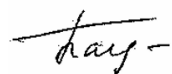


Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Южно-Уральский государственный университет
(национальный исследовательский университет)»

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

ДИССЕРТАЦИЯ
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель –
доктор технических наук, доцент
Барбасова Татьяна Александровна

Челябинск – 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
ГЛАВА 1. АНАЛИЗ ПРОБЛЕМ В ОБЛАСТИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПО УПРАВЛЕНИЮ ДОМЕННЫМ ПРОИЗВОДСТВОМ	8
1.1 Актуальные проблемы	8
1.2 Обзор литературы	10
1.3 Постановка целей и задач исследования	21
ГЛАВА 2. СТРУКТУРИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ДОМЕННЫХ ПЕЧЕЙ НА ОСНОВЕ КЛАСТЕРНОГО АНАЛИЗА	23
2.1 Постановка задачи определения режимных кластеров значений параметров доменных процесса	23
2.2 Алгоритм поиска режимных кластеров значений технологических параметров доменного процесса на основе кластерного анализа	28
2.3 Алгоритм на основе комитетного подхода к выбору режимного кластера для принятия решений	47
2.4 Применение алгоритма определения режимных кластеров значений параметров доменного процесса и алгоритма выбора режимного кластера для принятия при оперативном управлении	49
ВЫВОДЫ К ГЛАВЕ 2.....	58
ГЛАВА 3. МЕТОД ПЛАНИРОВАНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ ДОМЕННЫМ ПРОИЗВОДСТВОМ НА ОСНОВЕ СОВМЕСТНОЙ ОЦЕНКИ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ДОМЕННОГО ЦЕХА В ПРОТИВОРЕЧИВЫХ УСЛОВИЯХ	59
3.1 Метод планирования и управления доменным производством на основе совместной оценки экономической и технологической эффективности работы доменного цеха в противоречивых условиях	59
3.2 Алгоритм решения задач планирования и управления доменным производством на основе кластерных моделей и комитетного подхода к принятию решений в противоречивых условиях	73
3.3 Результаты решения задачи поиска оптимальных значений параметров работы доменных печей	82
3.4 Оперативное управление тепловым состоянием доменной печи	94
ВЫВОДЫ К ГЛАВЕ 3.....	99
ГЛАВА 4. АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ ИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ДОМЕННЫМ ПРОИЗВОДСТВОМ	100
4.1 Общее описание АИС управления доменным производством	100

4.2 Описание программного обеспечения АИС управления доменным производством	102
4.3 АИС управления доменным производством: уровень планирования и управления доменным производством.....	108
4.4 АИС управления доменным производством: уровень оперативного управления доменным печами	116
ВЫВОДЫ К ГЛАВЕ 4.....	124
ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ.....	125
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	126
ПРИЛОЖЕНИЯ	141
ПРИЛОЖЕНИЕ А. ПЕРЕЧЕНЬ ПАРАМЕТРОВ, УЧАСТВУЮЩИХ В ПОИСКЕ РЕЖИМНЫХ КЛАСТЕРОВ ЗНАЧЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ ДОМЕННОГО ПРОЦЕССА	141
ПРИЛОЖЕНИЕ Б. СВИДЕТЕЛЬСТВА НА РЕГИСТРАЦИЮ ПРОГРАММЫ ЭВМ	143
ПРИЛОЖЕНИЕ В. АКТ ВНЕДРЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ	145

ВВЕДЕНИЕ

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 доменных печах с использованием кокса в качестве восстановителя и источника тепла. Доменное производство является одним из наиболее материало- и энергоёмких процессов в чёрной металлургии. На сегодняшний день задачи снижения расхода кокса, природного газа и других ресурсов в доменном производстве остаются весьма актуальными.

Среди задач повышения эффективности доменного производства 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 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 принятия 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 в двухуровневой постановке.

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 автоматизированной информационно-управляющей системы (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.

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.

2. Разработанный программно-технический комплекс поддержки принятия решений по управлению режимами доменных процессов 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 задачи 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.

Апробация работы

Материалы диссертационной работы докладывались на 5 конференциях: 79-ой 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.)

ГЛАВА 1. АНАЛИЗ ПРОБЛЕМ В ОБЛАСТИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПО УПРАВЛЕНИЮ ДОМЕННЫМ ПРОИЗВОДСТВОМ

1.1 Актуальные проблемы

Одними из направлений деятельности металлургического предприятия включает в себя планирование работ, а также выполнение заданного плана путем управления производством. Доменное производство как часть металлургического предприятия также участвует в данных процессах.

На рисунке 1.1 представлена многоуровневая иерархическая технико-экономическая система предприятия, включающая в себя управление экономики и доменный цех. Структура доменного цеха в рамках рассматриваемой работы включает в себя руководство доменного цеха и мастеров доменных печей. Также в управлении доменным производством принимают участие технологи доменного цеха. На рисунке 1.1. разным цветом выделены структурные подразделения, принимающие участие в планировании и управлении работой доменного производства.

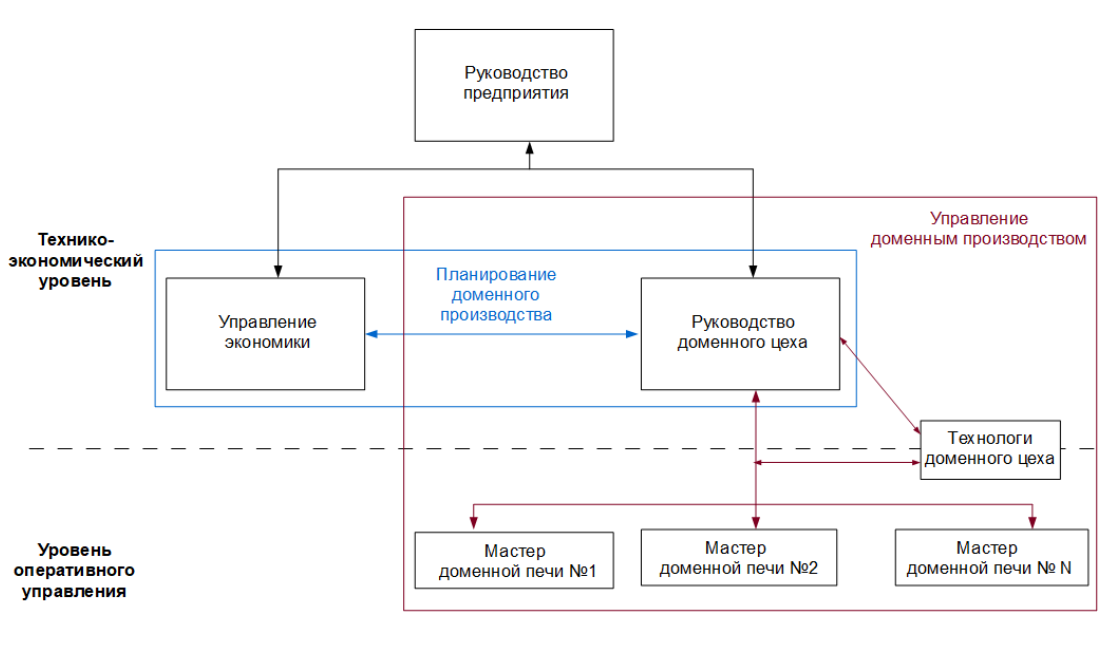


Рисунок 1.1 – Многоуровневая иерархическая технико-экономическая система металлургического предприятия

При планировании доменного производства, персонал сталкивается с проблемой поиска компромисса в рамках процедуры планирования доменного производства. Типовым случаем является, когда, с одной стороны управление экономики металлургического предприятия стремится получить максимальный экономический эффект за счет снижения затрат на производство продукции, с другой стороны производственным цехам необходимо соблюдать технологические условия для получения продукта доменной плавки, соответствующего технологическим условиям принятым нормативам.

Стоит отметить, что согласование плана происходит в условиях большой неопределенности. Предприятие при этом обладает некоторыми возможностями регулирования собственной деятельности. Могут быть заключены дополнительные заказы на производство продукции, закуплено дополнительное сырье или наоборот произведена экономия ресурсов, которые будут излишними, повышена или снижена эффективность оборудования.

Также немало важно, что согласование плана производства происходит в короткий период времени, требует проведения большого количества сложных расчетов, в связи с чем выполнить расчет для нескольких вариантов плана в большинстве случаев не представляется возможным.

В связи с этим у предприятий существуют потребности в разработке инструментов, позволяющих оценить различные варианты производственных планов.

Актуальными проблемами в области принятия решений по управлению доменными процессами являются:

- 1) выбор эффективных режимов доменных процессов в условиях высокой вариативности входных материалов;
- 2) снижение удельного расхода кокса;
- 3) повышение качества моделей доменного процесса
- 4) повышение качества принятия решений при оперативном управлении доменным процессом.

1.2 Обзор литературы

Исследованию процессов доменной плавки посвящено множество работ из разных областей науки и техники. Существенный вклад в изучение доменного процесса внесли отечественные исследователи Товаровский И.Г. [60-62], Готлиб А.Д. [14,15], Спирин Н.А., Лавров В.В., [50, 51], Рамм А.Н. [41-42], Паршаков В.М. [38-40] и др.

Среди зарубежных исследователей в этой сфере известны Kule J. [92], Sasaki M., Ono K., Suzuki A. [101]; Burgess J.M., Jenkins D.R., Hockings K.L. [75]; Kumar D. [93], Yagi J. [108], Gobetto M. [86] и др.

Одно из направлений работ включает анализ использования шихтовых материалов и кокса и их подготовки [12, 43, 57, 58, 63, 67, 105]. Знание влияния качества сырья на доменный процесс позволяет определить оптимальное соотношение железорудных материалов (агломерата и окатышей), приводящее к снижению расхода кокса. Изучение влияния примесей в сырье на ход плавки и качество ее продуктов, дает возможность сформулировать требования к подготовке железорудных материалов, выполнение которых позволит улучшить показатели доменного процесса, а также улучшить качество стали, для производства которой используется чугун. Так сера придает красноломкость стали при прокате, что увеличивает затраты предприятия. При это серу легче удалять из руды и чугуна. В доменный процесс она поступает в основном из золы кокса, поэтому на коксохимическом производстве стараются снижать содержание серы в коксе.

Другое направление исследований связано с совершенствованием дутья и вдуванием восстановителей [29, 64, 97]. Научные работы позволяют определить оптимальные параметры дутья (температуры, влажности, содержание кислорода), оценить влияние вдувания пылеугольного топлива, природного газа и водорода на ход доменной плавки. Грамотное задание соотношения составляющих комбинированного дутья позволяет повышать КПД горения, что в свою очередь ведет к интенсификации технологического

процесса, в результате чего происходит увеличение производительности доменной печи. При этом вдувание восстановителей позволяет частично заменять кокс, тем самым снижая его расхода и затраты на его получение.

Еще одним направлением научных работ по анализу доменного процесса является разработка математических и цифровых моделей [18, 86]. В работах этого направления строятся модели тепломассообмена, газодинамики и химических реакций в печи [3, 25], создаются цифровые двойники [87]. Применение моделей доменного процесса позволяет снижать колебания температуры чугуна и содержания кремния в чугуне, тем самым снижая перерасход топлива.

Работы, посвященные анализу доменного процесса, позволяют выявлять узкие места технологического процесса, более точно его описывать, так как доменный процесс относится к плохо наблюдаемым технологическим процессам. Работы, относящиеся к описанным направлениям, позволяют снижать расход кокса – основного дорогостоящего вида топлива для доменных печей, а также повышать производительность печей. Улучшение указанных показателей доменного процесса позволяет повысить эффективность доменного процесса.

Моделирование доменного процесса является нетривиальной задачей в виду того, что в доменной печи одновременно протекает большое число разнообразных физических и химических подпроцессов. При этом процесс получения чугуна является плохо наблюдаемым из-за трудностей измерения параметров, характеризующих протекание подпроцессов. Еще одной сложностью является то, что для проведения экспериментов доступно ограниченное количество управляющих воздействий.

Одним из типов моделей для описания процессов доменной плавки, представленных в литературе – модели, построенные на основе аналитического подхода, который предполагает, что взаимосвязи между входными и выходными переменными модели устанавливаются

с использованием универсальных законов сохранения и ряда других фундаментальных физических и физико-химических закономерностей [56].

К аналитическим моделям относятся балансовые модели. Эти модели строятся на основе материальных и тепловых балансов, которые отражают взаимосвязи между параметрами процесса и показателями, характеризующими процессы массо- и теплообмена. Указанные показатели являются трудноизмеримыми из-за чего достоверность информации находится на низком уровне, в следствие чего балансовые модели зачастую имеют высокую погрешность.

Также к аналитическим моделям относятся кинетические модели, которые предполагают решение дифференциальных уравнений, описывающих тепло- и массообмен внутри доменной печи с учетом химических превращений. С помощью этого типа моделей оценивают влияние на показатели работы печи таких параметров плавки, как восстановимость, степень металлизации железорудных материалов, реакционная способность кокса и определяют общие закономерности динамических характеристик печи по различным каналам. [17, 54].

Основы балансовых моделей были заложены А.М. Рамом в 70-80 годах [42]. Дальнейшее развитие балансовых моделей связано с работами сотрудников УрО РАН [66], разработавших балансовую логико-статистическую модель. В рамках натурно-модельного подхода в УГТУ-УПИ-УРФУ была создана балансовая модель доменного процесса [55], которую в 2022 году усовершенствовали сотрудники УрФУ – ММК [34]. Причиной потребности в улучшении модели стало недостаточно полное использование обессеривающей способности шлака.

Модели на основе балансовых моделей также разрабатывались и зарубежными учеными [87,106].

Один из примеров кинетической модели доменного процесса – модель, разработанная в работе [32], включающая в себя уравнения материального и теплового баланса, теплообмена между потоками газов и шихтовых

материалов, кинетики основных физико-химических процессов, граничных условий, отражающих технологические особенности доменного процесса.

Другим подходом к моделированию доменного процесса является построение моделей на основе производственной статистики. Сюда относятся модели, построенные на основе метода «черного ящика». Сущность этого метода заключается в том, что на основе экспериментальных данных (область используемых значений выходов и входов объекта моделирования) устанавливаются математические соотношения между входами и выходами. Данный подход разрабатывается в Сибирском государственном университете для описания доменной плавки и других металлургических процессов [1].

В настоящее время большое развитие получило применение методов машинного обучения и интеллектуального анализа больших данных для моделирования сложных технологических процессов во многих отраслях промышленности в том числе и металлургии [102, 107, 112, 113].

