сопровождаться возрастанием газодинамического сопротивления зоны когезии.

График переходного процесса при загрузке в печь шихты с повышенным содержанием мелочи (фр. 0-5 мм) в агломерате показан на рисунке 4. Ввод в шихту агломерата с повышенным содержанием мелочи (10,8 % против 6,09 % в базовом периоде) будет сопровождаться возрастанием общего перепада давления газа по высоте слоя с ΔР= 144 кПа до ΔР= 170 кПа.

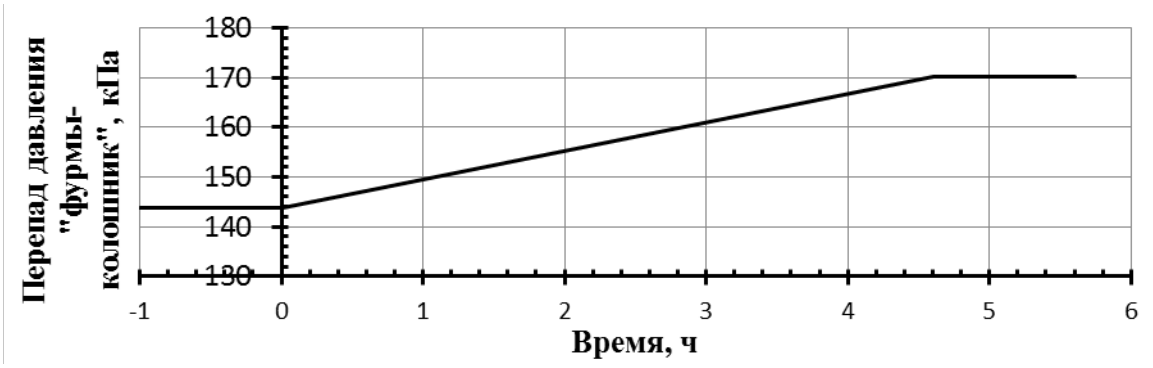

Рисунок 4 – Изменение общего перепада давления газа по высоте слоя шихты в печи № 10 ММК при увеличении мелочи в агломерате

Возрастание верхнего перепада давления газа, а вместе с этим и рост общего перепада, будет наблюдаться сразу после загрузки в печь шихты с увеличенной долей мелочи в агломерате и будет продолжаться вплоть до прихода этой шихты в зону шлакообразования, т.е. примерно через время проплавления загруженного объема шихты, численно равного объему печи.

При увеличении рудной нагрузки начало изменения в производительности печи соответствует смене одного объема шихты в печи; время переходного периода примерно в 2–2,5 раза больше. Изменение в нагреве продуктов плавки, характеризуемое содержанием кремния в чугуне, начинается через время переходного периода, длительность которого составляет один оборот шихты в печи, а общая продолжительность переходного процесса до установления нового значения кремния составляет 3–3,2 оборота шихты (рисунки 5,6).

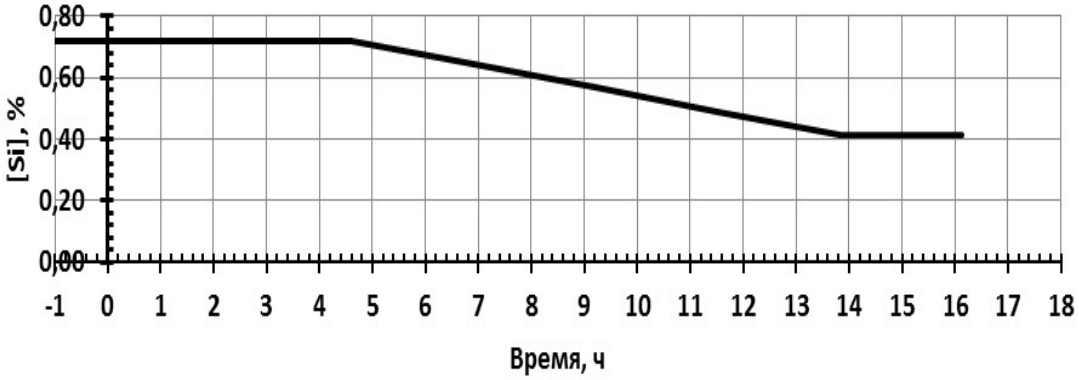

Рисунок 5 – Изменение содержания кремния в чугуне при увеличении рудной нагрузки с 3,76 до 3,86 т/т

