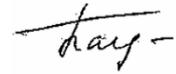


На правах рукописи



Бауман Екатерина Вячеславовна

**УПРАВЛЕНИЕ ДОМЕННЫМ ПРОИЗВОДСТВОМ
НА ОСНОВЕ КЛАСТЕРНЫХ МОДЕЛЕЙ
И КОМИТЕТНОГО ПОДХОДА К ПРИНЯТИЮ РЕШЕНИЙ**

Специальность 2.3.3. – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Челябинск – 2026

Работа выполнена на кафедре автоматики и управления Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)».

Научный руководитель: **Барбасова Татьяна Александровна**, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой автоматики и управления Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)»

Официальные оппоненты: **Ершов Евгений Валентинович**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой математического и программного обеспечения ЭВМ, директор Института информационных технологий Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Череповецкий государственный университет»
Мешков Валерий Геннадьевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры автоматизированных систем обработки информации и управления Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»».

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»

Защита состоится «12» мая 2026 г, в 14-00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.437.02 при ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)» по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. Ленина 76, ауд. 1007.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)», а также на сайте ЮУрГУ: <https://www.susu.ru/dissertation/d212-298-03>.

Отзыв на автореферат, заверенный печатью, просим выслать по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76, ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)», ученый совет, тел. (351) 267-91-23, факс (351) 265-62-05.

Автореферат разослан «___» _____ 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета, д.т.н., доцент
тел. (351) 267-94-21



А.В. Голлай

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

В диссертационной работе изложены результаты исследования, посвященного решению задач управления доменным производством в противоречивых условиях на основе применения кластерного анализа и комитетного подхода при решении задач структуризации режимов работы доменных печей и задания эффективных режимов доменной плавки для поддержки принятия решений.

Теоретические основы моделирования процессов доменной плавки были заложены в работах отечественных ученых Товаровского И.Г., Рамма А.Н., Готлиба А.Д. и др. Исследованию автоматизированных систем мониторинга и управления доменной плавки посвящены работы Спирина Н.А., Лаврова В.В., Павлова А.В., Краснобаева А.В., Бурькина А.А., Парсункина Б.Н., Паршакова В.М., Казаринова Л.С., Шнайдера Д.А., Барбасовой Т.А. и др. Большой вклад в развитие автоматизированных систем мониторинга и управления доменным процессом внесли зарубежные промышленные группы SMS Group, Siemens, Paul Würth, Primetals и др. Вопросы применения методов машинного обучения для моделирования процессов доменной плавки исследовали зарубежные ученые Azadi P., Angela X.G., Cardoso W., Saxen H., Chen J. и др. Решение научных и методологических проблем планирования работы предприятий черной металлургии было предложено в работах Бурковой И.В., Зиминой В.В., Канторовича Л.В., Лаврова В.В., Спирина Н.А., Ершова Е.В.

Актуальность темы исследования

Чёрная металлургия – одна из ключевых отраслей промышленности, обеспечивающая производство чугуна, стали и проката, которые лежат в основе машиностроения, строительства, транспорта и многих других секторов экономики. На фоне ужесточения экологического регулирования и роста стоимости энергоресурсов в металлургической отрасли для повышения ее конкурентоспособности требуется решение задач снижения энерго- и ресурсоемкости производства продукции, то есть повышения экономической эффективности. Основой традиционного цикла чёрной металлургии остаётся доменное производство, в основе которого лежит процесс восстановления железа из руды в домнах с использованием кокса в качестве восстановителя и источника тепла. Доменное производство является одним из наиболее энерго- и материалоёмких процессов в чёрной металлургии. На сегодняшний день задачи снижения расхода кокса, природного газа и других ресурсов в доменном производстве являются весьма актуальными.

Среди множества задач управления доменным производством следует выделить задачу управления доменным процессом в многорежимной постановке на основе интеллектуальных технологий с использованием комитетного подхода. В настоящее время использование интеллектуальных технологий является перспективным направлением решения комплексных задач повышения эффективности управления доменным производством.

Цель диссертационной работы

Целью диссертационной работы является разработка методического, алгоритмического и программного обеспечения системы поддержки принятия решений по управлению доменным производством с точки зрения совместной оценки экономической и технологической эффективности работы доменного цеха на основе использования интеллектуальных методов кластерного анализа значений параметров доменных печей и комитетного подхода к принятию решений в противоречивых условиях.

Для достижения поставленной цели были сформулированы и решались следующие основные задачи:

1. Провести формализацию задач планирования и управления доменным производством на основе совместной оценки экономической и технологической эффективности работы доменного цеха в противоречивых условиях.

2. Разработать алгоритм определения режимных кластеров значений параметров доменного производства на основе кластерного анализа и алгоритм на основе комитетного подхода к выбору режимного кластера для принятия решений на основе согласования взвешенных по значимости технических условий.

3. Разработать алгоритм решения задач планирования и управления доменным производством на основе кластерных моделей и комитетного подхода к принятию решений в противоречивых условиях.

4. Для корпоративной АИУС разработать программно-технический комплекс поддержки принятия решений по управлению доменным производством на основе совместной оценки экономической и технологической эффективности работы доменного цеха в противоречивых условиях, определяемых на основе предложенных алгоритмов.

5. Провести работы по внедрению на предприятии ПАО «ММК» разработанного программно-технического комплекса поддержки принятия решений по управлению доменным производством.

Объект исследования

Объектом исследования является доменное производство металлургического предприятия с точки зрения автоматизации планирования и управления на основе интеллектуальных технологий.

Предмет исследования

Предметом исследования являются методы, алгоритмы и программная реализация автоматизированных систем планирования и управления доменным производством металлургического предприятия на основе интеллектуальных технологий.

Методы исследования:

1. Кластерный анализ значений параметров режимов доменных процессов.
2. Комитетный подход к принятию решений на основе согласования взвешенных по важности противоречивых технических условий на доменный процесс.
3. Методы машинного обучения.

Научная новизна

1. Предложен новый вычислительный метод решения задач планирования и управления доменным производством на основе совместной оценки экономической и технологической эффективности работы доменного цеха в противоречивых условиях.

2. Разработаны новые алгоритм определения режимных кластеров значений параметров доменного производства на основе кластерного анализа и алгоритм на основе комитетного подхода к выбору режимного кластера для принятия решений на основе согласования взвешенных по значимости технических условий.

3. Разработан новый алгоритм решения задач планирования и управления доменным производством на основе кластерных моделей и комитетного подхода к принятию решений в противоречивых условиях.

Практическая значимость

1. Для корпоративной АИУС разработан программно-технический комплекс поддержки принятия решений по управлению доменным производством на основе совместной оценки экономической и технологической эффективности работы доменного цеха в противоречивых условиях, определяемых на основе предложенных алгоритмов.

2. Разработанный программно-технический комплекс поддержки принятия решений по управлению доменным производством внедрен в практику управления технологическими процессами доменного цеха предприятия ПАО «ММК».

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Метод решения задач планирования и управления доменным производством на основе совместной оценки экономической и технологической эффективности работы доменного цеха в противоречивых условиях.

2. Алгоритм определения режимных кластеров значений параметров доменного производства на основе кластерного анализа и алгоритм на основе комитетного подхода к выбору режимного кластера для принятия решений на основе согласования взвешенных по значимости технических условий.

3. Алгоритм решения задач планирования и управления доменным производством на основе кластерных моделей и комитетного подхода к принятию решений в противоречивых условиях.

Достоверность результатов

Достоверность полученных положений, выводов и рекомендаций обеспечивается корректностью использованных моделей, применением современных методов, технологий и средств разработки программного обеспечения для автоматизированного управления технологическими процессами, а также соответствием полученных результатов объективным закономерностям доменного процесса.

Соответствие паспорту специальности

Проблематика, рассмотренная в диссертационной работе, соответствует пунктам 4, 6, 8, 13 паспорта специальности 2.3.3. «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами» (п. 4. Теоретические основы и методы моделирования, формализованного описания, оптимального

проектирования и управления технологическими процессами и производствами; п. 6. Научные основы и методы построения интеллектуальных систем управления технологическими процессами и производствами; п. 8. Научные основы, модели и методы идентификации производственных процессов, комплексов и интегрированных систем управления и их цифровых двойников; п. 13. Методы планирования, оптимизации, отладки, сопровождения, модификации и эксплуатации функциональных и обеспечивающих подсистем АСУТП, АСУП, АСТПП и др., включающие задачи управления качеством, финансами и персоналом.)

Апробация работы

Материалы диссертационной работы докладывались на 5 конференциях: 79-й международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы современной науки, техники и образования» (г. Магнитогорск, 2021 г.), 74-й научной конференции (г. Челябинск 2022 г.), XVII Всероссийской НТК «Проблемы проектирования» (г. Тула, 2022 г.), пятнадцатой научной конференции аспирантов и докторантов (г. Челябинск, 2023 г.), Всероссийской научной конференции с международным участием «Цифровая индустрия: состояние и перспективы развития (ЦИСП) 2023» (г. Челябинск, 2023 г.)

Публикации

По материалам диссертационной работы опубликовано 10 научных работ, в том числе 4 статьи в рецензируемых научных журналах, входящих в перечень ВАК, одна статья в научных сборниках и материалах всероссийских конференций, получено два авторских свидетельства на регистрацию программ для ЭВМ.

Структура и объем работы

Диссертационная работа изложена на 140 страницах машинописного текста, включая 57 рисунков, 21 таблицу, и состоит из общей характеристики работы, 4 глав, заключения, списка использованных источников из 114 наименований отечественных и зарубежных авторов, 3 приложений.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана актуальность темы, определена цель и задачи работы, объект и предмет исследования, научная новизна, практическая значимость, а также результаты внедрения.

В первой главе проводится анализ проблем и задач управления доменным производством.

К актуальным проблемам в области принятия решений по управлению доменным производством относятся:

- а) эффективный выбор режимов доменных процессов в условиях высокой вариативности входных материалов;
- б) снижение удельного расхода кокса;
- в) сокращение времени формирования вариантов производственных планов доменного производства, включающих значения технологических параметров, удовлетворяющих технологическим условиям на доменный процесс

и способствующих улучшению технологической и экономической эффективности доменного процесса.

Проведенный в работе обзор литературы показал, что управление доменным производством носит многоаспектный, сложный характер и должно основываться на результатах исследований в различных направлениях научных работ в частности: исследований природы процессов доменной плавки, разработки экспертных систем для мониторинга и управления процессом получения чугуна, создания систем распределения ресурсов доменных печей.