Это стало возможным благодаря развитию теории моделирования знаний, а также созданию мощных баз данных технологических параметров, наполняющихся в реальном времени. Немаловажным оказалось то, что с помощью машинного обучения возможно моделировать сложные объекты, к которым относится доменный процесс [53, 90, 104, 107].

Так в статье [111] исследователи провели сравнительный анализ применения различных методов машинного обучения для прогнозирования индикаторов теплового состояния доменной печи. Авторы строили модели начиная с применения классических методов таких как метод частичных наименьших квадратов, затем использовались модели на основе случайных и регрессионных лесов и в конце было рассмотрено применение нейронных сетей для прогнозирования теплового состояния доменной печи.

Методы искусственного интеллекта позволяют анализировать большие объемы данных [88], выявлять скрытые закономерности [91] и зависимости [28], а также решать сложные оптимизационные задачи.

Использование нейронных сетей для моделирования доменного процесса было рассмотрено также в статьях [77, 95, 114]. В этих работах исследователи улучшали существующие модели нейронных сетей для повышения качества прогнозирования. В работах [95,114] авторы работали с параметрами нейронных сетей, а в [77] была создана модель, в которой использовался ансамбль нейронных сетей.

В работах [69, 78, 80, 93, 99, 100] были использованы искусственные нейронные сети при прогнозировании показателей теплового состояния доменной печи. Для прогноза температуры чугуна на выходе доменной печи в работе [69] была обучена многослойная нейронная сеть, на вход которой подавалось одиннадцать параметров доменного процесса. В работе [80] создана модель, позволяющая прогнозировать содержание кремния в чугуне по значениям параметров доменной плавки. Автор работы [93] прогнозировал температуру горения с помощью разработанной искусственной нейронной сети. В работе [100] авторы сравнивали результаты прогнозирования температуры доменной печи, построенные с помощью множественной линейной регрессии, авторегрессионной интегрированной модели скользящего среднего и искусственной нейронной сети. Прогноз нейронной сети оказался наиболее точным среди рассмотренных в работе моделей. Для прогнозирования температуры электродуговой печи в [81] была использована модель на основе нейронной сети, способной решать задачи кластеризации – самоорганизующейся карты Кохонена.

Модели доменного процесса на основе машинного обучения используются для повышения наблюдаемости технологического процесса [82, 94]. В работе [112] предложен алгоритм виртуального датчика, оценивающего температуру чугуна и содержание кремния в нем. Разработанный алгоритм включает нечеткую кластеризацию и экзогенную нелинейную авторегрессионную модель.

В литературе также встречаются гибридные модели, включающие в себя аналитические модели и модели, построенные на основе

производственной статистики. Так для прогнозирования теплового состояния доменной печи зарубежными учеными была предложена модель [70-72] включающая в себя статическую модель, основанную на равновесных материальном балансе и балансе энтальпий, и динамической модели по типу «черного ящика», позволяющая уменьшить ошибку статической модели. Динамическая модель основана на авторегрессионной нейронной сети.

Подобная стратегия была использована отечественными учеными. В Сибирском государственном индустриальном университете [53] был разработан подход, предусматривающий выделение двух моделей – базового состояния и прогнозирующей. Модель базового состояния по натурным данным о параметрах и показателях работы печи позволяет оценивать показатели состояния системы и использовать их для расчета коэффициентов настройки (адаптации) прогнозирующего блока модели. Прогнозирующая модель способна оценивать проектные показатели доменного процесса при изменении условий плавки относительно текущего состояния.

При применении моделей доменного процесса в различных алгоритмах важно учитывать их особенности.

Моделям построенными на основе аналитического подхода свойственна высокая прогнозная способность, так как установленные зависимости отражают общие закономерности технологического процесса. Однако из-за наличия сложных систем уравнений и большого количества эмпирических данных и коэффициентов кинетические модели имеют низкое быстродействие, поэтому использование этих моделей для задач управления процессом является затруднительным. Кроме того, балансовые и кинетические модели имеют невысокую точность, т.к. часть показателей, входящих в модель трудноизмеримы.

Модели, построенные на статистических данных, к которым также относятся модели на основе методов машинного обучения, не требуют специальных знаний физических и физико-химических закономерностей описания процесса. Однако полученные таким образом количественные

зависимости между параметрами и показателями процесса справедливы только для доменной печи, на которой они были установлены. При изменении технологии ведения доменного процесса или применении на другом технологическом объекте моделям этого типа, в отличие от моделей на основе аналитического подхода, требуется переобучение. Повысить эффективность моделей на основе статистических данных в условиях часто меняющихся производственных условий можно путем добавления к ним модуля автоматического переобучения.

Процессы, происходящие в доменной печи, имеют высокую сложность, в связи с этим существует проблема разработки математических моделей, которые бы имели достаточную степень адекватности и точности в любой ситуации.

Доменный процесс характеризуется большим количеством параметров, на которые накладываются ограничения и которые используются в критериях оптимизации, что затрудняет поиск оптимальных управляющих воздействий.

Указанная особенность доменного процесса и отсутствие универсальных точных моделей процесса препятствуют реализации полной автоматизации управления работой доменной печи.

Альтернативным вариантом повышения эффективности управления доменной плавкой является применение автоматизированных управляющих системы с элементами систем поддержки принятия решений (СППР) [35, 89, 98]. Данный тип систем позволяет в условиях неопределенности и высокой сложности технологического процесса, такого как доменный процесс, принимать эффективные и обоснованные решения по управлению [54].

В существующих научных работах представлены описания как автоматизированных систем управления с элементами СППР, так и отдельно СППР. К СППР относятся модельные, экспертные и другие виды систем.

Для диагностики состояния футеровки и поддержки принятия решений в работе [103] была разработана система мониторинга теплового состояния

на основе температурного распределения в огнеупорной футеровке различных частей доменной печи. Система позволяет принимать решения по заданию значений загрузочных или дутьевых параметров для упреждающей корректировки аномалий в доменной печи.

В работе [31] была разработана интеллектуальная СППР, основанная на диагностике состояния доменного процесса. Диагностика происходит с использованием критериев оценки нескольких параметров ключевых режимов доменной плавки, таких как тепловой, газодинамический и др.

Положения модельной системы на основе балансовых моделей были представлены в статье [84]. Предложенная авторами система основана на модели, прогнозирующей потребление углерода. Предсказанные значения используются при принятии упреждающих решений по управлению потреблением топливных ресурсов доменной печи.

В 80-90 годах в Японии происходило широкое распространение экспертных систем для решения таких задач как управление ходом печи, контроль состояния горна, движения шихты, контроль состояния оборудования и управлением тепловым состоянием. Также в Южной Корее в 90-х годах была внедрена экспертная система способная проводить диагностику образования неактивной зоны в нижней части шахты печи, нарушения равномерности газового потока, выработку управляющих воздействий для предотвращения нестабильной работы печи.

В конце 1970-х в Европе финская компания Ruukki и австрийская компания Voest-Alpine Stahl Linz (VASL) разработали автоматизированные системы управления доменной плавкой, работавших в режиме советчика. При разработке этих систем использовались математические модели технологических процессов, экспертных систем и других методов искусственного интеллекта.

В 90-х года экспертная система Vairon, разработанная VASL и VAI, претерпела несколько этапов развития. В начале работы помимо анализа данных технологического процесса система выдавала рекомендации

оператору по управлению, окончательные решения по которым принимал технолог. Далее система Vairon была модернизирована до экспертной системы с обратной связью, работающей в реальном времени. После этого возможности системы были расширены и теперь система позволяла регулировать основные технологические параметры в замкнутом цикле [9].

В России сотрудники ряда организаций НПО «Черметавтоматика», МИСиС, Российского института искусственного интеллекта, Института системного анализа РАН, УрФУ (УГТУ-УПИ), Уральского отделения РАН и др. активно занимались разработкой научных основ создания экспертных систем доменной плавки [49, 50, 52].

В России в начале 2000-х была разработана первая отечественная экспертная система «Интеллект доменщика» и опробована в доменном цехе ОАО «ММК». Данная система позволяет диагностировать такие виды расстройств доменной печи (периферийный ход печи, перекоп уровня засыпи, горячий, холодный ход печи, аварийные ситуации и др.) и определять их причины. Также система проводит непрерывную оценку состояния ровного хода печи и прогнозирует дальнейшее развитие процессов в доменной печи. Система «Интеллект доменщика» способна выдавать рекомендации по управляющим воздействиям в случае возникновения отклонений от нормального хода.

Немного позже под руководством В.М. Паршакова была разработана автоматизированная система контроля, оптимизации и прогноза доменной плавки (АСКОП ДП) [52].

В статье [68] приведен обзор приемов по управлению тепловым состоянием доменного процесса. Помимо моделей и других техник для оценки и управления тепловым состоянием доменной печи авторы привели описание систем поддержки принятия решений, среди которых есть экспертная система, представленная на научно-практической конференции IFAC в 1991 году. Эта экспертная система предназначена для прогнозирования состояния печи и выработки управляющих воздействий. Система включает в себя модель

знаний, состоящую из набора правил и разработанную на основе матрицы коэффициентов корреляции между параметрами работы доменной печи и прогнозных переменных, характеризующих состояние доменной печи такие как содержание кремния и серы в чугуна, температуры чугуна на выходе из печи и основности шлака. Также в обзоре [68] представлено описание системы поддержки принятия решений, которую внедрила австралийская компания BlueScope Steel. Данная система помогает в управлении тепловым балансом доменной печи, выдавая рекомендации оператору по изменению параметров, оказывающих влияние на тепловое состояние доменной печи.

Недавно в России была разработана интеллектуальная система поддержки принятия решений на основе распознавания видеообразов фурменных очагов доменной печи [7]. В системе используется метод раннего обнаружения тенденции возникновения определенных ситуаций на фурмах, в том числе – приводящих к дестабилизации технологического процесса в доменной печи. Построение метода происходило на основе выявляемых закономерностей в изменении видеоданных и посредством разработанного авторами алгоритма анализа и прогнозирования динамики технологического процесса. Авторы отмечают, что новизна подхода, предложенного в системе, заключается в том, что «прогнозируется не только состояние процесса в следующий момент времени, но также наиболее вероятная цепочка из нескольких последующих состояний.»

В настоящее время активно развивается направление по созданию автоматизированных информационных систем планирования и оптимального распределения ресурсов между технологическими агрегатами.

Одним из первых ученых, кто показал, что математические методы могут быть применены при решении задач организации и планирования из области промышленности, строительства, транспорта и сельского хозяйства был советский математик Канторович Л.В. В 1939 году он предложил методы организации и планирования производства [22].

Авторами статьи [11] было охарактеризовано текущее состояние вопроса планирования ресурсов промышленного предприятия. В работе было отмечено, что «оптимизационное планирование на большинстве предприятий реализуется на базе арифметических моделей в пакете электронных таблиц, что не соответствует уровню решаемых управленческих задач в экономике XXI века, особенно в кризисных условиях функционирования». В заключении авторы делают вывод, что применение автоматизированных систем дает возможность повысить уровень оптимизационного планирования, что ведет к повышению оперативности и качеству оперативных решений.

В работах [16, 51, 52] разработаны автоматизированные системы оптимального распределения сырьевых и топливно-энергетических ресурсов в комплексе доменных печей. Системы построены на основе балансовой модели теплового, газодинамического и шлакового режимов доменной плавки УрФУ-ММК.

Метод повышения эффективности сталеплавильного производства на основе унификации химических составов стали был предложен учеными Череповецкого государственного университета (ЧГУ) [23]. Данный метод включает в себя модель увеличения комбинированности (унификации) химических составов стали; позволяющей достичь повышения серийности разливаемой стали, снижения количества отказов и загрузки склада малоликвидной продукцией. Также в метод входит модель оптимального распределения заказов по агрегатам «печь–ковш». Критерием оптимальности распределения является минимальный объем излишков продукции, получаемых в результате плавки, с учетом ее минимальной удельной стоимости.

Модель унификации химических составов стали, предложенная авторами, была применена при создании методов распределения заказов между плавками для минимизации излишек в сталеплавильном производстве [24]. Предложенные методы позволяют оптимально распределять заказы между агрегатами. Постановка задачи оптимизации

представлена в виде графа, для поиска решения использовался алгоритм Брона-Кербоша, представляющий собой метод ветвей и границ для поиска всех клик ориентированного графа.

Также учеными ЧГУ был предложен алгоритм оптимизации работы стана 5000 с применением технологий искусственного интеллекта, который позволит эффективно планировать процессы прокатки и нагрева [26]. Критерием оптимизации выступает минимизация суммарного затраченного времени на прокатку и нагрев слябов.

Обзор литературы показал, что учеными было проведено множество исследований, посвященных пониманию природы процессов доменной плавки. Однако на сегодняшний день процессы, происходящие внутри доменной печи, все еще несут в себе большую неопределенность. Одним из способов борьбы с неопределенностью является внедрение гибких моделей. В связи с чем в системы поддержки принятия решений по управлению доменным производством следует включить гибкие модели работы доменных печей.

В большинстве случаев системы планирования производства работают, учитывая сильно упрощенные физические зависимости технологических процессов, либо вовсе их не учитывают, а используют нормы расхода сырья или времени. Перспективным направлением является создание систем планирования и управления производством, анализирующие характеристики входного сырья технологического процесса, зависимостей между технологическими параметрами и показателями качества процесса, при формировании рекомендаций персоналу для принятия эффективных решений.

1.3 Постановка целей и задач исследования

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 принятия 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 в двухуровневой постановке.

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.

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

ГЛАВА 2. СТРУКТУРИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ДОМЕННЫХ ПЕЧЕЙ НА ОСНОВЕ КЛАСТЕРНОГО АНАЛИЗА

2.1 Постановка задачи определения режимных кластеров значений параметров доменных процесса

При оперативном управлении доменным процессом на металлургических предприятиях часто используются технологические инструкции, рассчитанные для усредненных условий работы доменных печей. Однако в реальных технологических условиях значения технологических параметров каждой доменной печи индивидуальны. Это связано с тем, что доменные печи работают на разном качестве шихтовых материалов и кокса, а также имеют особенности, связанные с конструкцией доменных печей и характеристиками обслуживающего оборудования: кауперов, засыпных устройств и др.

Для учета особенностей доменных печей в диссертационной работе предлагается создание гибких моделей на основе кластерного анализа статистики работы доменных печей.

Моделирование и прогнозирование состояния доменного процесса предполагает его декомпозицию на режимы, которые отражают особенности протекания определённой группы явлений в печи. Для доменной плавки выделяют следующие ключевые режимы: дутьевой режим, процессы восстановления оксидов железа, шлаковый режим, газодинамический режим, тепловой режим.