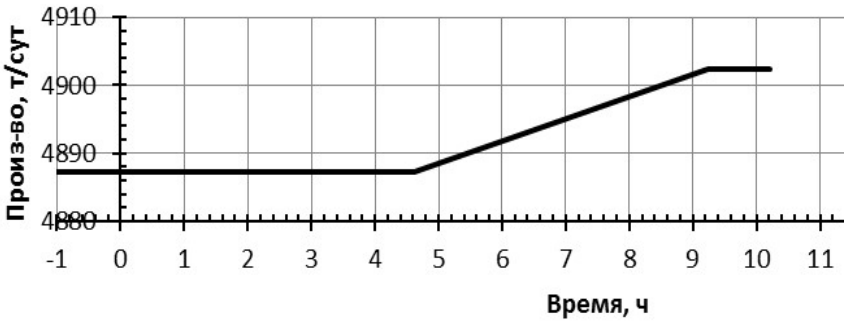

Рисунок 6 – Изменение производительности печи при увеличении рудной нагрузки с 3,76 до 3,86 т/т

Изменение расхода природного газа вызывает знакопеременный характер изменения содержания кремния в чугуне (рисунок 7).

Это обусловлено безынерционным действием изменения теплового уровня в горне печи и инерционным воздействием интенсивности плавки, и протеканием восстановительных процессов. В начальный момент времени снижения расхода газа в результате повышения температуры в горне, связанной со снижением затрат тепла на разложение природного газа, содержание кремния в чугуне

возрастает, но по истечении времени, равного времени одного оборота шихты в печи, содержание кремния в чугуне уменьшается.

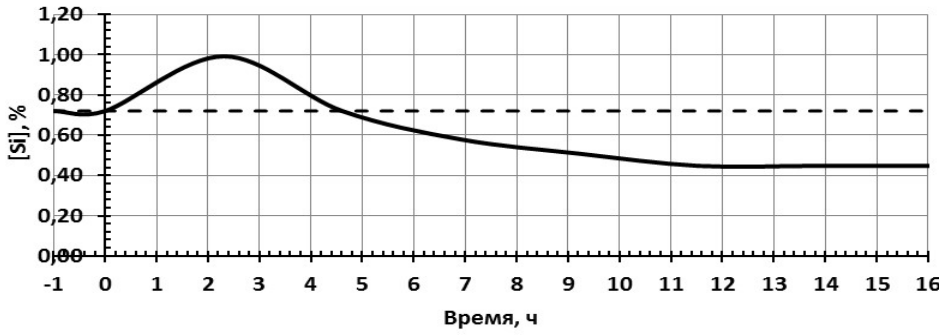

Рисунок 7 – Изменения содержания кремния в чугуне при сокращении расхода природного газа на 10 м^3/т чугуна

Динамика изменения содержания кремния в чугуне при изменении содержания кислорода в дутье подобна развитию процессов в доменной печи при изменении расхода природного газа. В первоначальный момент времени после увеличения содержания кислорода в дутье из-за роста температуры в горне печи в течение прохождения одного оборота шихты происходит повышение концентрации кремния в чугуне (рисунок 8).