Большое количество работ посвящено исследованию процессов, происходящих в доменных печах. Однако для процессов доменной плавки, которые характеризуются высокой неопределенностью характеристик, многие вопросы еще недостаточно решены. При этом одной из актуальных задач является рассматриваемая в данной работе задача построения гибких моделей работы доменных печей в условиях неопределенностей.

Далее, при планировании работы доменного цеха и соответствующих производств, обеспечивающих его работу, большое количество времени занимает согласование производственных программ доменного цеха, которые должны:

- 1) удовлетворять технологическим условиям на доменный процесс,
- 2) способствовать улучшению показателей его технологической и экономической эффективности.

Предлагаемая диссертационная работа посвящена решению указанных задач в области принятия решений по управлению доменным производством.

Во второй главе предлагается алгоритм определения режимных кластеров значений параметров доменного процесса и алгоритм на основе комитетного подхода к выбору целевого режимного кластера для принятия решений на основе согласования взвешенных по значимости технических условий.

В предлагаемом алгоритме определения искомых режимных кластеров значений параметров доменного процесса применяется метод кластерного анализа, позволяющий автоматически разделить статистические данные работы доменных печей на группы (кластеры), которые соответствуют различным режимам работы печей. Это дает возможность сопоставлять и выбирать наиболее подходящие режимные кластеры значений параметров с учетом текущих условий работы доменных печей.

При поиске режимных кластеров значений параметров доменного процесса были использованы методы кластерного анализа: комбинация методов главных компонент с k -средних и самоорганизующиеся карты Кохонена.

На начальном шаге алгоритма происходит предварительная обработка исходных данных, включающая в себя: исключение из статистики данных, относящихся к периодам, когда проводился ремонт или были нештатные ситуации, агрегацию данных, поиск и обработку выбросов, заполнение пропусков.

Для определения итогового количества кластеров в предложенном алгоритме используются коэффициент силуэта и индекс Калински-Харабаша. С использованием указанных метрик было проведено сравнение методов кластеризации, по результатам которого в алгоритме определения режимных

кластеров значений параметров доменного цеха рекомендуется применять комбинацию методов главных компонент и k-средних.

На следующем шаге алгоритма используя статистику, попавшую в каждый режимный кластер значений технологических параметров доменного процесса, определяются коэффициенты влияния параметров на производительность и УРК.

Для большинства параметров зависимости описываются линейными регрессионными моделями вида:

$$\text{УРК} = \text{УРК}_0 + K_{\text{УРК}} \cdot P, \quad (1)$$

$$\text{ПЧ} = \text{ПЧ}_0 + K_{\text{ПЧ}} \cdot P, \quad (2)$$

где P – параметр; УРК_0 – постоянная составляющая по УРК; ПЧ_0 – постоянная составляющая по производительности; $K_{\text{УРК}}$ – коэффициент влияния параметра на УРК; $K_{\text{ПЧ}}$ – коэффициент влияния параметра на производительность.

На основе полученных коэффициентов влияния параметров на УРК и производительность чугуна рассчитываются факторные коэффициенты следующим образом:

$$K'_{\text{УРК}} = \frac{K_{\text{УРК}}}{\text{УРК}_{\text{ср}}} \cdot 100\%, \quad (3)$$

$$K'_{\text{ПЧ}} = \frac{K_{\text{ПЧ}}}{\text{ПЧ}_{\text{ср}}} \cdot 100\%, \quad (4)$$

где $\text{УРК}_{\text{ср}}$ – среднее значение УРК в кластере, кг/т; $\text{ПЧ}_{\text{ср}}$ – среднее значение производительности в кластере, т.

Предложенный алгоритм был применен к реальным производственным данным, в результате были получены режимные кластеры, в каждом из которых были построены зависимости производительности доменной печи и удельного расхода кокса (УРК) от технологических параметров работы доменных печей. На рисунках 1-2 представлены примеры полученных зависимостей для параметра истираемость кокса (M10).

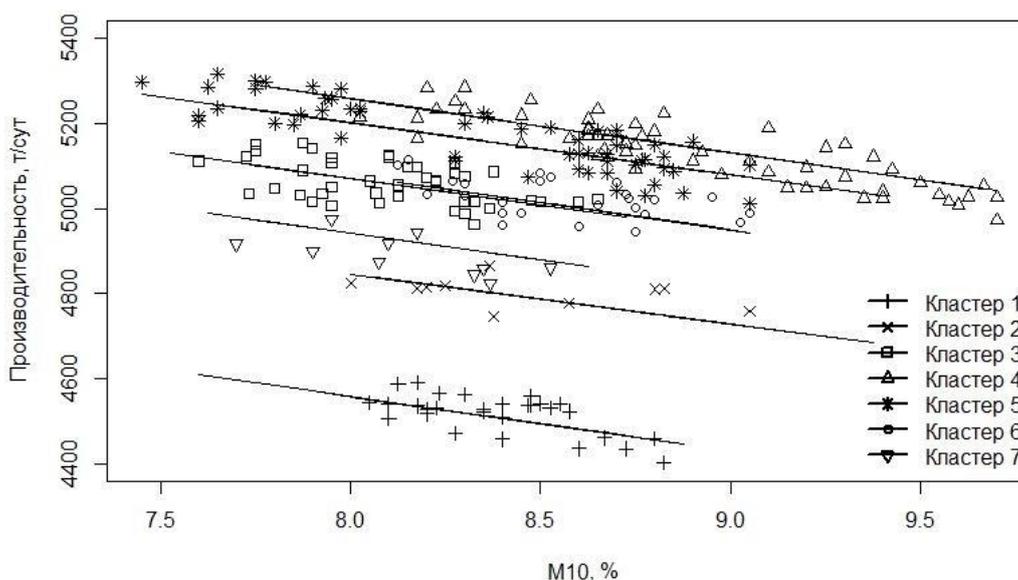


Рисунок 1 – Пример графического представления зависимостей производительности доменной печи от истираемости кокса (M10)

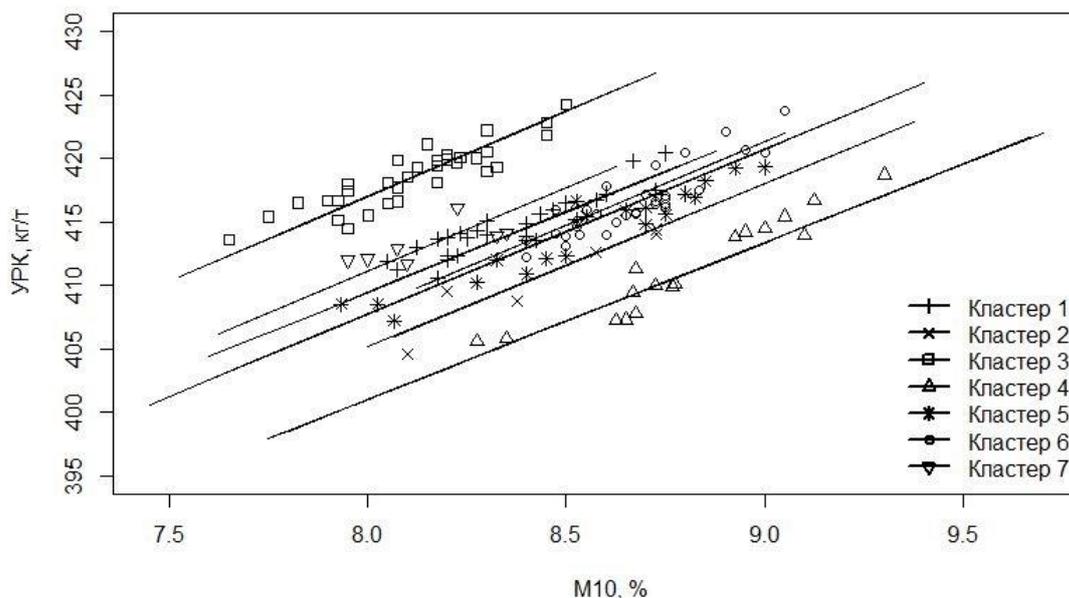


Рисунок 2 – Пример графического представления зависимостей УРК от истираемости кокса (M10)

Также в работе был предложен алгоритм на основе комитетного подхода к выбору целевого режимного кластера для принятия решений на основе согласования взвешенных по значимости технических условий.

Используя технологические ограничения, накладываемым на доменный процесс, строится комитет неравенств, с помощью которого происходит поиск соответствующего им режимного кластера значений параметров доменного процесса.

Режимный кластер значений параметров, претендующий на статус целевого, характеризуется следующим вектором $\{x_{0j}, x_{1j}, \dots, x_{nk}\}$, где x_{0j}, x_{1j}, x_{nj} – средние значение технологического параметра режимного кластера, n – количество параметров, k – количество режимных кластеров значений технологических параметров.

Комитет неравенств, построенный на основе технологических условий, имеет вид

$$\begin{aligned} x_0^{min} &\leq x_{0j} \leq x_0^{max} \\ x_1^{min} &\leq x_{1j} \leq x_1^{max}, \\ &\dots \\ x_n^{min} &\leq x_{nk} \leq x_n^{max} \end{aligned} \quad (5)$$

где $x_0^{min}, x_0^{max}, x_1^{min}, x_1^{max}, \dots, x_n^{min}, x_n^{max}$ – значения параметров, для которых необходимо выполнить технологические условия.

В качестве рекомендованного планового режимного кластера принимается тот, вектор значений параметров которого удовлетворяет максимально совместной системе взвешенных технических условий по критерию

$$\max_{(x)} C(x), \quad C(x) = \sum_{j=1}^n \theta_j \mu_j(x). \quad (6)$$

где μ – вектор, составленный из характеристических функций неравенств, $\mu_j = 1$, если j -е неравенство выполняется, в противном случае $\mu_j = 0$; θ_j – коэффициенты, отражающие важность параметра при выборе целевого кластера.

Если несколько режимных кластеров параметров соответствуют максимально совместной подсистеме неравенств, то рекомендуемый кластер определяется по значениям показателей эффективности доменного процесса (производительность и УРК).

С использованием предложенного алгоритма для нескольких периодов был выбран целевой режимный кластер, включающая факторные коэффициенты влияния технологических параметров на показатели доменной печи. На рисунке 3 представлено изменение значений факторных коэффициентов, демонстрирующие изменение режимов работы доменных печей.