Дутьевой режим характеризует процессы, протекающие в фурменной зоне доменной печи. Для оценки дутьевого режима используют параметры комбинированного дутья (количество, состав, температура восстановительных газов), показателя интенсивности горения топлива (теоретическая температура горения).

Восстановление оксидов железа в доменной печи происходит через косвенный и прямые процессы восстановления, для анализа которых используют индекс косвенного восстановления, количеством железа, восстановленного в нижней зоне печи прямым путем.

Немаловажным для доменного процесса является формирование столба шихтовых материалов, который зависит от процессов взаимного движения шихты и газа. Эти процессы составляют газодинамический режим доменной плавки. Оценка данного режима осуществляется по характеристикам газового потока, качеству загружаемой шихты, параметрам теплообменных процессов.

На формирование столба шихтовых материалов и восстановление оксидов железа влияет шлаковый режим, который включает в себя процессы образования шлака в доменной печи и расплавления пустой породы. Анализ шлакового режима происходит по характеристикам шлака, таким как вязкость, десульферирующей способности.

Шлаковый и газодинамический режим зависят от теплового режима, характеризующегося показателями степени развития теплообменных процессов между потоками газа и шихты в верхней и нижней зонах печи.

Все перечисленные режимы тесно взаимосвязаны: изменение одного из них неминуемо влияет на остальные. Поэтому управление доменной печью – это комплексная задача поддержания баланса между всеми режимами для обеспечения стабильной, экономичной и качественной работы агрегата [13, 59].

Для управления доменным процессом в работе предлагается создание гибких моделей, учитывающих в комплексе параметры ключевых режимов доменной печи. Построение таких моделей стало возможным, так как на современных доменных печах происходит сбор значений параметров доменного процесса, формирующие статистику работы доменной печи. Предлагаемые гибкие модели включают в себя режимные кластеры значений технологических параметров доменного процесса, представляющие собой

наборы статистических данных, характеризующих определенный период режим работы технологического оборудования. Данные, входящие в эти наборы, близки друг к другу по значениям показателей качества шихты, параметров газодинамического режима и показателей теплового состояния доменной печи и другим параметрам доменного процесса.

Предпосылкой для разработки алгоритма определения режимных кластеров параметров доменного процесса послужили множество работ, в которых был применен кластерный анализ и методы машинного обучения для моделирования и управления работой доменных печей [19, 27, 73, 74, 104, 109, 110], и проведенное в рамках работ над диссертацией, исследование, посвященное поиску групп параметров дутьевого режима доменной печи [4]. В указанном исследовании рассматривалась статистика доменной печи на ограниченном числе переменных путем анализа временных графиков и графиков распределения значений дутьевых параметров (рисунки 2.1, 2.2), в результате которого были получены группы параметров дутьевого режима доменной печи.

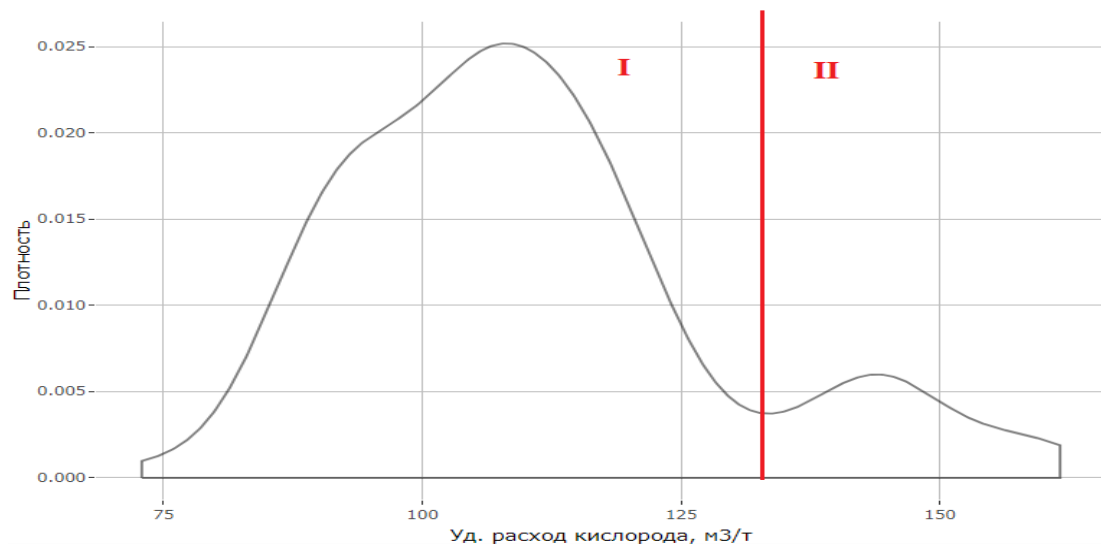


Рисунок 2.1 – Пример разделенного графика распределения значений параметра «Удельный расход кислорода»

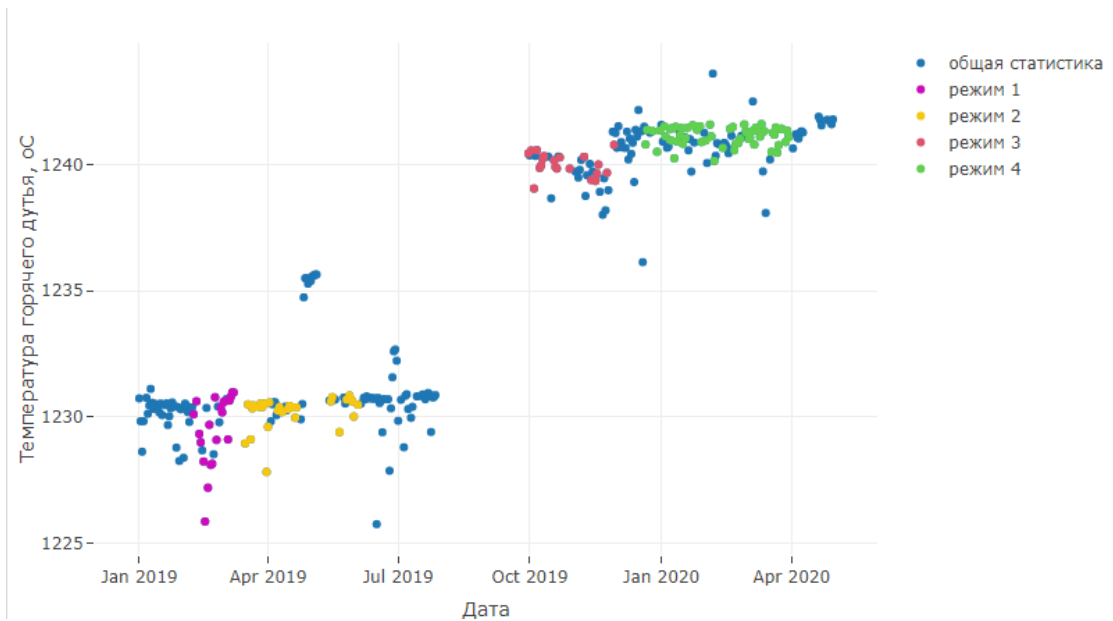


Рисунок 2.2 – Пример временного графика
для параметра «Температура горячего дутья»

Далее приведем полученные в исследовании результаты, которые послужили базой для формирования представления об режимных кластерах значений параметров доменной печи. Так в таблице 2.1 представлены средние значения дутьевых параметров в полученных группах.

Таблица 2.1 – Характеристики полученных групп

№ группы	Средние значения показателей дутьевого режима				
	Уд. расход ПГ, м ³ /т	Содержание O ₂ в дутье, %	Уд. расход O ₂ , м ³ /т	Температура горячего дутья, °C	Расход дутья, м ³ /мин
1	99,84	27,78	105,6	1229,55	3398,78
2	125,84	29,32	133,62	1230,24	3374,91
3	122,67	28,22	89,83	1240,00	2713,43
4	131,99	30,16	107,22	1241,13	2570,51

Также каждая группа характеризуется построенной в ней зависимостями производительности и удельного расхода кокса (УРК) от отношения расходов природного газа и технологического кислорода ($V_{пг}/V_{тк}$) (рисунки 2.3, 2.4), который связан с теоретической температурой

горения, используемой для анализа дутьевого режима доменной печи [33].

В таблице 2.2 представлена аналитическая запись зависимостей.

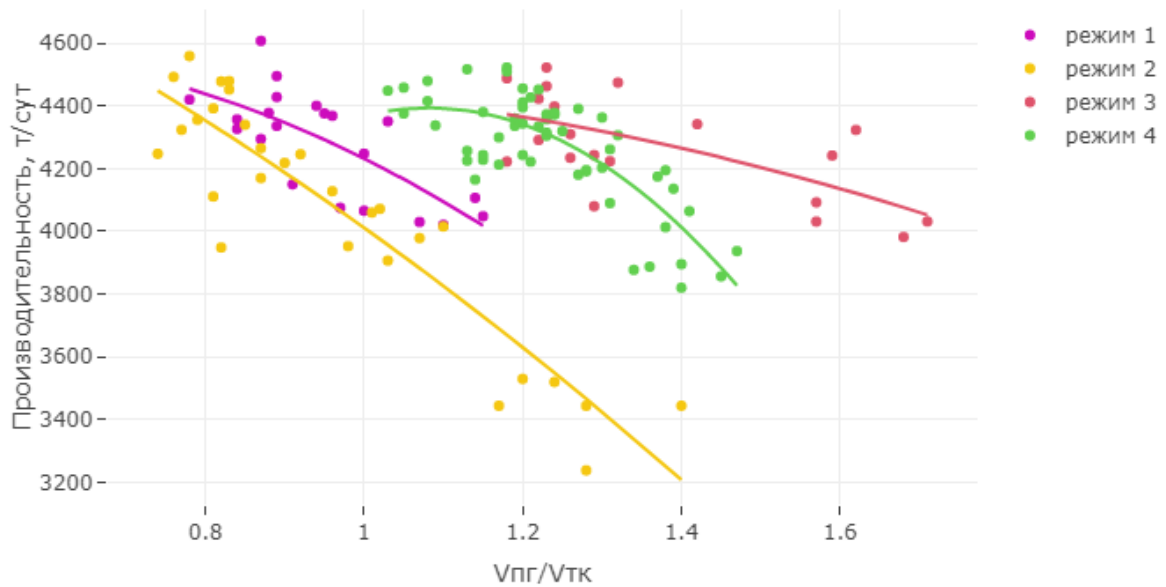


Рисунок 2.3 – Зависимости производительности от $V_{пг}/V_{тк}$

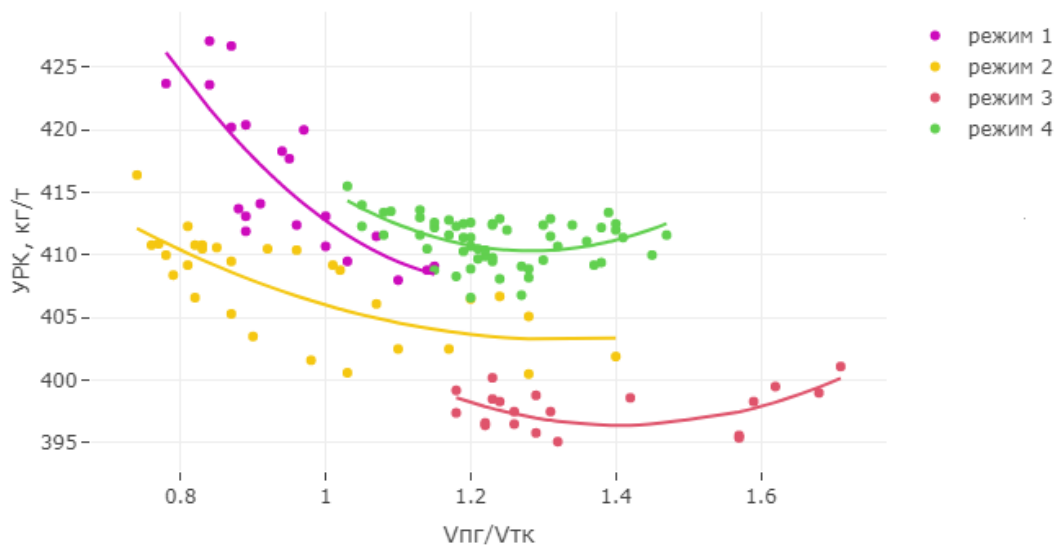


Рисунок 2.4 – Зависимости УРК от $V_{пг}/V_{тк}$

Таблица 2.2 – Аналитическая запись полученных зависимостей

Режим	Показатель доменной плавки	Аналитическая зависимость
1	Производительность	$ПЧ = 4372,01 + 978,57 \cdot \frac{V_{ПГ}}{V_{ТК}} - 1118,6 \cdot \left(\frac{V_{ПГ}}{V_{ТК}}\right)^2$
	УРК	$УРК = 542,06 - 216,86 \cdot \frac{V_{ПГ}}{V_{ТК}} + 87,56 \cdot \left(\frac{V_{ПГ}}{V_{ТК}}\right)^2$
2	Производительность	$ПЧ = 5319,48 - 807,52 \cdot \frac{V_{ПГ}}{V_{ТК}} - 500,4 \cdot \left(\frac{V_{ПГ}}{V_{ТК}}\right)^2$
	УРК	$УРК = 448,59 - 68,28 \cdot \frac{V_{ПГ}}{V_{ТК}} + 25,71 \cdot \left(\frac{V_{ПГ}}{V_{ТК}}\right)^2$
3	Производительность	$ПЧ = 4346,78 + 454,95 \cdot \frac{V_{ПГ}}{V_{ТК}} - 366,68 \cdot \left(\frac{V_{ПГ}}{V_{ТК}}\right)^2$
	УРК	$УРК = 479,75 - 118,25 \cdot \frac{V_{ПГ}}{V_{ТК}} + 41,93 \cdot \left(\frac{V_{ПГ}}{V_{ТК}}\right)^2$
4	Производительность	$ПЧ = -3,28 + 8129,16 \cdot \frac{V_{ПГ}}{V_{ТК}} - 3757,45 \cdot \left(\frac{V_{ПГ}}{V_{ТК}}\right)^2$
	УРК	$УРК = 512,95 - 159,95 \cdot \frac{V_{ПГ}}{V_{ТК}} + 62,33 \cdot \left(\frac{V_{ПГ}}{V_{ТК}}\right)^2$

Полученные в исследовании дутьевого режима группы параметров послужили прототипом для режимных кластеров значений параметров доменного процесса, определяемых с помощью предложенных в работе алгоритмов.