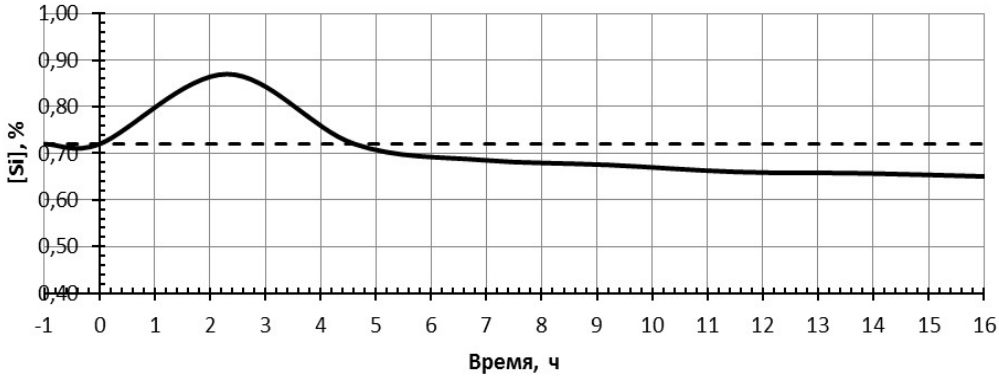

Рисунок 8 – Динамика изменения содержания кремния в чугуне при увеличении концентрации кислорода в дутье с 27,5 до 28,5%

Однако в дальнейшем из-за снижения температуры в шахте печи и увеличения степени прямого восстановления оксидов железа наблюдается снижение нагрева нижней зоны печи и понижение содержания кремния. Таким образом, формируется знакопеременный характер изменения содержания кремния в чугуне.

На рисунке 9 представлена динамика изменения содержания кремния в чугуне при увеличении основности шлака.

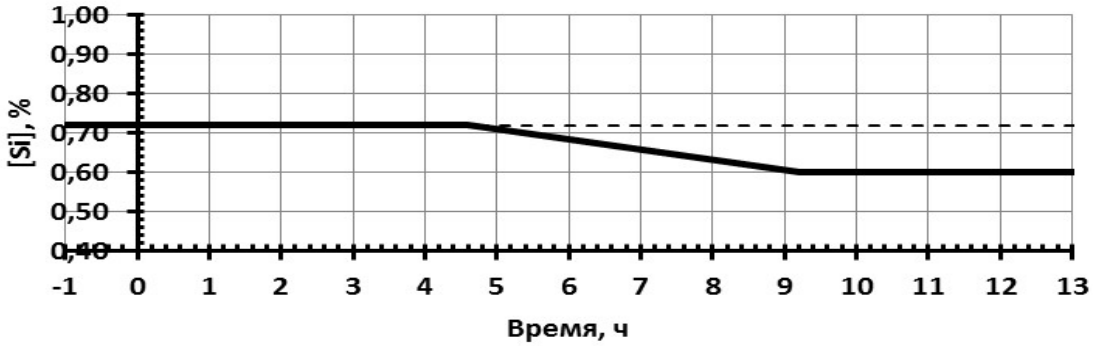

Рисунок 9 – Динамика изменения содержания кремния в чугуне при увеличении основности шлака (CaO/SiO_2) с 0,98 до 1,04

При расчете динамики изменения содержания кремния в чугуне при внесении возмущения по изменению основности шлака приняли во внимание то, что начало изменения концентрации кремния в чугуне начинается через время смены одного оборота шихты в печи, а длительность переходного периода составляет по времени также смену одного оборота шихты.

В пятой главе *«Решение технологических задач анализа и прогнозирования работы доменных печей с использованием логико-динамической модели»* рассмотрены вопросы реализации программных модулей, а также приведены примеры использования программного продукта. В качестве средства разработки выбрана среда программирования Microsoft Visual Studio 2015, язык программирования C#.

Расчётный модуль включает в себя набор динамически подключаемых библиотек. Результаты расчёта поступают в блок отображения результатов, который представляет на экран данные в численном и графическом виде, а также в блок отчёта, позволяющий пользователю получить результаты в твёрдой копии.

Применение программного обеспечения модели логико-динамической системы поддержки принятия решений для анализа и прогнозирования работы доменных печей проиллюстрировано в заключительном параграфе этой главы.