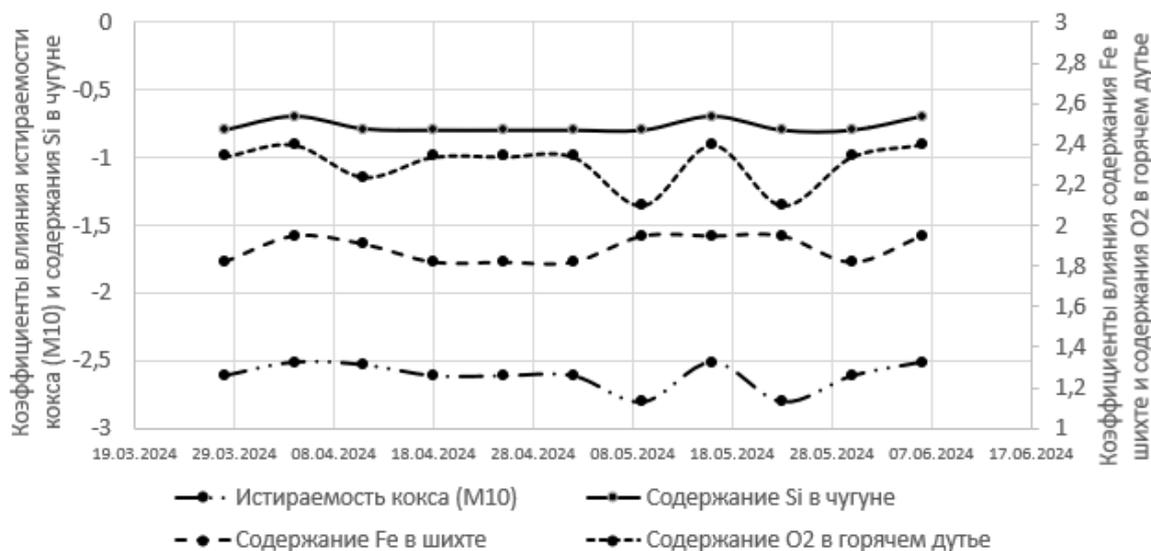


Рисунок 3 – Изменение значений коэффициентов влияния параметров на производительность

В третьей главе предлагается метод решения задач планирования и управления доменным производством на основе совместной оценки экономической и технологической эффективности работы доменного цеха в противоречивых условиях в двухуровневой постановке и алгоритм решения задач планирования и управления доменным производством на основе кластерных моделей и комитетного подхода к принятию решений в противоречивых условиях.

Решение рассматриваемой в работе задачи, включающей задачи планирования и управления доменным производством, состоит в поиске компромисса между противоположными условиями, когда необходимо выбрать такие значения параметров, которые обеспечивали высокую производительность доменных печей, минимальное потребление энергоресурсов, сохранение качества продукции и снижение ее себестоимости, то есть задача носит многокритериальный характер.

В условиях современного металлургического производства актуальной задачей также является балансировка между максимизацией производственной мощности и минимизацией удельного расхода энергоресурсов, в частности кокса. При этом традиционные подходы, основаны исключительно на удельном расходе кокса (УРК) или на коэффициенте использования полезного объема доменной печи.

Для решения рассматриваемой задачи в работе был предложен метод, включающий в себя формализацию задачи планирования и управления на основе совместной оценки экономической и технологической эффективности работы доменного цеха в противоречивых условиях и поддержку принятия решений при выборе планового объема производства.

В данной работе при решении комплексной задачи планирования и управления доменным производством используется частная оценка эффективности доменной печи в виде целевой функции, включающей два ключевых показателя технологического процесса.

$$E_i = \alpha \cdot \frac{ПЧ_i}{ПЧ_{max_i}} + (1 - \alpha) \cdot \left(\frac{УРК_i}{УРК_{min_i}} \right)^{-1}, \quad (7)$$

где $i = 1, 2, \dots, k_{дп}$ – номер доменной печи; E_i – эффективность для i -ой доменной печи; $ПЧ_i$ – прогнозируемое производство чугуна для i -ой доменной печи, т/сут; $ПЧ_{max_i}$ – максимальное возможное производство чугуна для i -ой доменной печи, т/сут; $УРК$ – прогнозируемый удельный расход кокса для i -ой доменной печи, кг/т; $УРК_{min_i}$ – минимальный удельный расход кокса по i -ой доменной печи за ближайший прошедший период, кг/т; α – весовой коэффициент, отражающий важность учета производства чугуна и расхода кокса в составе показателя эффективности, выбор значения которого производится экспертом.

Доменный цех и доменные печи представляют собой иерархическую структуру. В данной диссертационной работе оценка технологической эффективности доменного цеха определяется как сумма взвешенных оценок эффективностей доменных печей.

$$E_{дц} = \sum_{i=1}^{k_{дп}} w_{дп} \cdot E_i, \quad (8)$$

где E_i – оценка эффективности i -ой доменной печи, $w_{дп} = \frac{ПЧ_i}{\sum_{i=1}^{k_{дп}} ПЧ_i}$ – весовой коэффициент отражающий вклад доменной печи в оценку эффективности доменного цеха, $k_{дп}$ – количество действующих печей.

Помимо технологической эффективности, которая определяется по производительности и удельному расходу кокса, работа доменного цеха характеризуется переменной составляющей себестоимостью чугуна, рассчитываемой по следующей формуле

$$C_c(ПЧ^{дц}) = C_k^{дц}(M10^{дц}) + C_{жрс}^{дц}(ДА^{дц}) + C_d^{дц} + (РП - Отх - ПП), \quad (9)$$

где $ПЧ^{дц}$ – производство чугуна по доменному цеху, т; $C_k^{дц}(M10^{дц})$ – точка зависимости стоимости скипового кокса на тонну чугуна от параметра $M10$, руб/т; $M10^{дц}$ – средневзвешенное значение $M10$ по доменному цеху, %; $C_{жрс}^{дц}(ДА^{дц})$ – точка зависимости стоимости ЖРС на тонну чугуна от доли агломерата, руб/т; $ДА^{дц}$ – средневзвешенное значение доли агломерата по доменному цеху; $C_d^{дц}$ – затраты на природный газ, кислород, дутье, руб/т; $РП$ – расходы по переделу за вычетом дутья и кислорода, руб/т; $Отх$ – отходы, руб/т; $ПП$ – попутная продукция, руб/т.

Совместная оценка экономической эффективности работы доменного цеха и технологической эффективности доменных печей при решении задачи

оптимизации в работе происходит с помощью обобщенного критерия. Обобщенный критерий имеет следующий вид

$$q = \beta \cdot Cч^H + (1 - \beta) \cdot (1 - E_{дц}) \rightarrow \min, \quad (10)$$

где β – весовой коэффициент, отражающий важность учета переменной составляющей себестоимости и оценки эффективности в составе критерия, выбирается на основе экспертного анализа; $Cч^H$ – переменная составляющая себестоимость чугуна, нормированная с помощью минимаксной нормализации; $E_{дц}$ – оценка технологической эффективности доменного цеха.

В рассматриваемой задаче оптимизируются следующие параметры, для каждой доменной печи: показатели качества кокса (истираемость кокса (M10), дробимость кокса (M25), содержание золы в коксе, содержание серы в коксе), показатели железорудного сырья (доля агломерата, содержание Fe в шихте), дутьевые параметры (содержание O_2 в горячем дутье, удельный расход природного газа, температура горячего дутья, влажность воздуха), и показатель теплового состояния доменной печи (содержание Si в чугуне).

Оптимизируемые показатели используются в факторных моделях основных показателей доменной плавки (производительности и удельного расхода кокса (УРК)).

$$УРК_i = УРК_{баз\ i} + \frac{УРК_{баз\ i}}{100} \cdot \sum_{j=1}^n (k_{ij}^{УРК} \cdot \Delta P_{ij}) + k_{i\ ПГ}^{УРК} \cdot \Delta R_{ПГ_{уд(i)}} + УРК_{рем}, \quad (11)$$

$$ПЧ_i = ПЧ_{баз\ i} + \frac{ПЧ_{баз\ i}}{100} \cdot \sum_{j=1}^n (k_{ij}^{ПЧ} \cdot \Delta P_{ij}), \quad (12)$$

где $j = 1, 2, \dots, n$ – номер параметра, влияющего на УРК и производительность; $УРК_{баз\ i}$ – значение удельного расхода кокса в базовом периоде для i -й доменной печи, кг/т; $ПЧ_{баз\ i}$ – значение производительности в базовом периоде для i -й доменной печи, т/сут; ΔP_{ij} – изменение j -го технологического параметра i -й доменной печи относительно базового периода; $k_{ij}^{УРК}$, $k_{ij}^{ПЧ}$ – коэффициент влияния j -го параметра i -й доменной печи на УРК и производительность соответственно; $k_{i\ ПГ}^{УРК}$ – коэффициент влияния удельного расхода природного газа i -й доменной печи на УРК; $\Delta R_{ПГ_{уд(i)}}$ – изменение удельного расхода природного газа относительно базового периода, м³/т; $УРК_{рем}$ – удельный расход кокса на ремонты, кг/т.

Также для описания физики доменного процесса в данной диссертационной работе используются следующие уравнения связи между значениями параметров работы доменных печей.

– теоретическая температура горения доменной печи

$$ТГД_i = 2405 + 0,75 \cdot (ТГД_i - 1200) - 5,4 \cdot W_i + 43 \cdot (O_{2i} - 21) - 52 \cdot \frac{R_{ПГ_i}}{R_{д_i}} \cdot 100, \quad (13)$$

где $ТГД_i$ – температура горячего дутья, °С, W_i – влажность дутья, г/м³, O_{2i} – объемная доля кислорода в обогащенном дутье, %, $R_{ПГ_i}$ – расход природного газа, м³/ч, $R_{д_i}$ – расход обогащенного дутья, м³/ч.

– расход технологического кислорода по каждой доменной печи

$$R_{O_2(i)} = \frac{O_{2i} - O_2^{\text{необ}}}{O_2^{\text{ТК}} - O_2^{\text{необ}}} \cdot R_{\text{д}}^{\text{об}}. \quad (14)$$

где $O_2^{\text{необ}}, O_2^{\text{ТК}}$ – объемные доли кислорода в необогащенном дутье и технологическом кислороде соответственно, $R_{\text{д}}^{\text{необ}}, R_{O_2(i)}$ – расходы необогащенного дутья и технологического кислорода соответственно.

– расхода дутья

$$R_{\text{д}(i)} = b_0 + b_1 \cdot \text{ПЧ}_{(i)}, \quad (15)$$

где b_0, b_1 – коэффициенты модели часового расхода дутья.

– расход природного газа

$$R_{\text{ПГ}(i)} = (R_{\text{ПГ}_{\text{уд}(i)}} \cdot \text{ПЧ}_{(i)})/24, \quad (16)$$

где $R_{\text{ПГ}_{\text{уд}(i)}}$ – удельный расход природного газа, м³/т.