2.2 Алгоритм поиска режимных кластеров значений технологических параметров доменного процесса на основе кластерного анализа

В диссертационной работе предлагается алгоритм, использующий статистические данные работы доменных печей, включающие в себя параметры из всех ключевых режимов доменной плавки. В приложении А представлен перечень используемых параметров для создания гибких моделей с помощью методов кластерного анализа.

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

На начальном шаге алгоритма происходит предварительная обработка исходных данных. Данные, используемые для определения режимных кластеров значений параметров доменного процесса, включают в себя параметры характеризующие ключевые режимы работы доменной печи: дутьевые параметры, химический состав чугуна, химический состав шлака, характеристики шихты и показатели эффективности доменной плавки (производство чугуна, удельный расход кокса (УРК)).

Статистические данные работы доменных печей часто содержат шумы, имеют разную дискретность по времени, в виду того, что источники данных различаются, так, например, данные анализа состава продуктов доменной плавки (чугуна, шлака) получают после каждого выпуска (примерно каждые 2 часа) в химических лабораториях, значения дутьевых параметров считываются с помощью датчиков и измерительных устройств непрерывно (каждые 15 мин).

Предварительная обработка данных в предложенном алгоритме включает 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 исключения статистики, относящейся к ремонтам и нештатным ситуациям, в предложенном алгоритме используется информация о проведенных ремонтах, также анализируются значения технологических параметров, например, значения параметров «содержание кремния» и «удельный расход кокса», которые могут иметь высокие значения в периоды задувки доменной печи. На рисунке 2.5 представлена динамика значения параметра «давление горячего дутья» при разных периодах работы доменной печи.

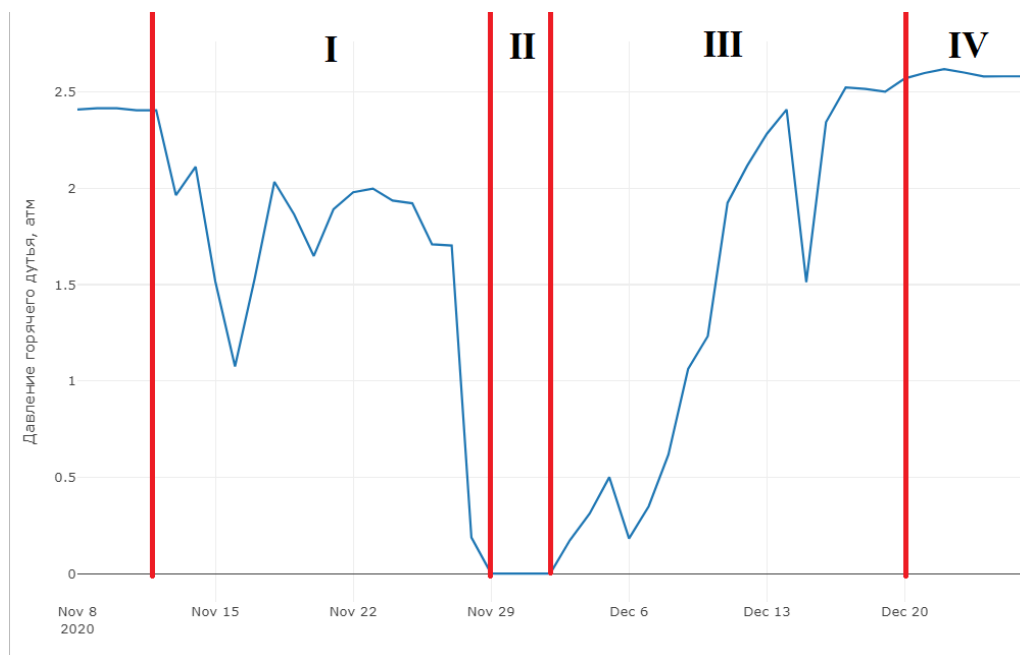


Рисунок 2.5 – Периоды работы доменной печи:

I) подготовки печи к ремонту или останову; II) останов; III) выхода на рабочий режим печи; IV) стационарный режим.

Агрегация данных, в предложенном алгоритме, используется для снижения амплитуды колебаний параметров, а также учета влияния накопленного теплового состояния доменной печи.

На шаге алгоритма, включающего поиск выбросов, происходит проверка значений точки данных на соответствие технологическим ограничениям. Ограничения выставляются достаточно широкими, чтобы исключить значения, которые невозможны в принципе.

Рассмотрим пример определения выбросов в значениях параметров качества кокса. Выбросы могут возникать по разным причинам, например, ошибка ввода данных, сбои в работе измерительных устройств и др.

Для обнаружения выбросов по качеству кокса были выставлены следующие ограничения (таблица 2.3). На рисунках 2.6, 2.7 представлены значения параметров качество кокса определенный как выбросы.

Таблица 2.3 – Технологические ограничения по параметрам качества кокса

Параметр	Нижняя граница	Верхняя граница
Истираемость (M10), %	0	15
Дробимость (M25), %	80	100

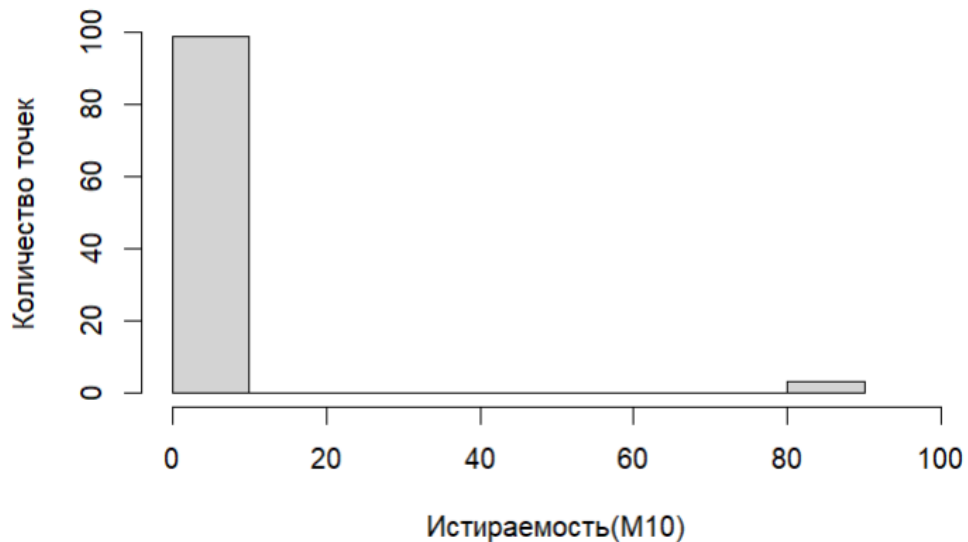


Рисунок 2.6 – Выброс в данных по истираемости кокса (M10)

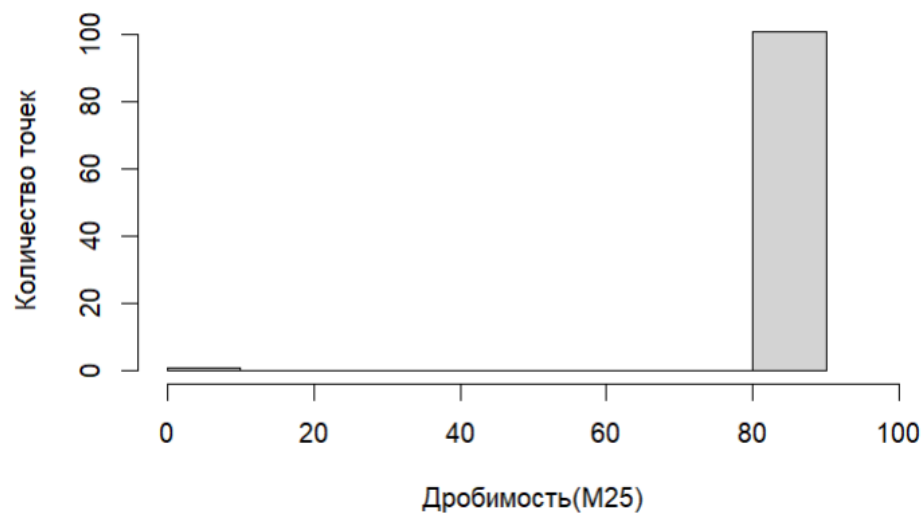


Рисунок 2.7 – Выброса в данных по дробимости кокса (M25)

Значения по истираемости кокса (M10) равное 85,7% больше верхней границы, поэтому данная точка определяется как выброс. По дробимости кокса (M25) нарушилась нижняя граница (9,4% меньше 80 %), данное значение также было отнесено к выбросам.

В предложенном алгоритме строки, содержащие выбросы, либо удаляются, либо заменяются расчетными значениями. Сначала происходит попытка замены выброса средним значением от двух дней до и после дня, содержащего выброс. Удаление же происходит в том случае, если у соседних по дате объектов значения также превышают заданные границы или вовсе отсутствуют.

Работа с большими данными такими как статистика работы доменной печи предполагает использование инструментов для удобной визуализации пропусков, которые в большинстве случаев присутствуют в данных, характеризующих работу оборудования. При разработке алгоритма определения областей значений параметров доменного процесса анализ природы пропусков данных был проведен с помощью пакета VIM для языка программирования R. На рисунке 2.8 представлены результаты оценки природы пропусков на данных для доменной печи №10 за период с 2018 по 2022 г.

Слева на рисунке 2.8 располагается гистограмма, показывающая частоту появления пропусков по каждому параметру в выборке. Из гистограммы видно, что больше всего пропусков встречалось по таким параметрам как горячая прочность (CSR) и реакционная способность (CRI). Большое количество пропусков по данным параметрам объясняется тем, в рассматриваемый период для производственных потребностей анализ кокса по этим показателям проводился реже, чем по другим показателям качества кокса.

Справа на рисунке 2.8 представлены уникальные комбинации сочетаний пропусков параметров. Рядом с каждой комбинацией указана доля той или иной комбинации в выборке данных. Среди этих комбинаций присутствует комбинация с полным отсутствием пропусков (около 7 % от выборки).

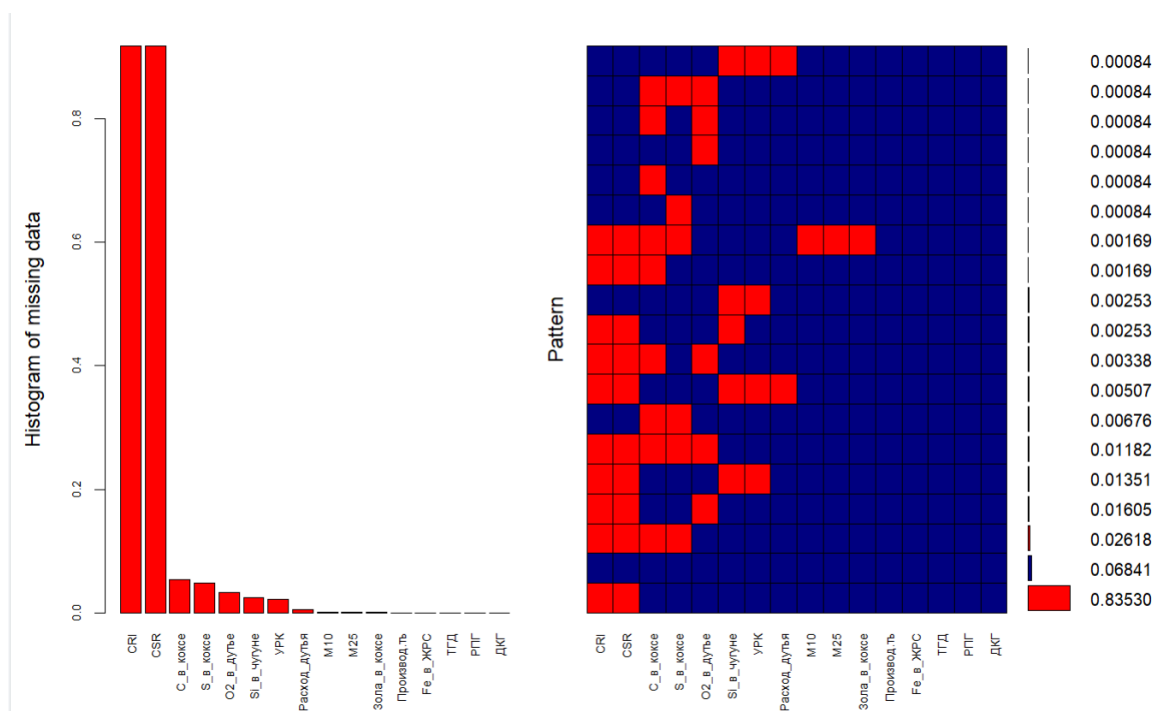


Рисунок 2.8 – Природа выбросов в выборке для поиска режимных кластеров значений параметров доменного процесса

Для заполнения пропусков в предложенном алгоритме используется метод случайного леса. Выбор данного метода обусловлен тем, что параметры доменного процесса связаны между собой нелинейными зависимостями, а используемый метод способен работать с данными, содержащими нелинейности и обладает высокой точностью и устойчивостью к шумам [88].

Далее приведем описание алгоритма заполнения пропусков на основе случайного леса (библиотека `tmisc` для языка программирования R), который используется в алгоритме для заполнения пропусков.

Пусть: $X=(X_1, X_2, \dots, X_p)$ – матрица данных доменной печи, где каждая строка соответствует временному шагу, а столбец – параметру (например, X_1 – температура, X_2 – давление).

Для некоторых X_j есть пропуски (X_j^{mis}).

X_j^{obs} – наблюдаемые (непропущенные) значения.

На первом шаге алгоритма пропуски каждого признака заменяются медианным значением, т.к. медиана устойчива к выбросам, которые часто встречаются в промышленных данных.

На следующем шаге происходит итеративная процедура предсказания пропущенного значения, состоящая из следующих шагов.

Шаг 1. На этом шаге происходит разделение данных на обучающую выборку, включающую наблюдаемые значения $(X_{-j}^{(t-1)}, X_j^{obs})$ и тестовую выборку – пропущенные значения $X_{-j}^{(t-1)}$.

Шаг 2. Этот шаг включает обучение алгоритма случайного леса, состоящего из регрессионных деревьев.

Шаг 3. На этом шаге происходит предсказание пропущенного значения по следующей формуле

$$\hat{x}_{i,j}^{(t)} = \frac{1}{B} \sum_{b=1}^B T_b(X_{-j}^{(t-1)}) + \epsilon_i, \epsilon_i \sim (0, \sigma^2), \quad (2.1)$$

где T_b – предсказание b -го дерева,

$\sigma^2 = Var(X_j^{obs} - \hat{X}_j^{obs})$ – дисперсия остатков модели,

ϵ_i – случайный шум, имитирующий неопределённость.