В качестве примера на рисунке 10 сопоставлено измеренное и расчетное значение содержания кремния в чугуне. Сопоставление фактической и расчетной динамики изменения кремния в чугуне показывает на вполне удовлетворительное согласование прогнозных и фактических значений содержания кремния в чугуне.

В таблице 2 представлен фрагмент одного из вариантов оценки нормального хода доменной печи №10 ОАО «ММК».

Значение вероятности нормального хода доменной плавки, равное 0,63, свидетельствует о том, что на рассматриваемой печи присутствует нормальный режим плавки.

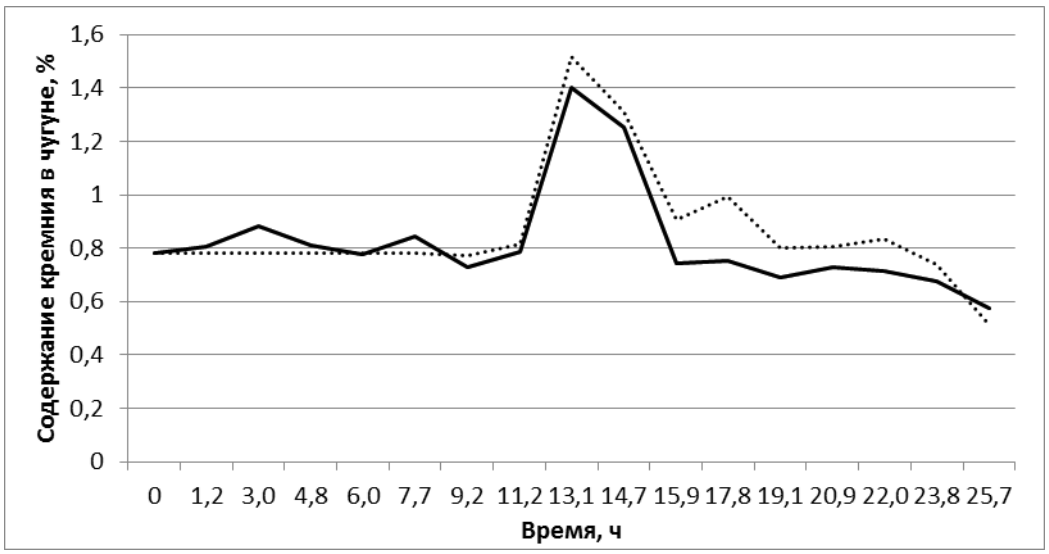

Рисунок 10 – Сопоставление фактического (сплошная линия) изменения содержания кремния в чугуне (%) с расчетными (пунктирная линия) значениями при внесении в процесс плавки параметров, вызывающих возрастание и снижение содержания кремния в чугуне

Таблица 2 – Расчет вероятности нормального хода доменной плавки

№ п/п	Наименование признака, размерность	Базовый период	Проектный период	Отклонение параметра	Допустимое отклонение	Ранг признака, R_i	α_i	P_i
P_1	Расход дутья, м^3/мин	3422	4019	597	603	0,9	0,055	1
P_2	Температура дутья, °С	1147	1154	7	50	0,6	0,036	1
P_3	Общий перепад давления, кПа	131	140	9	5	0,7	0,042	0
P_4	Нижний перепад давления, кПа	92	98	6	3,5	0,8	0,048	0
P_5	Верхний перепад давления, кПа	39	42	3	1,5	0,7	0,042	0
P_6	Окружная неравномерность температуры газа, °С	193	332	139	100	0,6	0,036	0
P_7	Неравномерность распределения температуры колошникового газа по газоотводам, °С	95	95	0	100	0,8	0,048	1
P_8	Отклонение усреднённой температуры колошникового газа, °С	184	161	-23	100	0,8	0,048	1
P_9	Содержание Si в чугуне, %	0,72	0,948	0,228	0,1	0,9	0,055	0
P_{10}	Содержание CO_2 в колошниковом газе, %	20,26	19,21	-1,05	1	0,8	0,048	0
P_{11}	Температура чугуна, °С	1416	1475	59	50	0,8	0,048	0
P_{12}	Основность шлака $(CaO+MgO)/SiO_2$, доли	1,221	1,214	-0,007	0,05	0,9	0,055	1