Для расчета значений дутьевых параметров (расхода природного газа, расхода кислорода, расход дутья) для доменного цеха, используются уравнения вида:

$$P^{\text{ДЦ}} = \sum_{i=1}^n 24 \cdot kd_{(i)} \cdot P_{(i)}, \quad (17)$$

где $P^{\text{ДЦ}}$ – прогнозируемый объемы дутьевого ресурса в доменном цехе, м³, $P_{(i)}$ – прогнозируемый расход дутьевого ресурса для i -ой доменной печи, м³/ч, $kd_{(i)}$ – количество дней в месяце работы для i -й доменной печи, не включая ремонты.

Объем производства по цеху определяется как

$$\text{ПЧ}^{\text{ДЦ}} = \sum_{i=1}^n kd_{(i)} \cdot \text{ПЧ}_{(i)}. \quad (18)$$

При ведении доменного процесса в большинстве случаев необходимо удовлетворять следующим технологическим условиям, накладываемым на работу доменных печей, имеющих вид ограничений вида:

$$P_{\text{min}(i)} \leq P_{(i)} \leq P_{\text{max}(i)}, \quad (19)$$

где $P_{\text{min}(i)}, P_{\text{max}(i)}$ – минимальное и максимальное значение параметра.

Ограничений накладываются на **показатели качества кокса** (истираемость кокса (M10), дробимость кокса (M25), содержание золы в коксе, содержание серы в коксе), на **показатели качества и структуры ЖРС** (содержание железа в шихте, долю агломерата), на **дутьевые параметры** (объемную долю кислорода в обогащенном дутье, расход природного газа, температуру горячего дутья, влажность дутья), на **показатели теплового состояния доменной печи** (теоретическую температуру горения, содержание кремния в чугуна).

Также ограничения накладываются на показатели работы доменных печей: производительность и удельный расход кокса

$$\text{ПЧ}_{\text{min}(i)} \leq \text{ПЧ}_{(i)} \leq \text{ПЧ}_{\text{max}(i)}, \quad (20)$$

$$\text{УРК}_{\text{min}(i)} \leq \text{УРК}_{(i)} \leq \text{УРК}_{\text{max}(i)}. \quad (21)$$

На работу доменного цеха, как правило, накладываются следующие ограничения на производство и потребление дутьевых параметров: объем природного газа, кислорода и дутья

$$ПЧ_{зад}^{ДЦ} \leq ПЧ^{ДЦ} \leq ПЧ_{зад}^{ДЦ} + \varepsilon, \quad (22)$$

$$V_{пг}^{ДЦ} \leq V_{пг}^{ДЦ max}, \quad (23)$$

$$V_{O_2}^{ДЦ} \leq V_{O_2}^{ДЦ max}, \quad (24)$$

$$V_d^{ДЦ} \leq V_d^{ДЦ max}, \quad (25)$$

где ε – значение допустимого отклонения требуемого значения объема производства по цеху.

В уравнениях зависимости показателей доменного процесса от технологических параметров (11)-(12), как правило, используются коэффициенты из технологической инструкции, характеризующие работу среднестатистической доменной печи. В работе предлагается использовать факторные коэффициенты, входящие в режимные кластеры значений параметров доменного процесса, определяемые алгоритмами на основе кластерного анализа и комитетного подхода, которые были предложены в главе 2.

Также, предложенный в работе метод включает алгоритм, используемый для построения зависимости значений обобщенного критерия для разных объемов производства, в которой для каждой точки представлены оптимальные значения параметров работы доменных печей и цеха. Также, для каждой точки зависимости есть данные по привозу и потреблению угольного и железорудного сырья, источником которых выступают систем оптимизации привоза и потребления угольного и железорудного сырья.

Решения рассматриваемой задачи происходит с помощью разработанного алгоритм для решения задач планирования и управления доменным производством на основе кластерных моделей и комитетного подхода к принятию решений в противоречивых условиях.

На начальном шаге предложенного алгоритма происходит проверка условия, что система ограничений совместна, то есть область допустимых значений не является пустой. Для этого происходит поиск значений оптимизируемых параметров, удовлетворяющих всем технологическим условиям с помощью метода ветвей и границ по критерию

$$\max_{(x)} C(x), \quad C(x) = \sum_{j=1}^m \omega_j \mu_j(x). \quad (26)$$

где μ – вектор, составленный из характеристических функций неравенств, $\mu_j = 1$, если j -е неравенство выполняется, в противном случае $\mu_j = 0$; ω_j – коэффициенты, отражающие важность выполнения технологического условия, $\forall j, \omega_j > 0$, $\sum_j^m \omega_j = 100$.

Поиск значений параметров технологического процесса происходит для сложной многоуровневой системы, в связи с этим коэффициенты ω_j , отражающие важность выполнения условия по параметру технологического процесса, рассчитываются на основе экспертных оценок для уровня доменной печи и уровня доменного цеха.

Решение задач по критерию (26) методом дискретного программирования – ветвей и границ включает выбор направлений поиска решения и поиск значений искомых параметров.

Частные квадратичные критерии для неравенств формируются в виде функций потерь

$$q_i(x) = 0,5(g_i^+(x))^2, \quad (27)$$

где $g_i^+(x) = \begin{cases} g_i(x), & \text{если } g_i(x) > 0; \\ 0, & \text{если } g_i(x) \leq 0. \end{cases}$

Соответствующие частные производные по компонентам вектора x будут иметь вид

$$d_{jk}(x) = g_j^+(x) \frac{\partial g_j(x)}{\partial x_k}. \quad (28)$$

Оценки перспективных направлений поиска решений для ограничений системы определяются как

$$\sigma_{jk}(x) = \begin{cases} +1, & \text{при } g_{jk}(x) > 0, d_{jk}(x) < 0, \\ 0, & \text{при } g_{jk}(x) \leq 0, \\ -1, & \text{при } g_{jk}(x) > 0, d_{jk}(x) > 0. \end{cases} \quad (29)$$

где d_{jk} – частные производные частных критериев для неравенств g_{jk} .

Кроме того, определяются частные направления поиска решений

$$\delta_k = \begin{cases} +1, & \text{переменная } x_k \text{ возрастает,} \\ 0, & \text{переменная } x_k \text{ неизменна,} \\ -1, & \text{переменная } x_k \text{ убывает.} \end{cases} \quad (30)$$

В l -м направлении поиска ожидаемое значение характеристической функции j -ого соотношения системы ограничений определяется следующим образом

$$\mu_j^{\text{ож}}(l) = \begin{cases} 1, & \text{если } \forall k \sigma_{jk} \delta_k(l) \geq 0, \\ 0, & \text{если } \exists k \sigma_{jk} \delta_k(l) < 0. \end{cases} \quad (31)$$

Отсюда ожидаемое значение целевой функции (26)

$$C^{\text{ож}}(x) = \sum_{j=1}^n \omega_j \mu_j^{\text{ож}}(l). \quad (32)$$

Для нахождения реального значения целевой функции (26) в l -м направлении решение для системы неравенств определяется по критерию

$$\min_{(x)} Q^{\text{ож}}(l, x), \quad Q^{\text{ож}}(l, x) = \sum_j \mu_j^{\text{ож}}(l) \cdot (g_j^+(x))^2, \quad (33)$$

Решение задачи (33) выполняется градиентным методом на основе рекуррентного соотношения

$$x_r = x_{r-1} - \gamma_1 \left(\sum_j \mu_j^{\text{ож}}(l) \cdot g_j^+(x_{r-1}) \mathbf{grad} g_j(x_{r-1}) \right), \quad (34)$$

где γ_1 – коэффициент релаксации, применяемый на первом этапе алгоритма, \mathbf{grad} – градиент функции $g_j(x_{r-1})$.

Найденные значения по рекуррентному соотношению (34) используются для нахождения реального значения целевой функции (26) в l -м направлении поиска.

$$C^p(x) = \sum_{j=1}^n \omega_j \mu_j^p(x(l)). \quad (35)$$

Для поиска максимально совместной подсистемы на основе формул оценки ожидаемых значений составляется таблица перспективных направлений

$$Tab_s \left\{ \{ \mu_j^{ож}(l) \}, C^{ож}(l) : l \in L_{s-1} \cup L_s, C^{ож}(l) > \max \{ C_{s-1}^p(x), C_s^p(x) \} \right\}, \quad (36)$$

где L_{s-1} – множество перспективных направлений поиска, попавших в таблицу на предыдущих шагах; L_s – множество перспективных направлений поиска, рассматриваемых на текущем шаге.

На каждом шаге процедуры поиска максимально совместной подсистемы происходит выбор перспективного направления из таблицы (36). Данное направление должно иметь наибольшее ожидаемое значение целевой функции $C^{ож}$, из тех направлений для которых не было определено реальное значение целевой функции C^p . Ожидаемого значения целевой функции $C^{ож}$ определяется с помощью формул (29)-(32). На начальном шаге поиска значений оптимизируемых параметров, удовлетворяющих всем ограничениям, $\mu_i^{ож}$ для все ограничений выставляется равным 1. Далее для выбранного направления определяются значения искомым параметров и рассчитывается реальное значение целевой функции C_s^p .

Процедура поиска максимально совместной подсистемы завершается, когда в таблице (36) не удастся найти направлений, которые могли бы быть выбраны в качестве перспективных. Оптимальные значения искомым параметров соответствуют тому направлению, которое имеет наибольшее реальное значение целевой функции.

Однако по завершению процедуры поиска значений часть ограничений может нарушаться. Ввод уступок по ограничениям и повторный запуск процедуры поиска значений технологических параметров даст возможность получить полностью совместную систему технологических условий, а ее решение станет исходной точкой для следующего этапа алгоритма решения задач планирования и управления доменным производством.

Второй этап алгоритма предполагает поиск оптимальных значений оптимизируемых параметров по критерию q (10)

$$q = \beta \cdot Cч^н + (1 - \beta) \cdot (1 - E_{дц}^н) \rightarrow min.$$

при ограничениях, для которых было найдено решение на первом этапе алгоритма. Данная задача представляет собой нелинейную задачу оптимизации с ограничениями. Решение задачи происходит с помощью метода последовательного квадратичного программирования (Sequential Quadratic Programming – SQP), также известного как метод Лагранжа-Ньютона. Найденные на втором этапе алгоритма значения оптимизируемых параметров будут являться решением задачи управления доменным производством.