Критерием остановки служит среднеквадратичное изменение между итерациями:

$$\frac{1}{n \cdot p} \sum_{i,j} \left(X_{i,j}^{(t)} - X_{i,j}^{(t-1)} \right)^2 < \epsilon. \quad (2.2)$$

Алгоритм останавливается, когда изменение становится меньше заданного значения.

Как было сказано ранее для определения режимных кластеров значений параметров доменного процесса в предлагаемом алгоритме применяются методы кластерного анализ. Одним из рассматриваемых в работе методов кластерного анализа является метод k -средних. Предварительно размерность данных в предложенном алгоритме снижается с помощью метода главных компонент (PCA) [8].

Principal Component Analysis (PCA), или анализ главных компонент, – это метод снижения размерности данных, который используется для преобразования множества коррелированных переменных в меньшее число некоррелированных переменных, называемых главными компонентами. Это позволяет упростить анализ данных, сохраняя как можно больше информации.

Приведем краткое описание метода главных компонент.

Дана матрица данных $X \in \mathbb{R}^{n \times p}$, где n – число наблюдений, p – число признаков.

PCA включает следующие основные шаги:

1. На первом шаге стандартизируются данные так, чтобы каждая переменная имела среднее значение 0 и стандартное отклонение 1.
2. На следующем шаге вычисляется ковариационная матрица, показывающая, как каждая переменная связана с другими переменными в наборе данных

$$\Sigma = \frac{1}{n} X^T X, \Sigma \in \mathbb{R}^{p \times p}. \quad (2.3)$$

3. Далее происходит вычисление собственных векторов и собственных значений. Собственные векторы ковариационной матрицы определяют направление главных компонент. Собственные значения указывают на величину дисперсии вдоль каждой из этих компонент.

Находим собственные значения $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_p$ и соответствующие собственные векторы v_1, v_2, \dots, v_p матрицы Σ :

$$\sum v_j = \lambda_j v_j. \quad (2.4)$$

4. На следующем шаге сортируются собственные векторы в порядке убывания собственных значений, чтобы определить важность каждой главной компоненты.

5. После этого выбираются главные компоненты. Количество компонент главным компонент выбирается такое, которое описывает необходимую долю объясненной дисперсии в данных (обычно 70-90%).

Первые k главных компонент (где $k \ll p$) — это собственные векторы, соответствующие наибольшим собственным значениям. Проекция данных на главные компоненты:

$$Z = XV_k, \quad Z \in R^{n \times k}, \quad (2.5)$$

где $V_k = [v_1, v_2, \dots, v_k]$ — матрица из первых k собственных векторов.

6. На завершающем шаге происходит преобразование данных. Оригинальные данные преобразуются в новое пространство, где каждая ось представляет главную компоненту.

Также приведем описание метода k -средних [6].

Дано множество объектов $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$. Необходимо разделить объекты по k группам.

Алгоритм k -средних включает следующие основные шаги:

1. На первом шаге определяется число кластеров (k), с помощью специальных методов: силуэт-метода и др.

2. Следующий шаг включает инициализацию центроидов: Случайным образом выбираются k начальных центроидов. Центроид — это центр кластера, который представляет собой среднее значение всех точек в этом кластере.

Начальные центроиды $\mu_1(0), \mu_2(0), \dots, \mu_k(0)$ выбираются как случайные объекты из X .

3. Далее каждый объект данных назначается ближайшему центроиду с помощью мер расстояния. В предложенном алгоритме использована Евклидова мера расстояния.

Для каждого x_i определяется ближайший центр:

$$C_j^{(t)} = \{x_i: ||x_i - \mu_j^{(t)}|| \leq ||x_i - \mu_l^{(t)}|| \forall l \neq j\}, \quad (2.5)$$

где $|| \cdot ||$ — Евклидова мера.

4. Затем происходит обновление центроидов. После назначения всех объектов кластерам вычисляются новые центроиды для каждого кластера. Новый центроид — это среднее значение всех объектов в данном кластере.

$$\mu_j^{(t+1)} = \frac{1}{|C_j^{(t)}|} \sum_{x_i \in C_j^{(t)}} x_i. \quad (2.6)$$

Шаги, включающие назначение объектов кластерам и обновление центроидов повторяются до тех пор, пока центроиды не перестанут существенно изменяться, либо не будет достигнуто заданное количество итераций.

В результате выполнения алгоритма k -средних объекты данных сгруппируются в k кластеров с минимальной внутрикластерной дисперсией.

Для оценки итогового количества и качества полученных кластеров в предлагаемом алгоритме поиска режимных кластеров значений параметров доменного процесса рекомендуется использовать коэффициент силуэта и индекс Калински-Харабаша.

Определение количества кластеров с помощью коэффициента силуэта происходит следующим образом [48].

Сначала задается вектор значений возможного количества кластеров $k \in [2, K_{\max}]$ (например, $K_{\max}=10$). Затем для каждого значения количества кластеров k происходит расчет среднего значения коэффициента силуэта, включая следующие шаги:

Шаг 1. Кластеризация данных методов кластерного анализа.

Шаг 2. На следующем шаге для каждого объекта из выборки вычисляется коэффициент силуэта.

Формула расчета коэффициента силуэта для i -ого объекта выглядит следующим образом

$$s_i = \frac{b_i - a_i}{\max(a_i, b_i)}, \quad (2.7)$$

где a_i – среднее расстояние от объекта i до всех других объектов в этом же кластере (степень компактности);

b_i – среднее расстояния от объекта i до объектов в ближайшем соседнем кластере (степень разделимости).

Значение коэффициента силуэта варьируется в диапазоне $[-1, 1]$, где значение близкое к -1 говорит о том, что объект отнесен к неверному кластеру, 0 – объект находится на границе кластеров, 1 – объект хорошо соответствует своему кластеру и плохо – соседним.

Шаг 3. На этом шаге происходит вычисление среднего значения коэффициента силуэта для всех объектов выборки

$$\bar{s} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n s_i, \quad (2.8)$$

где n – количество объектов в выборке.

Оптимальное значение количества кластеров соответствует значению k с максимальным средним значением коэффициента силуэта.

Далее приведем описание процедуры выбора количества кластеров с помощью индекса Калински-Харабаша, также известного как критерий отношения дисперсий [76].

Первым шагом является расчет межкластерной дисперсии или межгрупповой суммы квадратов (BGSS – between group sum of squares). Межкластерная дисперсия представляет собой взвешенную сумму квадратов расстояний между центроидами кластеров и центроидом всего набора данных (центром тяжести).

$$BGSS = \sum_{k=1}^K n_k \cdot \|C_k - C\|^2, \quad (2.9)$$

где n_k – количество объектов в кластере k ,

C_k – центроид кластера k ,

C – центроид выборки (центр тяжести),

K – количество кластеров.

Вторым шагом является расчет внутрикластерной дисперсии или внутригрупповой суммы квадратов (WGSS – within group sum of squares). Внутрикластерная дисперсия равна сумме квадратов расстояний между каждым наблюдением и центроидом того же кластера.

Для каждого кластера WGSS рассчитывается как:

$$WGSS_k = \sum_{i=1}^{n_k} \|X_{ik} - C_k\|^2, \quad (2.10)$$

где X_{ik} – i -й объект в k -м кластере.

Общая внутрикластерная дисперсия равна сумме внутрикластерных дисперсий все кластеров.

$$WGSS = \sum_{k=1}^K WGSS_k. \quad (2.11)$$

На третьем шаге рассчитывается значение индекса Калински-Харабаша по следующей формуле

$$I_{CH} = \frac{\frac{BGSS}{k-1}}{\frac{WGSS}{N-K}} = \frac{BGSS}{WGSS} \cdot \frac{N-K}{K-1}, \quad (2.12)$$

где N – общее количество объектов в выборке.

В качестве итогового количества кластеров принимается то значения, для которого было получено наибольшее значение индекса Калински-Харабаша. Это означает, что объекты внутри кластера находятся близко друг к другу, а сами кластеры находятся достаточно далеко друг от друга.

Далее приведены результаты определения количества кластеров с помощью коэффициента силуэта и индекса Калински-Харабаша

На реальных производственных данных были проведены эксперименты с разным количеством кластеров (4, 5, 6, 7, 8).

В таблице 2.4 представлено сравнение среднего коэффициента силуэта.

Таблица 2.4 – Значение среднего коэффициента силуэта для каждого k

Количество кластеров (k)	Средний коэффициент силуэта
4	0,4029
5	0,5086
6	0,4660
7	0,3398
8	0,1323

Для $k=5$ значение коэффициента силуэта является максимальным, следовательно, итоговое количество кластеров было выбрано равным пяти.

Для количества кластеров равного 4,5,6,7,8 были получены следующие результаты (таблица 2.5) для индекса Калински-Харабаша.

Таблица 2.5 – Значения индекса Калински-Харабаша для разного количества кластеров

Количество кластеров	Индекс Калински-Харабаша
4	302,0765
5	312,1366
6	268,1212
7	250,0207
8	234,8735

Наибольшее значение индекса Калински-Харабаша соответствовало 5 кластерам. Следовательно, это разбиение имело наиболее плотные кластеры среди полученных разбиений и сами кластеры хорошо были разделены.

Далее на рисунках 2.9-2.11 представлены функции распределений значений параметров в кластерах полученных с помощью карт Кохонена (SOM – Self-organizing map) [77] и комбинации PCA-k-means на одной и той же выборке данных.

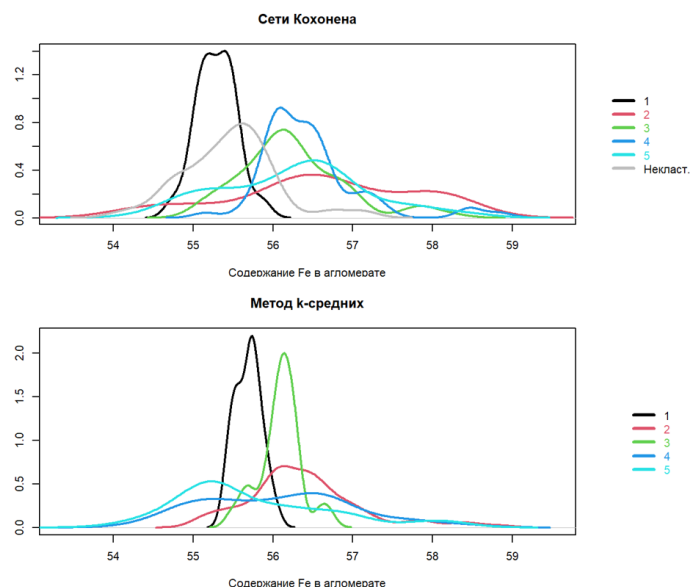


Рисунок 2.9 – Графики функций распределений значений содержания Fe в агломерате в кластерах

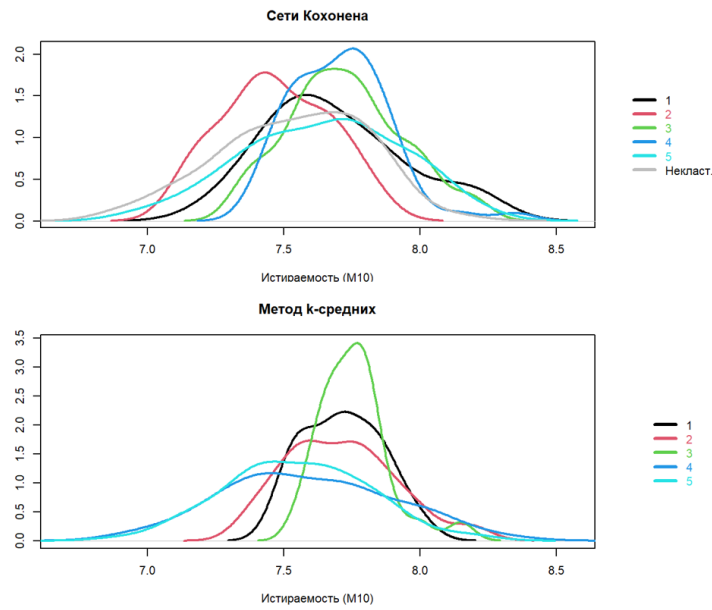


Рисунок 2.10 – Графики функций распределений значений истираемости кокса (M10) в кластерах

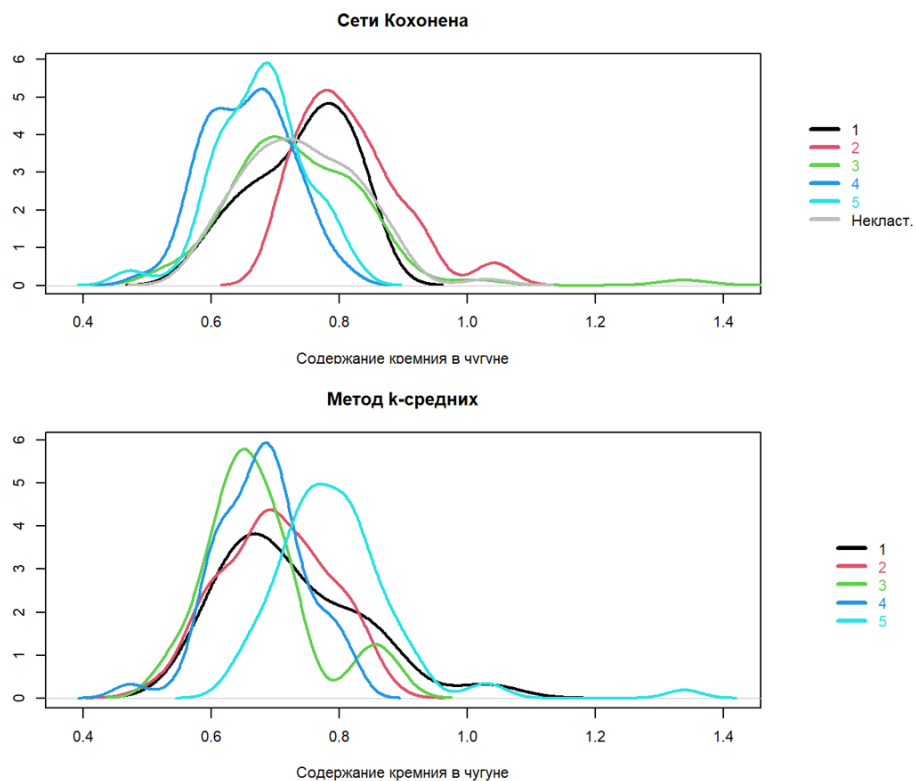


Рисунок 2.11 – Графики функций распределений значений содержания кремния в чугунах в кластерах

В таблице 2.6 представлено сравнение метрик качества кластеризации для самоорганизующихся карт Кохонена и комбинации алгоритмов PCA-kmeans для количества кластеров равного 5.