Продолжение таблицы 2

№ п/п	Наименование признака, размерность	Базовый период	Проектный период	Отклонение параметра	Допустимое отклонение	Ранг признака, Ri	α_i	P_i
P_{13}	Индекс теплового состояния низа, доли	1	1,1	0,1	0,05	0,9	0,055	0
P_{14}	Индекс теплового состояния верха печи, доли	0,7	0,7	0	0,05	0,6	0,036	1
P_{15}	Степень уравновешивания шихты газовым потоком, доли	0,55	0,58	0,03	0,1	0,9	0,055	1
P_{16}	Степень уравновешивания шихты газовым потоком в верхней части печи, доли	0,3	0,3	0	0,05	0,9	0,055	1
P_{17}	Степень уравновешивания шихты газовым потоком в нижней части печи, доли	0,65	0,7	0,05	0,1	0,9	0,055	1
P_{18}	Вязкость конечного шлака при температуре 1500 °С, Па*с	0,35	0,3	-0,05	0,05	0,7	0,042	1
P_{19}	Градиент вязкости шлака в диапазоне 2,5-0,7 Па*с, Па*с/°С	0,0175	0,0185	0,001	0,005	0,7	0,042	1
P_{20}	Градиент вязкости шлака в пределах от 1400°С до 1500°С, Па*с/°С	0,005	0,0055	0,0005	0,001	0,8	0,048	1
P_{21}	Объём проплавленной шихты за единицу времени, $м^3$/мин.	6,5	6,75	0,25	0,5	0,8	0,048	1
Вероятность нормального хода печи, доли								0,63

Итоги результатов моделирования, приведенные в таблице 3, свидетельствуют о том, что вероятности того или иного вида отклонений от нормального режима не превышают пороговых значений, принятых равными 0,8.

Таблица 3 – Результаты расчетов вероятности нарушений хода доменной плавки в проектном периоде

№ п.п.	Вид нарушений	Вероятность нарушений, доли
1	Периферийный ход	0,163
2	Осевой ход	0,093
3	Горячий ход	0,369
4	Холодный ход	0,074
5	Тугой ход	0,247
6	Верхнее подвисание шихты	0,083
7	Нижнее подвисание шихты	0,000

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработана функциональная модель логико-динамической подсистемы поддержки принятия решений доменной плавки, описывающая необходимые процессы решения технологических задач диагностики состояния и прогнозирования хода доменной плавки с учетом динамики в режиме реального времени.

2. Усовершенствована математическая модель диагностики состояния и прогнозирования хода доменной плавки УрФУ-ММК за счет разработки блока логической модели, использующей комплекс контролируемых и расчетных параметров. Разработано соответствующее алгоритмическое и программное обеспечение, которое может быть использовано в режиме советчика мастера для выбора управляющих воздействий.

3. Предложены и обоснованы количественные критерии и алгоритмы их расчета для оценки диагностики нормального режима работы доменной печи, а также отклонений от нормального режима.

4. Разработаны и встроены в математическую модель доменного процесса, разработанную в УрФУ-ММК, блоки учета динамики процесса, а также соответствующее алгоритмическое и программное обеспечение. В количественном выражении исследованы переходные процессы доменной плавки по различным каналам управления и получены следующие результаты:

– динамические характеристики доменных печей по каналам воздействий изменяются и существенно зависят от свойств проплавляемого железорудного сырья и режимных параметров работы печей;

– колебательный переходный процесс в доменной печи наблюдается в том случае, если после нанесения возмущения оно будет оказывать противоположное влияние на тепловое состояние нижней и верхней ступеней теплообмена. Величина перерегулирования при этом будет тем больше, чем существеннее по величине и по знаку это различие;

– по каналу содержания кремния в чугуне наиболее предсказуемыми параметрами, влияющими на колебания кремния в чугуне, являются изменения рудной нагрузки, влажности дутья, а также основности шлака;

– изменение концентрации кислорода в дутье и расхода природного газа не желательно использовать в качестве параметров для регулирования содержания кремния в чугуне. Это связано со знакопеременным характером влияния этих параметров на тепловой режим плавки. Принятие необоснованных решений по установлению параметров расхода природного газа и концентрации кислорода в дутье для регулирования содержания кремния в чугуне может привести к результату противоположному ожидаемому.