Используя предложенный алгоритм планирования и управления доменным производством, выполнено решение задачи на реальных данных. На рисунке 4 представлены результаты полученные для объема производства 830 тыс. т после поиска области допустимых значений. Жирным цветом выделены полученные значения оптимизируемых параметров. Для сравнения на рисунке 4 представлены значения параметров, входящих в технологические ограничения и весовые коэффициенты.

| ДП1 | ω | МИНИМУМ | ПЛАН | МАКСИМУМ |
|--------------------------------|------|---------|---------|----------|
| Истиравелост кокса (M10), % | 0,26 | 7,08 | 7,54 | 8,63 |
| Дробилост кокса (M25), % | 0,24 | 0,24 | 87,88 | 89,76 |
| Содержание золь в коксе, % | 0,21 | 0,21 | 11,17 | 11,67 |
| Содержание серы в коксе, % | 0,21 | 0,21 | 0,38 | 0,42 |
| Содержание Fe в шихте, % | 0,26 | 0,26 | 54,88 | 58,93 |
| Доля апломерата | 0,21 | 0,21 | 0,63 | 0,85 |
| Содержание O2 в дутье, % | 0,26 | 0,26 | 24,1 | 27,60 |
| Расход природного газа, м3/ч | 0,13 | 0,13 | 1833,4 | 2264,3 |
| Содержание Si в чулуе, % | 0,18 | 0,18 | 0,49 | 0,63 |
| Температура горячего дутья, оС | 0,25 | 0,25 | 1237,95 | 1253,13 |
| Влажность дутья, г/м3 | 0,14 | 0,14 | 0,68 | 3,50 |
| ТТГ, оС | 0,22 | 0,22 | 1826,4 | 2053,2 |
| УРК, кг/т | 0,29 | 0,29 | 395,2 | 465,1 |
| Производство чугуна, т/сут | 0,28 | 0,28 | 2968,2 | 3635 |
| МАКСИМУМ | | | | 4338,9 |

| ДП2 | ω | МИНИМУМ | ПЛАН | МАКСИМУМ |
|--------------------------------|------|---------|--------|----------|
| Истиравелост кокса (M10), % | 0,24 | 0,24 | 6,9 | 8,10 |
| Дробилост кокса (M25), % | 0,22 | 0,22 | 84,4 | 86,46 |
| Содержание золь в коксе, % | 0,22 | 0,22 | 11,17 | 11,61 |
| Содержание серы в коксе, % | 0,19 | 0,19 | 0,38 | 0,43 |
| Содержание Fe в шихте, % | 0,24 | 0,24 | 54,73 | 58,20 |
| Доля апломерата | 0,19 | 0,19 | 0,53 | 0,66 |
| Содержание O2 в дутье, % | 0,24 | 0,24 | 22,9 | 26,28 |
| Расход природного газа, м3/ч | 0,12 | 0,12 | 3405,4 | 4802,9 |
| Содержание Si в чулуе, % | 0,16 | 0,16 | 0,48 | 0,74 |
| Температура горячего дутья, оС | 0,23 | 0,23 | 1124,7 | 1210,00 |
| Влажность дутья, г/м3 | 0,13 | 0,13 | 0,3 | 3,50 |
| ТТГ, оС | 0,21 | 0,21 | 1542,3 | 2096,1 |
| УРК, кг/т | 0,26 | 0,26 | 389,8 | 408,95 |
| Производство чугуна, т/сут | 0,26 | 0,26 | 1972,4 | 3332,88 |
| МАКСИМУМ | | | | 4250,9 |

| ДП3 | ω | МИНИМУМ | ПЛАН | МАКСИМУМ |
|--------------------------------|------|---------|---------|----------|
| Истиравелост кокса (M10), % | 0,24 | 0,24 | 6,9 | 8,10 |
| Дробилост кокса (M25), % | 0,22 | 0,22 | 83,68 | 86,46 |
| Содержание золь в коксе, % | 0,22 | 0,22 | 11,17 | 11,61 |
| Содержание серы в коксе, % | 0,19 | 0,19 | 0,38 | 0,43 |
| Содержание Fe в шихте, % | 0,24 | 0,24 | 55,34 | 58,40 |
| Доля апломерата | 0,19 | 0,19 | 0,52 | 0,66 |
| Содержание O2 в дутье, % | 0,23 | 0,23 | 23,9 | 26,53 |
| Расход природного газа, м3/ч | 0,12 | 0,12 | 1880,4 | 1968,1 |
| Содержание Si в чулуе, % | 0,16 | 0,16 | 0,40 | 0,73 |
| Температура горячего дутья, оС | 0,23 | 0,23 | 1071,14 | 1160,00 |
| Влажность дутья, г/м3 | 0,13 | 0,13 | 0,46 | 3,50 |
| ТТГ, оС | 0,21 | 0,21 | 1804,5 | 1992,3 |
| УРК, кг/т | 0,27 | 0,27 | 394 | 413,7 |
| Производство чугуна, т/сут | 0,26 | 0,26 | 2617,2 | 3378 |
| МАКСИМУМ | | | | 3960,4 |

| ДП4 | ω | МИНИМУМ | ПЛАН | МАКСИМУМ |
|--------------------------------|------|---------|---------|----------|
| Истиравелост кокса (M10), % | 0,24 | 0,24 | 6,9 | 8,10 |
| Дробилост кокса (M25), % | 0,22 | 0,22 | 83,68 | 86,46 |
| Содержание золь в коксе, % | 0,22 | 0,22 | 11,17 | 11,61 |
| Содержание серы в коксе, % | 0,19 | 0,19 | 0,38 | 0,43 |
| Содержание Fe в шихте, % | 0,24 | 0,24 | 55,34 | 58,40 |
| Доля апломерата | 0,19 | 0,19 | 0,52 | 0,66 |
| Содержание O2 в дутье, % | 0,23 | 0,23 | 23,9 | 26,53 |
| Расход природного газа, м3/ч | 0,12 | 0,12 | 1880,4 | 1968,1 |
| Содержание Si в чулуе, % | 0,16 | 0,16 | 0,40 | 0,73 |
| Температура горячего дутья, оС | 0,23 | 0,23 | 1071,14 | 1160,00 |
| Влажность дутья, г/м3 | 0,13 | 0,13 | 0,46 | 3,50 |
| ТТГ, оС | 0,21 | 0,21 | 1804,5 | 1992,3 |
| УРК, кг/т | 0,27 | 0,27 | 394 | 413,7 |
| Производство чугуна, т/сут | 0,26 | 0,26 | 2617,2 | 3378 |
| МАКСИМУМ | | | | 3960,4 |

| ДП5 | ω | МИНИМУМ | ПЛАН | МАКСИМУМ |
|--------------------------------|------|---------|---------|----------|
| Истиравелост кокса (M10), % | 0,24 | 0,24 | 6,9 | 8,10 |
| Дробилост кокса (M25), % | 0,22 | 0,22 | 83,68 | 86,46 |
| Содержание золь в коксе, % | 0,22 | 0,22 | 11,17 | 11,61 |
| Содержание серы в коксе, % | 0,19 | 0,19 | 0,38 | 0,43 |
| Содержание Fe в шихте, % | 0,24 | 0,24 | 55,34 | 58,40 |
| Доля апломерата | 0,19 | 0,19 | 0,52 | 0,66 |
| Содержание O2 в дутье, % | 0,23 | 0,23 | 23,9 | 26,53 |
| Расход природного газа, м3/ч | 0,12 | 0,12 | 1880,4 | 1968,1 |
| Содержание Si в чулуе, % | 0,16 | 0,16 | 0,40 | 0,73 |
| Температура горячего дутья, оС | 0,23 | 0,23 | 1071,14 | 1160,00 |
| Влажность дутья, г/м3 | 0,13 | 0,13 | 0,46 | 3,50 |
| ТТГ, оС | 0,21 | 0,21 | 1804,5 | 1992,3 |
| УРК, кг/т | 0,27 | 0,27 | 394 | 413,7 |
| Производство чугуна, т/сут | 0,26 | 0,26 | 2617,2 | 3378 |
| МАКСИМУМ | | | | 3960,4 |

| ДП6 | ω | МИНИМУМ | ПЛАН | МАКСИМУМ |
|--------------------------------|------|---------|---------|----------|
| Истиравелост кокса (M10), % | 0,24 | 0,24 | 6,9 | 8,10 |
| Дробилост кокса (M25), % | 0,22 | 0,22 | 83,68 | 86,46 |
| Содержание золь в коксе, % | 0,22 | 0,22 | 11,17 | 11,61 |
| Содержание серы в коксе, % | 0,19 | 0,19 | 0,38 | 0,43 |
| Содержание Fe в шихте, % | 0,23 | 0,23 | 54,85 | 58,43 |
| Доля апломерата | 0,19 | 0,19 | 0,52 | 0,66 |
| Содержание O2 в дутье, % | 0,23 | 0,23 | 23,9 | 26,06 |
| Расход природного газа, м3/ч | 0,12 | 0,12 | 1794,25 | 2062,9 |
| Содержание Si в чулуе, % | 0,16 | 0,16 | 0,342 | 0,69 |
| Температура горячего дутья, оС | 0,22 | 0,22 | 1106,15 | 1110,00 |
| Влажность дутья, г/м3 | 0,13 | 0,13 | 0,65 | 3,50 |
| ТТГ, оС | 0,20 | 0,20 | 1776,8 | 2095,5 |
| УРК, кг/т | 0,26 | 0,26 | 382,8 | 412,31 |
| Производство чугуна, т/сут | 0,25 | 0,25 | 2573,8 | 3282 |
| МАКСИМУМ | | | | 3864,4 |

| ДП7 | ω | МИНИМУМ | ПЛАН | МАКСИМУМ |
|--------------------------------|------|---------|---------|----------|
| Истиравелост кокса (M10), % | 0,24 | 0,24 | 6,9 | 8,10 |
| Дробилост кокса (M25), % | 0,22 | 0,22 | 83,68 | 86,46 |
| Содержание золь в коксе, % | 0,22 | 0,22 | 11,17 | 11,61 |
| Содержание серы в коксе, % | 0,19 | 0,19 | 0,38 | 0,43 |
| Содержание Fe в шихте, % | 0,23 | 0,23 | 54,85 | 58,43 |
| Доля апломерата | 0,19 | 0,19 | 0,52 | 0,66 |
| Содержание O2 в дутье, % | 0,23 | 0,23 | 23,9 | 26,06 |
| Расход природного газа, м3/ч | 0,12 | 0,12 | 1794,25 | 2062,9 |
| Содержание Si в чулуе, % | 0,16 | 0,16 | 0,342 | 0,69 |
| Температура горячего дутья, оС | 0,22 | 0,22 | 1106,15 | 1110,00 |
| Влажность дутья, г/м3 | 0,13 | 0,13 | 0,65 | 3,50 |
| ТТГ, оС | 0,20 | 0,20 | 1776,8 | 2095,5 |
| УРК, кг/т | 0,26 | 0,26 | 382,8 | 412,31 |
| Производство чугуна, т/сут | 0,25 | 0,25 | 2573,8 | 3282 |
| МАКСИМУМ | | | | 3864,4 |