Таблица 2.6 – Сравнение методов кластеризации

Алгоритм	Коэффициент силуэта	Индекс Калински-Харабаша
SOM	0,5214	304,9846
PCA+k-means	0,5303	312,1366

По результатам проведенного сравнения в предложенном алгоритме рекомендуется применять комбинацию методов главных компонент и k-средних, так как значения метрик у комбинации алгоритмов немного лучше, чем у самоорганизующихся карт Кохонена.

В полученных режимных кластерах значений технологических параметров влияние параметров доменного процесса на показатели его эффективности (производительность и УРК) различно. На следующем шаге алгоритма основе статистики, попавшей в каждый режимный кластер значений технологических параметров доменного процесс, определяются коэффициенты влияния параметров на показатели доменной плавки (производительность и удельный расход кокса (УРК)).

В предложенном алгоритме расчет значений факторных коэффициентов предусмотрен для следующих параметров:

- содержание железа в шихте;
- доля агломерата в шихте;
- содержание мелочи (фракции 0-5 мм) в рудной сыпи;
- содержание фракции кокса+80;
- содержание золы в коксе;
- прочность кокса по M25;
- истираемость кокса по M10;
- горячая прочность CSR;
- содержание кремния в чугуне;
- температура горячего дутья;
- удельный расход природного газа;
- массовая концентрация влаги в дутье;

- соотношение расхода природного газа к расходу технологического кислорода;
- содержание кислорода в дутье.

По каждому из перечисленных параметров определяются регрессионные зависимости влияния параметра на УРК и производительность чугуна.

Для параметра: соотношение расхода природного газа к расходу технологического кислорода, зависимости описываются полиномиальными регрессионными моделями вида:

$$\text{УРК} = \text{УРК}_0 + K_{\text{УРК},1} \cdot P + K_{\text{УРК},2} \cdot P^2, \quad (2.13)$$

$$\text{ПЧ} = \text{ПЧ}_0 + K_{\text{ПЧ},1} \cdot P + K_{\text{ПЧ},2} \cdot P^2, \quad (2.14)$$

где P – параметр;

УРК_0 – постоянная составляющая по УРК;

ПЧ_0 – постоянная составляющая по производительности;

$K_{\text{УРК},1}, K_{\text{УРК},2}$ – коэффициенты влияния параметра на УРК;

$K_{\text{ПЧ},1}, K_{\text{ПЧ},2}$ – коэффициенты влияния параметра на производительность.

Для остальных параметров зависимости описываются линейными регрессионными моделями вида:

$$\text{УРК} = \text{УРК}_0 + K_{\text{УРК}} \cdot P, \quad (2.15)$$

$$\text{ПЧ} = \text{ПЧ}_0 + K_{\text{ПЧ}} \cdot P, \quad (2.16)$$

На основе полученных коэффициентов влияния параметров на УРК и производительность чугуна рассчитываются факторные коэффициенты.

Для линейных регрессионных моделей формулы определения факторных коэффициентов имеют следующий вид:

$$K'_{\text{УРК}} = \frac{K_{\text{УРК}}}{\text{УРК}_{\text{ср}}} \cdot 100\%, \quad (2.17)$$

$$K'_{\text{ПЧ}} = \frac{K_{\text{ПЧ}}}{\text{ПЧ}_{\text{ср}}} \cdot 100\%, \quad (2.18)$$

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

$\text{ПЧ}_{\text{ср}}$ – среднее значение производительности в кластере, т.

Для полиномиальных регрессионных моделей факторные коэффициенты определяются с помощью кусочно-линейной аппроксимации полинома вида:

$$\text{УРК} = \begin{cases} \text{УРК}_{0,1} + K_{\text{УРК},1} \cdot P, & P < P_1, \\ \text{УРК}_{0,2} + K_{\text{УРК},2} \cdot P, & P_1 \leq P \leq P_2, \\ \dots \\ \text{УРК}_{0,n} + K_{\text{УРК},n} \cdot P, & P_{n-1} \leq P \leq P_n, \end{cases} \quad (2.19)$$

$$\text{ПЧ} = \begin{cases} \text{ПЧ}_{0,1} + K_{\text{ПЧ},1} \cdot P, & P < P_1, \\ \text{ПЧ}_{0,2} + K_{\text{ПЧ},2} \cdot P, & P_1 \leq P \leq P_2, \\ \dots \\ \text{ПЧ}_{0,n} + K_{\text{ПЧ},n} \cdot P, & P_{n-1} \leq P \leq P_n, \end{cases} \quad (2.20)$$

где $K_{\text{УРК},1}, K_{\text{УРК},2}, \dots, K_{\text{УРК},n}$ – коэффициенты влияния параметра на удельный расход кокса на каждом интервале от 1 до n ;

$K_{\text{ПЧ},1}, K_{\text{ПЧ},2}, \dots, K_{\text{ПЧ},n}$ – коэффициенты влияния параметра на производительность на каждом интервале от 1 до n ;

P – параметр;

P_1, P_2, \dots, P_n – границы интервалов.

На каждом линейном участке аппроксимации (интервале) коэффициенты $K_{\text{УРК},i}$ и $K_{\text{ПЧ},i}$ переводятся в факторные коэффициенты $K_{\text{УРК},i}$ и $K_{\text{ПЧ},i}$ аналогично формулам (2.15), (2.16) для линейных регрессионных моделей.

На реальных производственных данных с помощью предложенного алгоритма были получены режимные области параметров технологических параметров. В каждой области были построены зависимости производительности доменной печи и удельного расхода кокса (УРК) от технологических параметров работы доменных печей. На рисунках 2.12-2.15 представлены примеры зависимостей для параметров истираемость кокса (М10) и содержание железа в шихте.

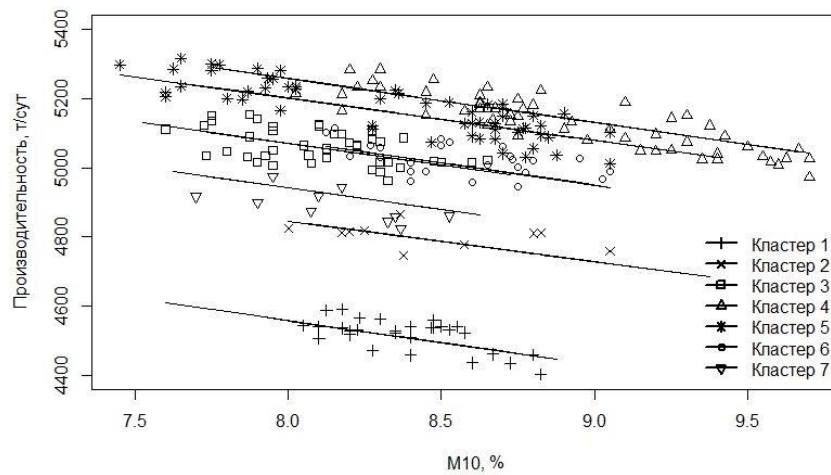


Рисунок 2.12 – Пример графического представления зависимостей производительности доменной печи от истираемости кокса (M10)

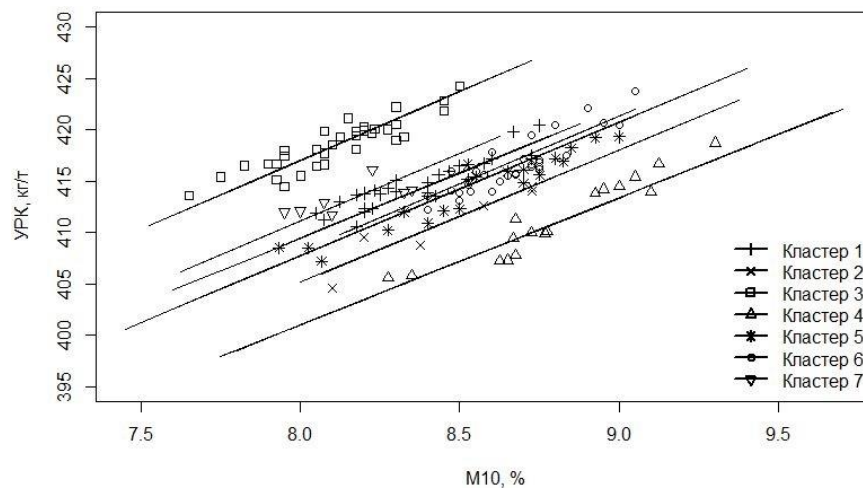


Рисунок 2.13 – Пример графического представления зависимостей УРК от истираемости кокса (M10)

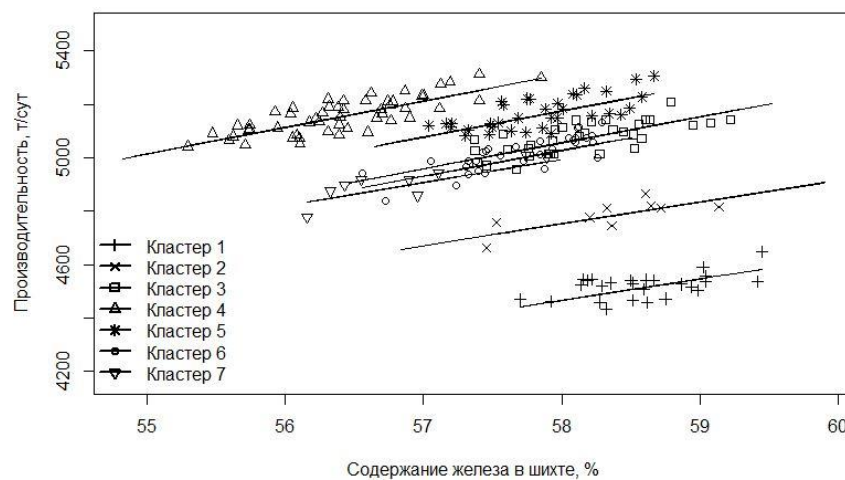


Рисунок 2.14 – Пример графического представления зависимостей производительности доменной печи от содержания железа в шихте

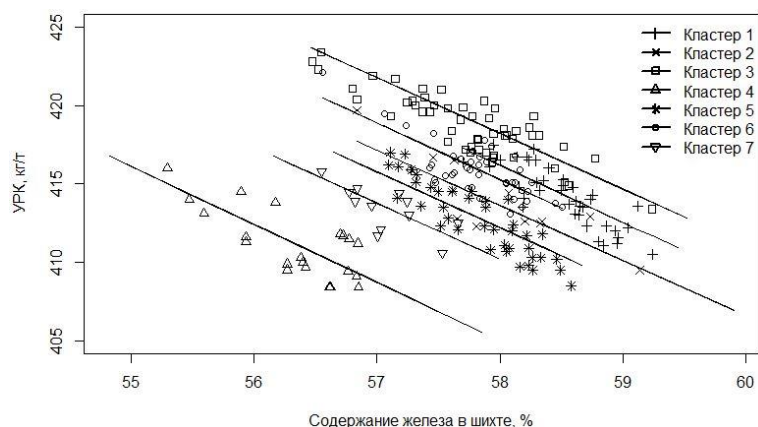


Рисунок 2.15 – Пример графического представления зависимостей УРК от содержания железа в шихте

На основе полученных зависимостей были получены коэффициенты влияния технологических параметров на производительность и УРК. В таблице 2.7 приведены полученные значения коэффициентов зависимости и факторных коэффициентов влияния для параметров истираемость кокса (M10) и содержание железа в шихте.

Таблица 2.7 – Значения коэффициентов влияния истираемости кокса (M10) и содержания железа в шихте на производительность и УРК в полученных режимных кластерах

Режимный кластер	Изменение производительности (в %) при увеличении M10 на 1%	Изменение удельного расхода кокса (в %) при увеличении M10 на 1%	Изменение производительности (в %) при увеличении содержания железа в шихте на 1%	Изменение удельного расхода кокса (в %) при увеличении содержания железа в шихте на 1%
1	-2,8	3,06	1,77	-0,88
2	-2,46	3,12	1,70	-0,85
3	-2,45	3,20	1,92	-0,85
4	-2,46	3,01	1,91	-0,90
5	-2,38	3,14	1,90	-0,86
6	-2,57	3,18	1,94	-0,87
7	-2,56	3,18	1,77	-0,86
Среднее	-2,53	3,13	1,84	-0,87

2.3 Алгоритм на основе комитетного подхода к выбору режимного кластера для принятия решений

Полученные режимные кластеры значений параметров могут использоваться для принятия различного рода решений. Для этого рекомендуется применять предлагаемый алгоритм на основе комитетного подхода [10, 21] для выбора режимного кластера значений параметров технологического процесса, удовлетворяющей наибольшему количеству технологических условий.

Постановка задачи

При принятии решений необходимо удовлетворять технологическим условиям, которые часто задаются в виде ограничений. Данные ограничения используются для построения комитета неравенств, с помощью которого происходит поиск плановой режимного кластера значений параметров доменного процесса.

Режимный кластер параметров, претендующий на статус планового, 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 технологических параметров.

Комитет неравенств, построенный на основе технологических условий, имеет вид

$$\begin{aligned} x_o^{min} &\leq x_{0j} \leq x_o^{max} \\ x_1^{min} &\leq x_{1j} \leq x_1^{max}, \\ &\dots \\ x_n^{min} &\leq x_{nk} \leq x_n^{max} \end{aligned} \quad (2.21)$$

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

В качестве рекомендованного планового режимного кластера принимается тот режимный кластер, вектор значений параметров которого удовлетворяет наибольшему количеству неравенств из комитета неравенств.

$$\max_{(x)} C(x), \quad C(x) = \sum_{j=1}^n \theta_j \mu_j(x). \quad (2.22)$$

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 ближайшего кластера.

Коэффициенты θ_j определяются исходя из экспертных оценок технологов. Эксперты (технологи) выставляют важность технологического параметра в градации от 0 до 100%

В результате будет получено множество оценок

$$[u_{i,k} : i = 1, 2, \dots, n_p; k = 1, 2, \dots, n_E], \quad (2.23)$$

где n_p – количество параметров,

n_E – количество экспертов.

Веса параметров рассчитываются по формуле

$$\theta_j = \frac{\sum_{k=1}^{n_E} u_{i,k}}{\sum_{i=1}^{n_p} \sum_{k=1}^{n_E} u_{i,k}}. \quad (2.24)$$

Если несколько режимных кластеров значений параметров соответствуют максимально совместной подсистеме неравенств, то рекомендованный плановый режимный кластер определяется по значениям показателей эффективности доменного процесса. Эффективность работы доменной печи характеризуется следующими показателями: производительность агрегата и удельных расход кокса. Так из режимных кластеров, соответствующих максимально совместной системе неравенств плановым, будет являться тот режимный кластер, который будет соответствовать максимальной производительности и минимальному УРК.