5. Использование математических моделей в современной информационно-моделирующей системе позволит обеспечить повышение эффективности управления доменной плавкой в режиме реального времени в условиях нестабильности состава и качества проплавляемого железорудного сырья и параметров комбинированного дутья. Материалы работы внедрены в

учебный процесс в ФГАОУ ВО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина».

Перспективы дальнейшей разработки темы исследования

В дальнейшем развитие исследований по теме диссертационной работы целесообразно вести в направлениях, связанных с научным обоснованием вида и величины управляющих воздействий в режиме реального времени, обеспечивающих нормальный режим доменной плавки.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах.

Статьи, опубликованные в рецензируемых научных журналах, определенных ВАК

1. Истомин А.С. Логические основы распознавания вида отклонения доменной плавки от нормального режима / О.П. Онорин, Н.А. Спирин, А.В. Павлов, В.В. Лавров, **А.С. Истомин** // Известия вузов. Черная металлургия. - 2014. - № 8. - С. 42-47 (0,25 п.л./0,04 п.л.).
2. Истомин А.С. Оптимизация распределения природного газа в доменном цехе при изменении параметров плавки / Н.А. Спирин, Л.Ю. Гилёва, В.В. Лавров, **А.С. Истомин**, И.А. Гурин, А.А. Бурыкин, К.А. Щипанов. // Известия вузов. Черная металлургия. - 2014. - № 6. - С. 45-49 (0,25 п.л./0,04п.л.).
3. Истомин А.С. Разработка информационно-логической системы распознавания вида отклонения доменной плавки от нормального режима / **А.С. Истомин**, Н.А. Спирин, О.П. Онорин, А.В. Павлов, И.А. Гурин // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. - 2015. - № 8 (58). - С. 607-611 (0,2 п.л./0,04 п.л.).
4. Истомин А.С. Программное обеспечение системы управления сырьевыми ресурсами в доменном производстве / Н.А. Спирин, В.В. Лавров, И.Е. Косаченко, О.П. Онорин, **А.С. Истомин**, А.А. Бурыкин, К.А. Щипанов // Металлург. - 2015. - № 2. - С.12-18 (0,33 п.л./0,06 п.л.).

   Istomin A.S. Software for the Raw-Materials Management System in Blast-Furnace Smelting / Spirin N.A., Lavrov V.V., Istomin A. S, Burykin A.A., Shchipanov K.A., Kosachenko I.E., Onorin O.P.// Metallurgist. - 2015. - V. 59, I. 1-2. - P. 104-112. Web of Science. Scopus
5. Истомин А.С. Особенности переходных процессов доменной плавки / О.П. Онорин, Н.А. Спирин, **А.С. Истомин**, В.В. Лавров, А.В. Павлов // Металлург (Metallurgist). – 2017. - № 2. - С.47-51(0,28 п.л./0,05 п.л.).

Свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ

6. Истомин А.С. Распознавание вида отклонений доменной плавки от нормального режима / **Истомин А.С.**, Спирин Н.А., Лавров В.В., Савчук С.А. // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2015617657 от 16.07.2015 г.
7. Истомин А.С. Моделирование динамики доменного процесса при изменении состава и свойств железорудного сырья и кокса, дутьевых параметров / **Истомин А.С.**, Спирин Н.А., Лавров В.В., Гурин И.А., Бякова М.А. // Свидетельство о государственной регистрации программы для

ЭВМ № 2016661688. Заявл. 14.06.2016; зарегистрировано в реестре программ для ЭВМ 18.11.2016 (РФ).