| ДП8 | ω | МИНИМУМ | ПЛАН | МАКСИМУМ |
|--------------------------------|------|---------|---------|----------|
| Истиравелост кокса (M10), % | 0,24 | 0,24 | 6,9 | 8,10 |
| Дробилост кокса (M25), % | 0,22 | 0,22 | 83,68 | 86,46 |
| Содержание золь в коксе, % | 0,22 | 0,22 | 11,17 | 11,61 |
| Содержание серы в коксе, % | 0,19 | 0,19 | 0,38 | 0,43 |
| Содержание Fe в шихте, % | 0,23 | 0,23 | 54,85 | 58,43 |
| Доля апломерата | 0,19 | 0,19 | 0,52 | 0,66 |
| Содержание O2 в дутье, % | 0,23 | 0,23 | 23,9 | 26,06 |
| Расход природного газа, м3/ч | 0,12 | 0,12 | 1794,25 | 2062,9 |
| Содержание Si в чулуе, % | 0,16 | 0,16 | 0,342 | 0,69 |
| Температура горячего дутья, оС | 0,22 | 0,22 | 1106,15 | 1110,00 |
| Влажность дутья, г/м3 | 0,13 | 0,13 | 0,65 | 3,50 |
| ТТГ, оС | 0,20 | 0,20 | 1776,8 | 2095,5 |
| УРК, кг/т | 0,26 | 0,26 | 382,8 | 412,31 |
| Производство чугуна, т/сут | 0,25 | 0,25 | 2573,8 | 3282 |
| МАКСИМУМ | | | | 3864,4 |

| ДП9 | ω | МИНИМУМ | ПЛАН | МАКСИМУМ |
|--------------------------------|------|---------|---------|----------|
| Истиравелост кокса (M10), % | 0,24 | 0,24 | 6,9 | 8,10 |
| Дробилост кокса (M25), % | 0,22 | 0,22 | 83,68 | 86,46 |
| Содержание золь в коксе, % | 0,22 | 0,22 | 11,17 | 11,61 |
| Содержание серы в коксе, % | 0,19 | 0,19 | 0,38 | 0,43 |
| Содержание Fe в шихте, % | 0,24 | 0,24 | 55,34 | 58,40 |
| Доля апломерата | 0,19 | 0,19 | 0,52 | 0,66 |
| Содержание O2 в дутье, % | 0,23 | 0,23 | 23,9 | 26,53 |
| Расход природного газа, м3/ч | 0,12 | 0,12 | 1880,4 | 1968,1 |
| Содержание Si в чулуе, % | 0,16 | 0,16 | 0,40 | 0,73 |
| Температура горячего дутья, оС | 0,23 | 0,23 | 1071,14 | 1160,00 |
| Влажность дутья, г/м3 | 0,13 | 0,13 | 0,46 | 3,50 |
| ТТГ, оС | 0,21 | 0,21 | 1804,5 | 1992,3 |
| УРК, кг/т | 0,27 | 0,27 | 394 | 413,7 |
| Производство чугуна, т/сут | 0,26 | 0,26 | 2617,2 | 3378 |
| МАКСИМУМ | | | | 3960,4 |

| ДП10 | ω | МИНИМУМ | ПЛАН | МАКСИМУМ |
|--------------------------------|------|---------|---------|----------|
| Истиравелост кокса (M10), % | 0,24 | 0,24 | 6,9 | 8,10 |
| Дробилост кокса (M25), % | 0,22 | 0,22 | 83,68 | 86,46 |
| Содержание золь в коксе, % | 0,22 | 0,22 | 11,17 | 11,61 |
| Содержание серы в коксе, % | 0,19 | 0,19 | 0,38 | 0,43 |
| Содержание Fe в шихте, % | 0,24 | 0,24 | 55,89 | 58,40 |
| Доля апломерата | 0,28 | 0,28 | 0,53 | 0,68 |
| Содержание O2 в дутье, % | 0,34 | 0,34 | 24,4 | 26,48 |
| Расход природного газа, м3/ч | 0,17 | 0,17 | 1599,0 | 2065,5 |
| Содержание Si в чулуе, % | 0,24 | 0,24 | 0,411 | 0,71 |
| Температура горячего дутья, оС | 0,33 | 0,33 | 701,399 | 1150,00 |
| Влажность дутья, г/м3 | 0,19 | 0,19 | 0,23 | 3,50 |
| ТТГ, оС | 0,30 | 0,30 | 1889,5 | 2141,3 |
| УРК, кг/т | 0,38 | 0,38 | 386,4 | 412,0 |
| Производство чугуна, т/сут | 0,38 | 0,38 | 3621,5 | 4888 |
| МАКСИМУМ | | | | 5552,9 |

Рисунок 4 – Полученные значения оптимизируемых параметров доменных печей для объема производства 830 тыс. т после этапа поиска области допустимых решений

В таблице 1 представлены значения обобщенного критерия q и его составляющих.

Таблица 1 – Результирующие значения обобщенного критерия q и его составляющих

| Этап работы алгоритма | Оценка эффективности доменного цеха | Переменная составляющая себестоимости чугуна | Обобщенный критерий q |
|-----------------------------------|-------------------------------------|--|-------------------------|
| Поиск области допустимых значений | 0,892 | 0,65 | 0,27 |
| Поиск оптимальных значений | 0,901 | 0,60 | 0,25 |

На этапе определения области допустимых значений для объема производства 830 тыс. т удалось найти значения искомых параметров, такие что выполнены все технологические условия, ввод уступок не потребовался. На этапе поиска оптимальных значений удалось улучшить значение обобщенного критерия.

Оптимальные значения технологических параметров для объема производства 830 тыс. т. были получены в рамках применения алгоритма определения зависимости обобщенного критерия для разных объемов производства. На рисунке 5 представлена полученная зависимость обобщенного критерия q от объема производства.

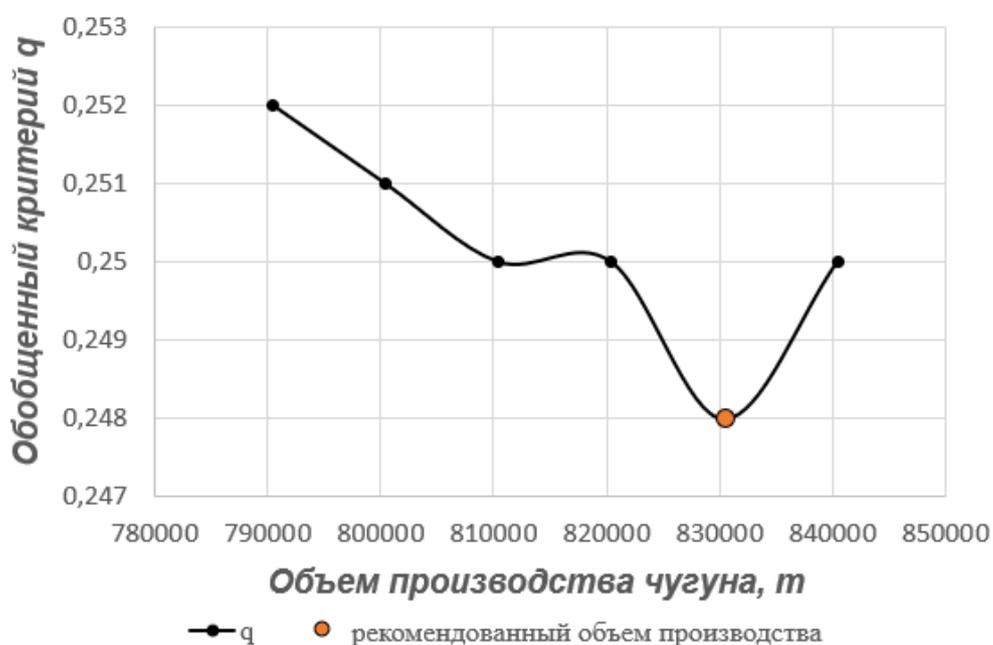


Рисунок 5 – Зависимость обобщенного критерия q от объема производства

Объем производства равный 830 тыс. т соответствует наименьшему значению обобщенного критерия q , именно он и был выбран в качестве рекомендованного объема производства.

Также в работе приведено описание решения задачи оперативного управления тепловым состоянием доменной печи. При решении данной задачи

предполагается, что структура траекторий процесса состоит из двух составляющих: относительно медленных трендов, отражающих целевое движение процесса к оптимальному температурному состоянию, и быстрых импульсных корректирующих действий, удерживающих реальный процесс на целевом тренде. В основе решения задачи оперативного управления тепловым состоянием доменного процесса, которая заключается в парировании отклонений косвенного показателя температурного состояния процесса путем корректирующих подач кокса при стабилизации значений всех остальных режимных параметров.

Расчет целевых трендов объекта управления по каналу «подача кокса → содержание кремния» в работе осуществляется с помощью следующих рекуррентных соотношения:

$$\Delta u_{\text{УРК},c+1} = \frac{T_{\text{ин},c}}{T_{\text{ин},c} + \Delta t_{c+1}} \Delta u_{\text{УРК},c} + \frac{\Delta t_{c+1}}{T_{\text{ин},c} + \Delta t_{c+1}} F_{\text{К},c} (\Delta u_{\text{К},c+1} (t_{c+1} - \tau_{\text{тр},c})), \quad c = 1, 2, \dots \quad (37)$$

$$\Delta y_{\text{Si},c+1} = g(\Delta u_{\text{УРК},c+1}), \quad (38)$$

где $T_{\text{ин}}$ – постоянная времени инерции канала; $u_{\text{УРК}}$ – удельный расход кокса; $u_{\text{К}}$ – подача кокса; $F_{\text{К}}$ – нелинейная функция; $\tau_{\text{тр}}$ – транспортное запаздывание в канале «подача кокса → содержание кремния»; y_{Si} – содержание кремния в чугуне.

Оптимизация целевого процесса происходит по критерию

$$\min_{(\Delta u_{\text{К},c+1})} (\Delta y_{\text{Si},c+1} - \Delta y_{\text{Si},c+1,p})^2. \quad (39)$$

Для поиска оптимальных значений используется градиентный метод, горизонт прогноза составляет один шаг цикла.

В четвертой главе представлено описание структуры, предложенной автоматизированной информационной системы управления доменным производством.

Автоматизированная информационная система управления доменным производством является системой поддержки принятия решений. АИС управления доменным производством реализует следующие функции: построение зависимости обобщенного критерия для разных объемов производства для принятия решений в системах бюджетирования и калькулирования, определение рекомендованного планового режимного кластера значений параметров доменного процесса и поддержка принятия решений при оперативном управлении доменным процессом.