2.4 Применение алгоритма определения режимных кластеров значений параметров доменного процесса и алгоритма выбора режимного кластера для принятия при оперативном управлении

Работа доменных печей изменяется каждую неделю: меняются их характеристики, а также влияние технологических параметров на показатели работы доменных печей. Для повышения точности оперативного управления доменного процесса рекомендуется применять факторные коэффициенты, которые являются результатом работы предложенных в работе алгоритма определения режимных кластеров значений параметров доменного производства на основе кластерного анализа и алгоритма на основе комитетного подхода к выбору режимного кластера для принятия решений.

В рамках работы над диссертационным исследованием для разных недель нескольких месяцев были выбраны режимные кластеры значений параметров доменного процесса с помощью предложенных в работе алгоритмов.

В результате работы алгоритма определения режимных кластеров значений параметров доменного процесса для доменной печи №8 был получен набор из 5 режимных кластеров. В таблице 2.8 представлены средние значения параметров в полученных режимных кластерах.

Таблица 2.8 – Характеристики режимных кластеров значений параметров

Параметр	Кластер 1	Кластер 2	Кластер 3	Кластер 4	Кластер 5
Истираемость кокса (M10), %	7,15	7,36	7,23	7,71	7,27
Содержание Fe в шихте, %	56,17	57,47	57,00	57,15	57,95
Содержание кислорода в горячем дутье, %	25,73	28,88	26,72	27,33	25,30
Уд. расход природного газа, м3/т	117,67	142,56	123,57	126,86	121,78
Содержание Si в чугуна, %	0,74	0,75	0,92	0,74	0,82

На рисунках 2.16-2.24 представлены графики зависимостей в полученных режимных кластерах для истираемости кокса (M10), содержания Fe в шихте, содержания кислорода в горячем дутье, содержания кремния в чугунах и удельного расхода природного газа.

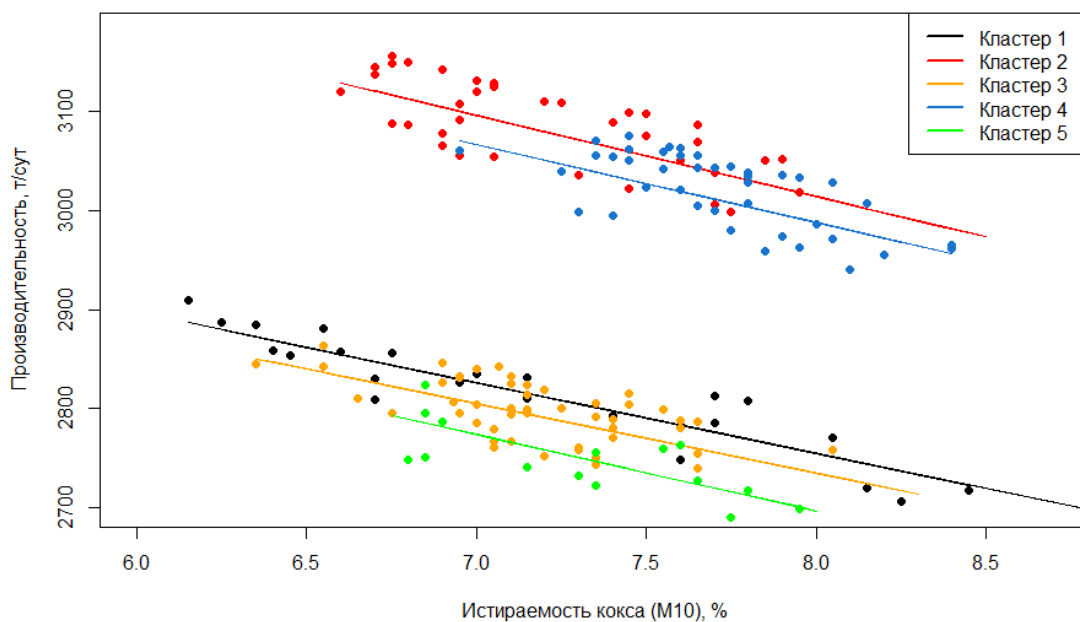


Рисунок 2.16 – Зависимости влияния истираемости кокса на производительность

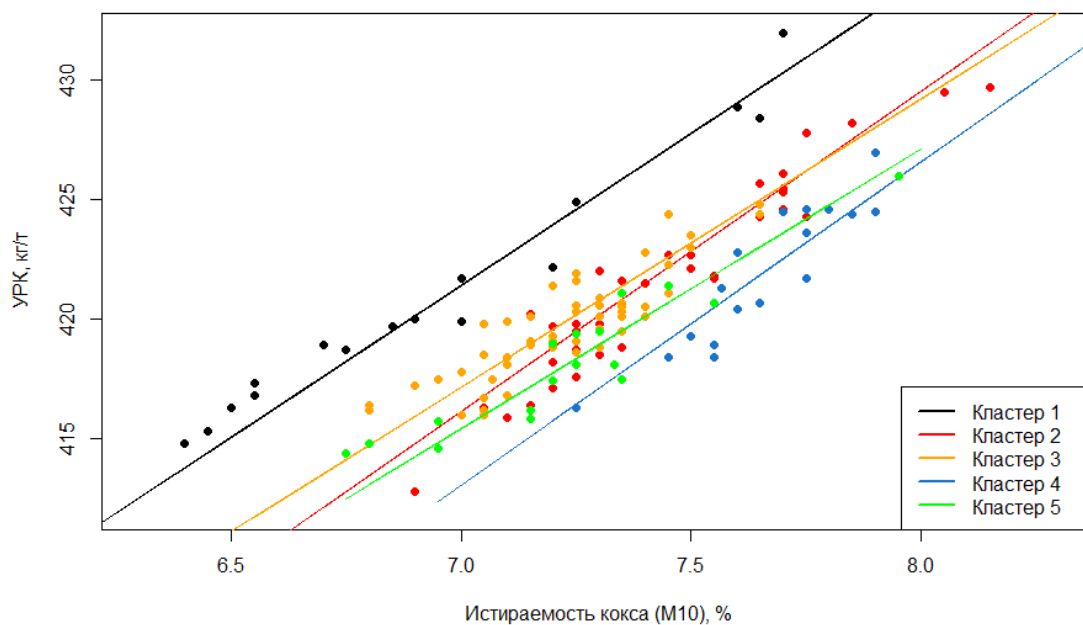


Рисунок 2.17 – Зависимости влияния истираемости кокса на УРК

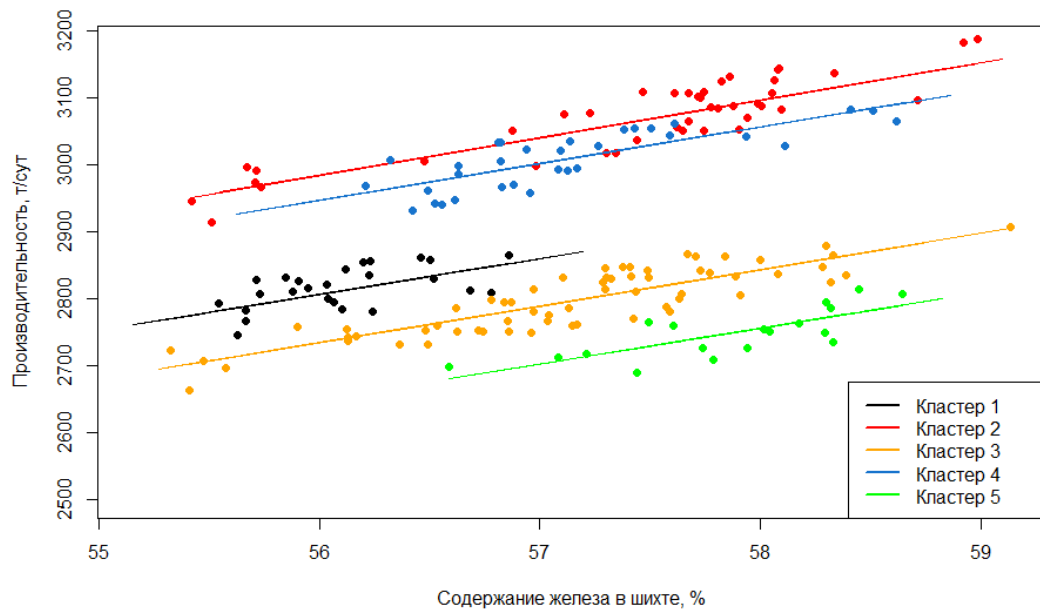


Рисунок 2.18 – Зависимости влияния содержания Fe в шихте на производительность

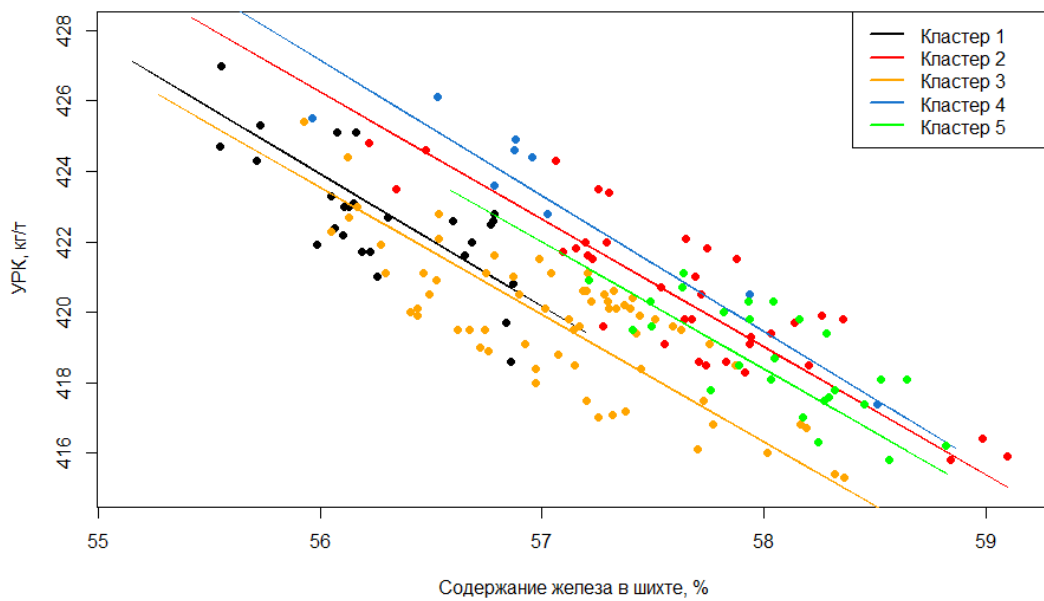


Рисунок 2.19 – Зависимости влияния содержания Fe в шихте на УРК

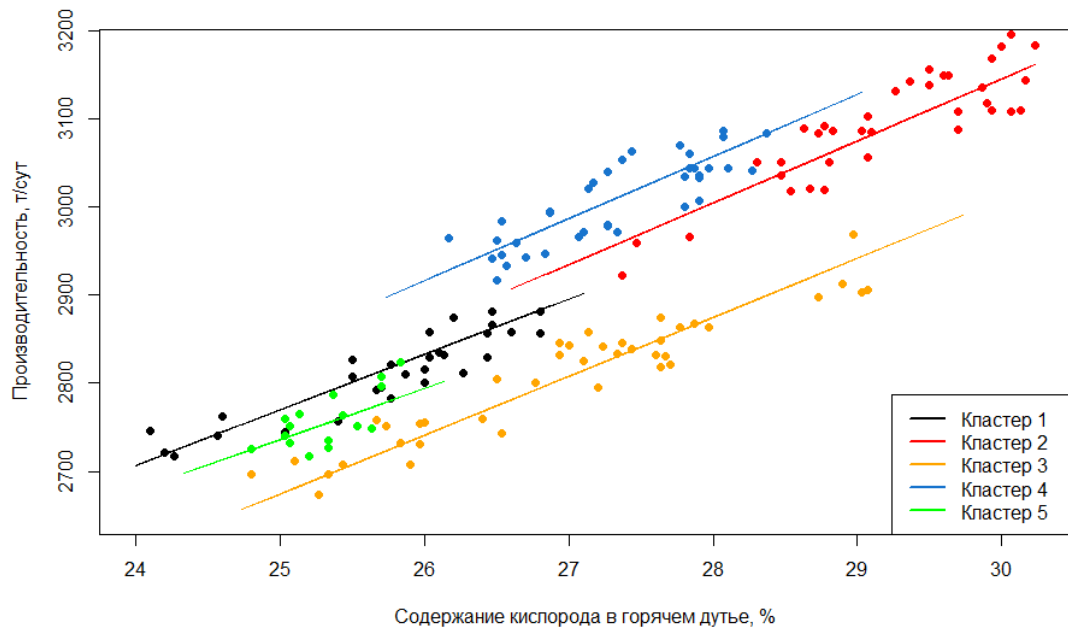


Рисунок 2.20 – Зависимости влияния содержания O_2 в горячем дутье на производительность