8. Истомин А.С. Оценка эффективности использования природного газа в группе доменных печей / Гурин И.А., Спирин Н.А., Лавров В.В., **Истомин А.С.**, Бякова М.А. // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016661689. Заявл. 14.06.2016; зарегистрировано в реестре программ для ЭВМ 18.11.2016 (РФ).

Прочие издания

9. Истомин А.С. Научные проблемы совершенствования информационно-моделирующих систем в металлургии / Н.А. Спирин, В.Ю. Рыболовлев, В.В. Лавров, К.А. Щипанов, **А.С. Истомин** // Системы автоматизации в образовании, науке и производстве: труды IX Всероссийской научно-практической конференции. Новокузнецк: Изд. центр СибГИУ, 2013. С. 26-32. (0,33 п.л./0,06 п.л.).

10. Истомин А.С. Программное обеспечение оценки вероятности отклонения доменной плавки от нормального режима / **А.С. Истомин**, И.А. Гурин, К.А. Щипанов, А.А. Бурыкин // Энергосберегающие технологии в промышленности. Печные агрегаты. Экология: труды VII Международной научно-практической конференции. М.: МИСИС, 2014. С. 210-215 (0,28 п.л./0,07 п.л.).

11. Истомин А.С. Создание программного обеспечения для расчета вероятности возникновения отклонения доменной плавки от нормального режима / **А.С. Истомин**, Н.А. Спирин // Перспективы развития металлургии и машиностроения с использованием завершенных фундаментальных исследований и НИОКР: труды научно-практической конференции с международным участием и элементами школы молодых ученых. Институт металлургии Уро РАН. Екатеринбург: Уральский рабочий, 2015. С. 434–438. (0,22 п.л./ 0,11 п.л.).

12. Истомин А.С. Компьютерная система распознавания вида отклонения доменной плавки от нормального режима / Н.А. Спирин, **А.С. Истомин**, О.П. Онорин, В.Ю. Носков, В.Ф. Ярчук // Современные научные достижения металлургической теплотехники и их реализация в промышленности: труды международной научно-практической конференции. Екатеринбург: УрФУ, 2015. С. 175-181. (0,33 п.л./ 0,06 п.л.).

13. Истомин А.С. Особенности переходных процессов доменной плавки / О.П. Онорин, Н.А. Спирин, В.В. Лавров, **А.С. Истомин**, И.А. Гурин // Системы автоматизации в образовании, науке и производстве: труды X Всероссийской научно-практической конференции. Новокузнецк: Изд. центр СибГИУ, 2015. С. 85–90. (0,28 п.л./ 0,05 п.л.).

14. Истомин А.С. Применение в системах управления исследований переходных процессов доменной плавки / О.П. Онорин, Н.А. Спирин, **А.С. Истомин**, И.А. Гурин // Моделирование и наукоемкие информационные технологии в технических и социально-экономических системах: труды IV Всероссийской научно-практической конференции (с международным

участием). Новокузнецк: Изд. центр СибГИУ, 2016. С. 250-256. (0,38 п.л./ 0,10 п.л.)

15. Истомин А.С. Разработка компьютерной системы для диагностики отклонения доменной плавки от нормального режима / Н.А. Спирин, **А.С. Истомин,** О.П. Онорин, В.В. Лавров // Моделирование и наукоемкие информационные технологии в технических и социально-экономических системах: труды IV Всероссийской научно-практической конференции (с международным участием). Новокузнецк: Изд. центр СибГИУ, 2016. С. 256-261. (0,28 п.л./ 0,07 п.л.).

16. Истомин А.С. Разработка программного обеспечения для диагностики вида отклонения доменной плавки от нормального режима / **А.С. Истомин**, Н.А. Спирин, В.В. Лавров, М.А. Бякова // Вестник Томского государственного университета. Секция «Управление, вычислительная техника и информатика». 2016. Т. 36, №3. С. 97-102 (0,33 п.л./0,07 п.л.).