На рисунке 6 представлена структура программного обеспечения АИС управления доменным производством, включающая в себя:

а) подсистему первичной обработки и хранения данных, обеспечивающая взаимодействие с внешними системами, сбор, первичную обработку и хранение исходных и расчетных данных АИС управления доменным производством. Данная подсистема представлена модулем интеграции и модулем сбора, хранения и архивирования данных.

б) аналитическую подсистему, отвечающая за выполнение сложных математических расчетов, выполняемых на основе предложенных алгоритмов. В аналитическую систему входят модуль экспертных оценок, модуль интеллектуального определения режимных кластеров значений параметров доменного процесса, модуль месячного планирования.

в) подсистему визуализации, представленная модулем Web-интерфейса и реализующая вывод обработанных данных эксплуатации доменных печей и расчетных данных, генерируемых АИС управления доменным производством.



Рисунок 6 – Модульная архитектура программного обеспечения АИС управления доменным производством

Веб-интерфейс пользователя АИС управления доменным производством обеспечивает возможность ввода исходных данных, визуального анализа режимов работы доменных печей (рисунок 7), запуска оптимизационного расчета и просмотра результатов (рисунок 8).

В модуле интеграции используются программные интерфейсы (API) ядра ПТК «ПолиТЭР», реализованных на языке PostgreSQL. Также в модуле интеграции используется свободно-настраиваемая схема БД.

На рисунке 7 приведен видеокادر АИС управления доменным производством, содержащий полученные рекомендованные плановые значения технологических параметров, значения обобщенного критерия и его составляющих для возможных объемов производства.

Планируемый период: 04.2024

| ДП2 | минимум | план | максимум |
|--------------------------------|---------|---------|----------|
| Истираемость кокса (M10), % | 7,08 | 7,41 | 8,63 |
| Дробимость кокса (M25), % | 87,88 | 89,55 | 90,53 |
| Содержание золы в коксе, % | 11,1 | 11,63 | 12,27 |
| Содержание серы в коксе, % | 0,36 | 0,42 | 0,52 |
| Содержание Fe в шихте, % | 54,88 | 58,86 | 59,95 |
| Доля алюмината | 0,48 | 0,64 | 0,85 |
| Содержание O2 в бугье, % | 24,1 | 27,97 | 31,16 |
| Расход природного газа, м3/ч | 18333,4 | 22922 | 26352,1 |
| Содержание SI в чулне, % | 0,349 | 0,63 | 1,155 |
| Температура горячего бугья, оС | 1237,95 | 1250,00 | 1253,13 |
| Влажность бугья, в/м3 | 0,68 | 3,50 | 22,82 |
| ТТГ, оС | 1826,4 | 2068,8 | 2078 |
| УРК, кал/т | 395,2 | 403,5 | 454,3 |
| Производство чулуна, т/сут | 2962,2 | 3035 | 4338,3 |

| ДП3 | минимум | план | максимум |
|--------------------------------|---------|---------|----------|
| Истираемость кокса (M10), % | 6,13 | 7,39 | 9,13 |
| Дробимость кокса (M25), % | 84,99 | 87,63 | 90,39 |
| Содержание золы в коксе, % | 11,05 | 11,54 | 12,2 |
| Содержание серы в коксе, % | 0,4 | 0,44 | 0,53 |
| Содержание Fe в шихте, % | 54,97 | 58,08 | 59,53 |
| Доля алюмината | 0,48 | 0,63 | 0,8 |
| Содержание O2 в бугье, % | 23,3 | 26,86 | 29,8 |
| Расход природного газа, м3/ч | 13550 | 13985 | 22544,2 |
| Содержание SI в чулне, % | 0,358 | 0,76 | 1,437 |
| Температура горячего бугья, оС | 1016,77 | 1120,00 | 1128,78 |
| Влажность бугья, в/м3 | 0,51 | 3,50 | 22,13 |
| ТТГ, оС | 1706,4 | 2078,7 | 2106 |
| УРК, кал/т | 404,4 | 414,46 | 486,9 |
| Производство чулуна, т/сут | 2298 | 2726 | 3381,3 |

| ДП4 | минимум | план | максимум |
|---------------------------------|-------------|------------|------------|
| Истираемость кокса (M10), % | 7,84 | 8,15 | 9,27 |
| Содержание Fe в шихте, % | 56,33 | 58,16 | 60,66 |
| Доля алюмината | 0,53 | 0,65 | 0,85 |
| Потребление природного газа, м3 | 9680152,8 | 103808153 | 107558153 |
| Потребление кислорода, м3 | 61950340,48 | 89027519 | 96700000 |
| Объем бугья, м3 | 1052957959 | 1100652694 | 1137939687 |
| Производство чулуна, т | 830465 | 830465 | 830465 |
| УРК, кал/т | 412,5 | 412,5 | 412,5 |

| Объем производства, т | сумма(Е, J) (нормированная) | Секстисимость (нормированная) | Обобщенный критерий q |
|-----------------------|-----------------------------|-------------------------------|-----------------------|
| 790,65 | 0,881 | 0,560 | 0,452 |
| 800,65 | 0,885 | 0,569 | 0,351 |
| 810,65 | 0,889 | 0,576 | 0,250 |
| 820,65 | 0,894 | 0,584 | 0,250 |
| 830,65 | 0,901 | 0,595 | 0,248 |
| 840,65 | 0,902 | 0,605 | 0,250 |

| ДП5 | минимум | план | максимум |
|--------------------------------|---------|---------|----------|
| Истираемость кокса (M10), % | 6,9 | 8,15 | 9,27 |
| Дробимость кокса (M25), % | 84,4 | 86,16 | 89,14 |
| Содержание золы в коксе, % | 11,17 | 11,58 | 12,15 |
| Содержание серы в коксе, % | 0,38 | 0,43 | 0,52 |
| Содержание Fe в шихте, % | 54,73 | 58,19 | 59,78 |
| Доля алюмината | 0,53 | 0,65 | 0,85 |
| Содержание O2 в бугье, % | 22,9 | 26,79 | 28,8 |
| Расход природного газа, м3/ч | 3405,4 | 18241 | 18300 |
| Содержание SI в чулне, % | 0,48 | 0,72 | 1,893 |
| Температура горячего бугья, оС | 1124,7 | 1210,00 | 1218,1 |
| Влажность бугья, в/м3 | 0,3 | 3,50 | 12,31 |
| ТТГ, оС | 1542,3 | 2114,4 | 2120 |
| УРК, кал/т | 389,8 | 407,92 | 408 |
| Производство чулуна, т/сут | 1972,4 | 332,86 | 4250,9 |

| ДП6 | минимум | план | максимум |
|--------------------------------|---------|---------|----------|
| Истираемость кокса (M10), % | 6,13 | 7,39 | 9,13 |
| Дробимость кокса (M25), % | 84,99 | 87,63 | 90,39 |
| Содержание золы в коксе, % | 11,05 | 11,54 | 12,11 |
| Содержание серы в коксе, % | 0,4 | 0,44 | 0,53 |
| Содержание Fe в шихте, % | 55,29 | 57,46 | 59,34 |
| Доля алюмината | 0,5 | 0,75 | 0,87 |
| Содержание O2 в бугье, % | 22,6 | 26,60 | 27,2 |
| Расход природного газа, м3/ч | 9450 | 9649 | 14515,4 |
| Содержание SI в чулне, % | 0,371 | 1,86 | 1,9 |
| Температура горячего бугья, оС | 950,03 | 1200,00 | 1212,1 |
| Влажность бугья, в/м3 | 2,77 | 3,50 | 18,04 |
| ТТГ, оС | 1938,6 | 2369,3 | 2380 |
| УРК, кал/т | 404,2 | 462,6 | 486,6 |
| Производство чулуна, т/сут | 1788,4 | 2621 | 3159,6 |

| ДП7 | минимум | план | максимум |
|--------------------------------|---------|---------|----------|
| Истираемость кокса (M10), % | 6,9 | 8,15 | 9,27 |
| Дробимость кокса (M25), % | 83,68 | 86,16 | 88,21 |
| Содержание золы в коксе, % | 11,17 | 11,58 | 12,08 |
| Содержание серы в коксе, % | 0,38 | 0,43 | 0,52 |
| Содержание Fe в шихте, % | 55,34 | 58,53 | 59,44 |
| Доля алюмината | 0,52 | 0,65 | 0,85 |
| Содержание O2 в бугье, % | 23,9 | 26,17 | 27,2 |
| Расход природного газа, м3/ч | 18804,9 | 20317 | 21226,3 |
| Содержание SI в чулне, % | 0,401 | 0,71 | 1,022 |
| Температура горячего бугья, оС | 1071,14 | 1160,00 | 1170,23 |
| Влажность бугья, в/м3 | 0,46 | 3,50 | 22,25 |
| ТТГ, оС | 1804,5 | 2091,8 | 2137 |
| УРК, кал/т | 394 | 411,0 | 466,7 |
| Производство чулуна, т/сут | 2617,2 | 3378 | 3980,4 |

| ДП8 | минимум | план | максимум |
|--------------------------------|---------|---------|----------|
| Истираемость кокса (M10), % | 6,4 | 7,39 | 10,78 |
| Дробимость кокса (M25), % | 83,95 | 87,63 | 90,02 |
| Содержание золы в коксе, % | 11,03 | 11,54 | 12,2 |
| Содержание серы в коксе, % | 0,39 | 0,44 | 0,53 |
| Содержание Fe в шихте, % | 55,78 | 58,77 | 60,67 |
| Доля алюмината | 0,41 | 0,65 | 0,73 |
| Содержание O2 в бугье, % | 23,1 | 26,72 | 28,5 |
| Расход природного газа, м3/ч | 20049,4 | 23590 | 29883,3 |
| Содержание SI в чулне, % | 0,407 | 0,71 | 1,394 |
| Температура горячего бугья, оС | 1007,25 | 1030,00 | 1038,36 |
| Влажность бугья, в/м3 | 0,53 | 3,50 | 13,3 |
| ТТГ, оС | 1761,7 | 2008,0 | 2047,7 |
| УРК, кал/т | 402,5 | 405,0 | 442,6 |
| Производство чулуна, т/сут | 3754,4 | 4908 | 5671,6 |

| ДП9 | минимум | план | максимум |
|--------------------------------|---------|---------|----------|
| Истираемость кокса (M10), % | 6,9 | 8,15 | 9,27 |
| Дробимость кокса (M25), % | 83,68 | 86,16 | 88,14 |
| Содержание золы в коксе, % | 11,17 | 11,58 | 12,15 |
| Содержание серы в коксе, % | 0,38 | 0,43 | 0,52 |
| Содержание Fe в шихте, % | 54,85 | 58,11 | 59,35 |
| Доля алюмината | 0,52 | 0,66 | 0,86 |
| Содержание O2 в бугье, % | 23,9 | 27,94 | 30,7 |
| Расход природного газа, м3/ч | 17942,5 | 20016 | 23501 |
| Содержание SI в чулне, % | 0,342 | 0,71 | 1,06 |
| Температура горячего бугья, оС | 1106,15 | 1110,00 | 1189,41 |
| Влажность бугья, в/м3 | 0,65 | 3,50 | 20,91 |
| ТТГ, оС | 1776,8 | 2105,8 | 2120 |
| УРК, кал/т | 382,8 | 410,91 | 472,6 |
| Производство чулуна, т/сут | 2573,8 | 3282 | 3854,4 |

| ДП10 | минимум | план | максимум |
|--------------------------------|---------|---------|----------|
| Истираемость кокса (M10), % | 7,73 | 8,50 | 10,78 |
| Дробимость кокса (M25), % | 83,95 | 87,01 | 89,37 |
| Содержание золы в коксе, % | 11 | 11,65 | 12,83 |
| Содержание серы в коксе, % | 0,3 | 0,46 | 0,54 |
| Содержание Fe в шихте, % | 55,89 | 58,15 | 59,93 |
| Доля алюмината | 0,53 | 0,68 | 0,82 |
| Содержание O2 в бугье, % | 24,4 | 26,26 | 29,5 |
| Расход природного газа, м3/ч | 19990 | 20152 | 28423,3 |
| Содержание SI в чулне, % | 0,411 | 0,73 | 1,127 |
| Температура горячего бугья, оС | 701,399 | 1150,00 | 1163,9 |
| Влажность бугья, в/м3 | 0,23 | 3,50 | 12,85 |
| ТТГ, оС | 1889,5 | 2142,5 | 2148,8 |
| УРК, кал/т | 396,4 | 411,8 | 431,6 |
| Производство чулуна, т/сут | 3821,5 | 4888 | 5552,9 |



Рисунок 7 – Результаты расчета рекомендованных плановых значений

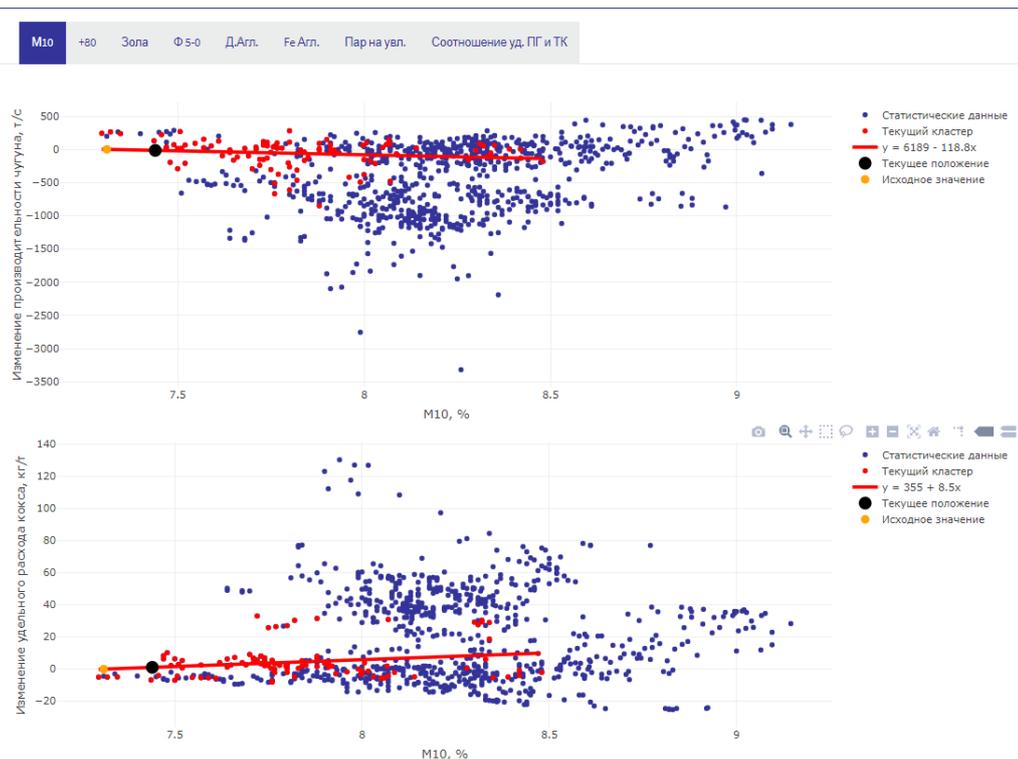


Рисунок 8 – Видеокадр модуля определения режимных кластеров значений параметров доменного процесса

Скрипты алгоритмов в аналитических модулях системы выполнены с использованием среды программирования математических расчетов RStudio на языке программирования R, имеющем открытый исходный код и предназначенного для статистической обработки данных. При разработки аналитических модулей использовались следующие пакеты `nlptr`, `doParallel`, `tidyr`, `kohonen`, `cluster` и др.

Web-интерфейс АИС управления доменным производством реализован на языке R. Для создания интерфейса использована программная среда разработки Shiny для языка программирования R. При создании web-интерфейса использовались пакеты `ggplot2`, `htmltools`, `jsonlite`, `plotly`, `lattice`, `shinydashboard`, `shinythemes`, `shinyWidgets` и др.

Автоматизированная информационная система управления доменным производством, представляющая собой систему поддержки принятия решений по управлению доменным производством персоналом технико-экономического уровня и уровня оперативного управления, внедрена в практику управления агло-коксо-доменным производством ПАО «ММК».

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Предложен новый метод решения задач планирования и управления доменным производством на основе совместной оценки экономической и технологической эффективности работы доменного цеха в противоречивых условиях, определяемых на основе кластерных моделей и комитетного подхода к принятию решений.

2. Разработаны новые алгоритмы определения режимных кластеров значений параметров доменного процесса, на основе которых выбирается эффективный режимный кластер с применением согласования взвешенных по значимости технических условий.

3. Разработан новый алгоритм решения задачи планирования и управления доменным производством на основе комитетного подхода к принятию решений в противоречивых условиях.

4. Для корпоративной АИУС на основе предложенного метода и алгоритмов разработан программно-технический комплекс поддержки принятия решений по управлению доменным производством на основе совместной оценки экономической и технологической эффективности работы доменного цеха в противоречивых условиях.

5. Проведены работы по внедрению на предприятии ПАО «ММК» разработанного программно-технического комплекса поддержки принятия эффективных решений по управлению доменным производством. Технико-экономический эффект от внедрения результатов диссертационной работы составил около 45 млн. руб. в год.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В изданиях из списка ВАК РФ

1. Automated information control system for optimal planning of blast-furnace ironmaking / L. S. Kazarinov, T. A. Barbasova, E. V. Bauman [et al.] // Bulletin of the South Ural State University. Series: Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics. – 2024. – Vol. 24, No. 4. – P. 103–112.

2. О модельно-упреждающем управлении сложными пиротехнологическими процессами / Л. С. Казаринов, Т. А. Барбасова, Е. В. Бауман, С. А. Черепанова // Приборы. – 2024. – № 4(286). – С. 32–35.

3. Применение методов машинного обучения для прогнозирования производительности доменной печи / Т. А. Барбасова, Е. В. Бауман, П. А. Самолетова, С. А. Черепанова // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2023. – № 9. – С. 48–51.

4. Алгоритм описания взаимосвязей между технологическими параметрами для решения задач управления доменной плавкой / Л. С. Казаринов, Т. А. Барбасова, Е. В. Бауман [и др.] // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2022. – № 12. – С. 16–20.

Патенты

1. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023665788 Российская Федерация. Модуль интеллектуального управления эффективностью доменной плавки : № 2023664242 : заявл. 07.07.2023 : опубл. 20.07.2023 / Т. А. Барбасова, С. А. Черепанова, П. А. Самолетова, Е. В. Бауман; заявитель Общество с ограниченной ответственностью Научно-производственное предприятие "Политех-Автоматика".

2. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025689386 Российская Федерация. Модуль оперативного определения

режимов работы доменной печи на основе выделения эффективных областей : № 2025689386: заявл. 17.10.2025 : опубл. 28.10.2025 / Д. А. Шнайдер, Е. В. Бауман Т. А. Барбасова; заявитель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)».

Научные статьи, опубликованные в других изданиях

1. Автоматизированная информационно-управляющая система оптимального планирования доменного производства / Т. А. Барбасова, Е. В. Бауман, П. А. Самолетова, С. А. Черепанова // Цифровая Индустрия: Состояние и Перспективы Развития 2023 (ЦИСП'2023) : Сборник научных статей, Челябинск, 21–23 ноября 2023 года. – Челябинск: Издательский центр Южно-Уральского государственного университета, 2024. – С. 78–87.

2. Автоматизированная система управления эффективностью доменной плавки / Т. А. Барбасова, С. А. Черепанова, Е. В. Бауман, П. А. Самолетова // НАУКА ЮУрГУ. СЕКЦИИ ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК : материалы 74-й научной конференции, Челябинск, 19 апреля 2022 года – 21 апреля 2022 года / Министерство науки и высшего образования Российской Федерации Южно-Уральский государственный университет. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2022. – С. 168–173.

3. Применение нейронной сети для определения режимов работы доменной печи / Т. А. Барбасова, Е. В. Бауман, П. А. Самолетова, С. А. Черепанова // Математическое и программное обеспечение систем в промышленной и социальной сферах. – 2021. – Т. 9, № 2. – С. 17–20.

4. Исследование дутьевых режимов доменной печи / Т.А. Барбасова, Е.В. Бауман // Научный поиск. Технические науки : материалы пятнадцатой науч. конф. аспирантов и докторантов. – Издат. центр ЮУрГУ, 2023. – С. 23–27.

Бауман Екатерина Вячеславовна
УПРАВЛЕНИЕ ДОМЕННЫМ ПРОИЗВОДСТВОМ
НА ОСНОВЕ КЛАСТЕРНЫХ МОДЕЛЕЙ
И КОМИТЕТНОГО ПОДХОДА К ПРИНЯТИЮ РЕШЕНИЙ
Специальность 2.3.3 – Автоматизация и управление технологическими процессами
и производствами

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Издательский центр Южно-Уральского государственного университета

Подписано в печать 03.03.2026. Формат 60×84 1/16. Печать цифровая.
Усл. печ. л. 1,16. Уч.-изд. л. 1. Тираж 100 экз. Заказ 31/49.

Отпечатано в типографии Издательского центра ЮУрГУ.
454080, г. Челябинск, проспект Ленина, 76.