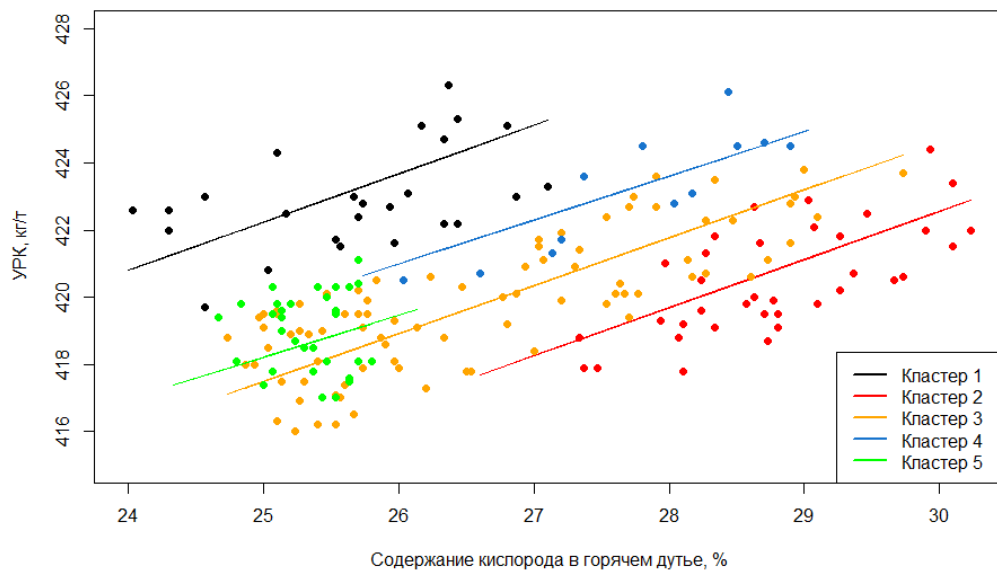


Рисунок 2.21 – Зависимости влияния содержания O_2 в горячем дутье на УРК

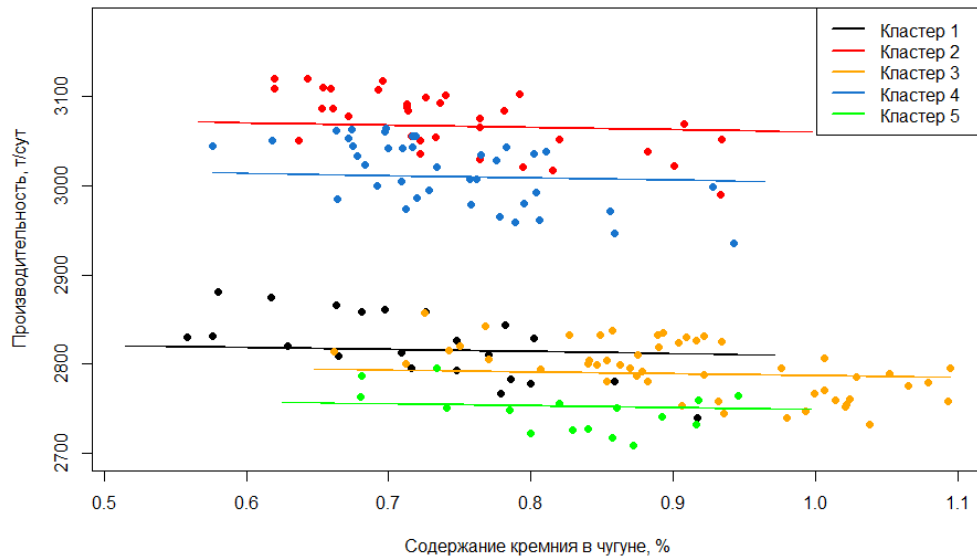


Рисунок 2.22 – Зависимости влияния содержания Si в чугуна на производительность

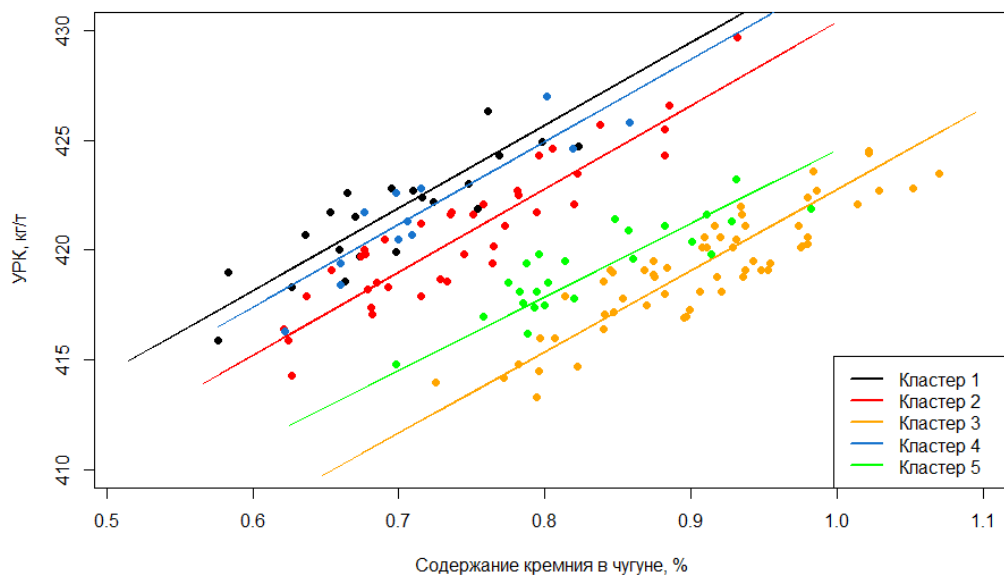


Рисунок 2.23 – Зависимости влияния содержания Si в чугуна на УРК

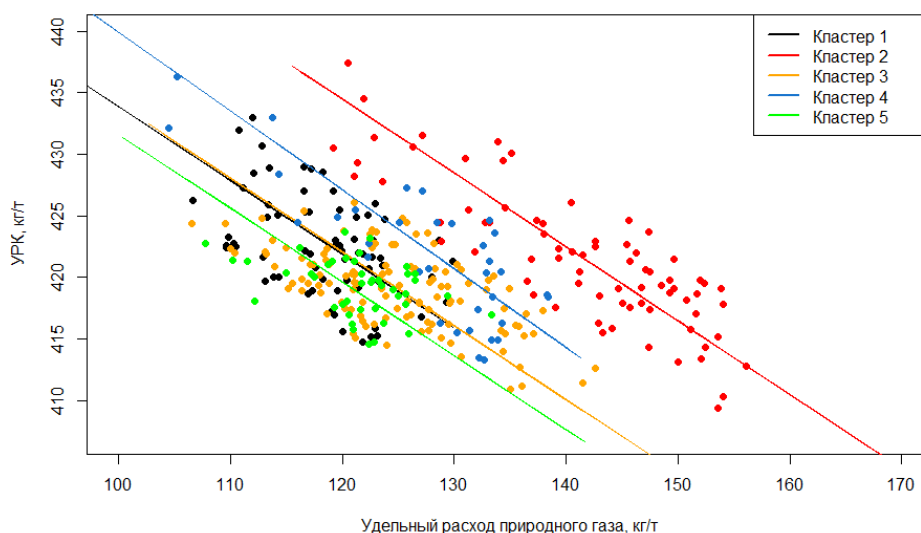


Рисунок 2.24 – Зависимости влияния удельного расхода природного газа на УРК

Выбор рекомендованных режимных кластеров осуществлялся для недельных периодов работы доменной печи №8 в апреле и мае 2024 года. Для данных периодов были заданы следующие технологические ограничения, представленные в таблице 2.9.

С использованием предложенного алгоритма для каждого периода был выбран режимный кластер, включающая факторные коэффициенты влияния технологических параметров на показатели доменной печи. На рисунках 2.25 и 2.26 представлено изменение значений факторных коэффициентов демонстрирующих изменение режимов работы доменных печей.

Таблица 2.9 – Технологические ограничения для рассматриваемых недельных периодов

Параметр	Периоды							
	04.04.2024- 10.04.2024		11.04.2024- 17.04.2024		18.04.2024- 24.04.2024		25.04.2024- 01.05.2024	
	мин	макс	мин	макс	мин	макс	мин	макс
Истираемость кокса (M10), %	7,07	7,48	7,1	8,13	7,7	8,67	7,38	8,2
Содержание Fe в шихте, %	56,95	57,4	56	58,72	57,05	58,1	57,1	57,69
Содержание кислорода в горячем дутье, %	24,4	27	24	25,8	24,3	27,4	22,8	27,4
Уд. расход природного газа, м3/т	123	143,7	117	136,5	104,9	141,6	113,8	145,7
Содержание Si в чугуне, %	0,861	1,01	0,739	0,937	0,656	0,935	0,612	1,042

Продолжение таблицы 2.9

Параметр	Периоды							
	02.05.2024- 08.05.2024		09.05.2024- 15.05.2025		16.05.2024- 22.05.2024		23.05.2024- 29.05.2024	
	мин	макс	мин	макс	мин	макс	мин	макс
Истираемость кокса (M10), %	7,4	7,8	6,79	7,4	7,2	7,73	6,9	7,9
Содержание Fe в шихте, %	57,1	58,03	57,42	57,97	56,9	58,54	57,2	58
Содержание кислорода в горячем дутье, %	24,8	27,4	24,3	26	25,7	26,8	25,1	26,4
Уд. расход природного газа, м3/т	109,4	137,2	120	132,5	122	132,4	113,5	139,9
Содержание Si в чугуне, %	0,8	1,14	0,65	1,06	0,78	0,92	0,63	0,95

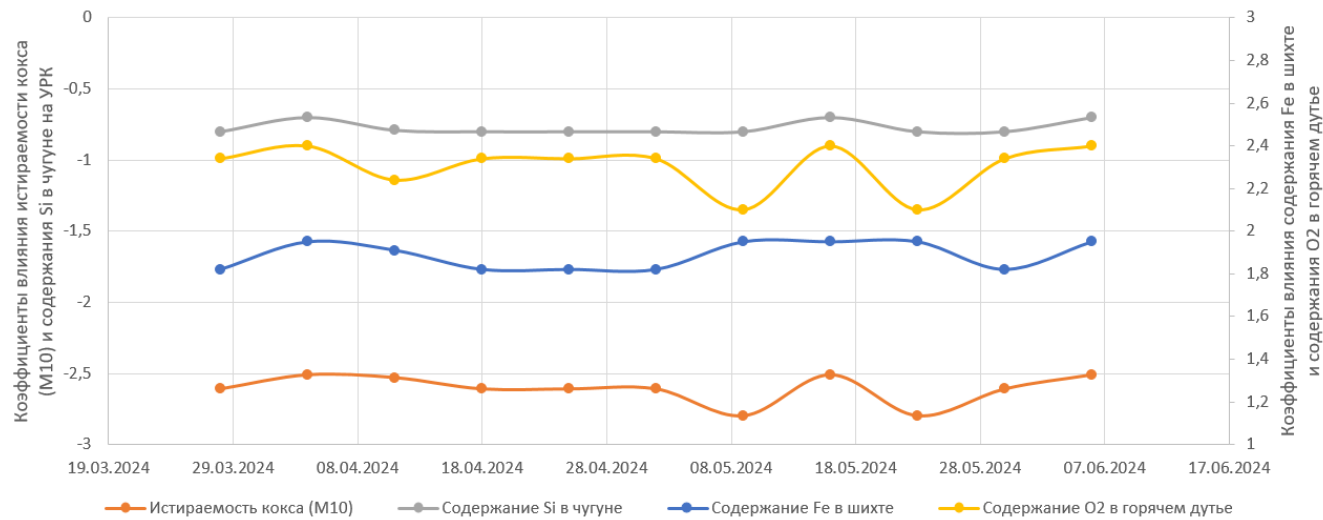


Рисунок 2.25 – Изменение значений коэффициентов влияния параметров на производительность

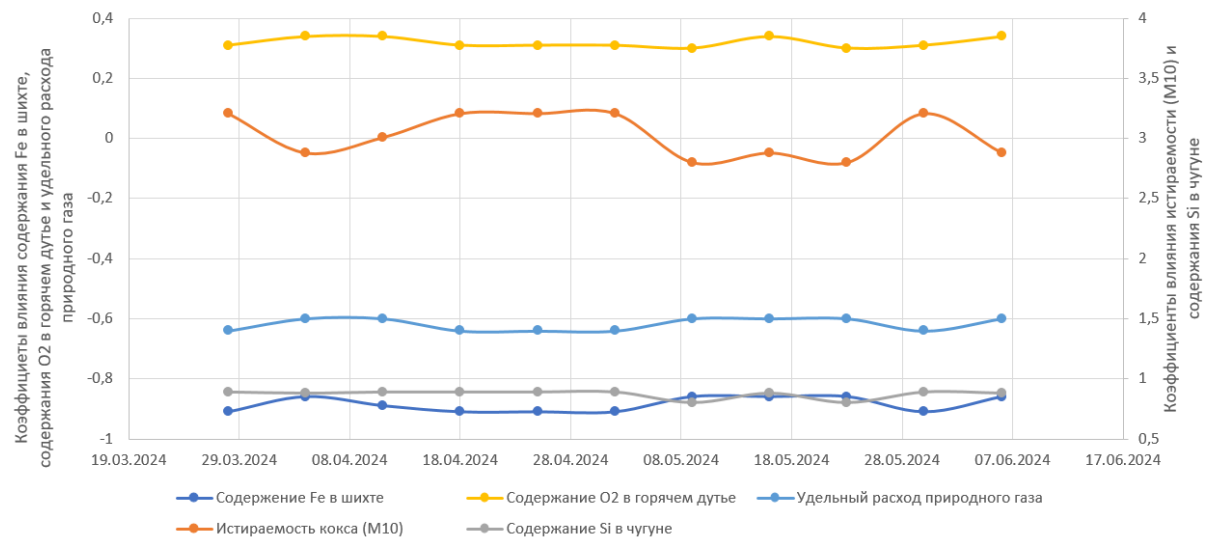


Рисунок 2.26 – Изменение значений коэффициентов влияния параметров на удельный расход кокса

В таблице 2.10 указаны номера режимных кластеров, которые были выбраны для каждого из периодов.

Таблица 2.10 – Соответствие периодов и номеров выбранных режимных кластеров

Период	Номер кластера
04.04.2024-10.04.2024	3
11.04.2024-17.04.2024	1
18.04.2024-24.04.2024	4
25.04.2024-01.05.2024	4
02.05.2024-08.05.2024	4
09.05.2024-15.05.2025	5
16.05.2024-22.05.2024	3
23.05.2024-29.05.2024	5
30.05.2024-05.06.2024	4

При оперативном планировании работы и управлении доменными печами целесообразно применение факторных коэффициентов получаемых с помощью предложенных алгоритма определения режимных кластеров значений параметров доменного производства на основе кластерного анализа и алгоритма на основе комитетного подхода к выбору режимного кластера для принятия решений на основе согласования взвешенных по значимости технических условий, т.к. работа доменных печей меняется из-за колебаний химического состава основных видов сырья, используемых для производства чугуна: кокс, агломерат, окатыши, а предложенные алгоритмы позволяют учесть особенности работы конкретных доменных печей.

ВЫВОДЫ К ГЛАВЕ 2

1. Предложенные в главе 2 алгоритмы на основе кластерного анализа статистических данных работы доменных печей позволяют получить режимные кластеры значений параметров доменного процесса. Данные кластеры, характеризующиеся значениями технологических параметров и коэффициентами влияния на производительность и удельный расход кокса, позволяют учитывать особенности доменных печей.

2. В главе 2 представлено сравнение результатов применения разных методов кластерного анализа в алгоритме определения режимных кластеров: самоорганизующихся карт Кохонена и комбинации методов снижения размерности (метод главных компонент) и кластерного анализа (метод k-средних). По результатам проведенного сравнения в алгоритме определения режимных кластеров значений параметров доменного цеха рекомендуется применять комбинацию методов главных компонент и k-средних.

3. Для стабильного и безопасного ведения доменного процесса на него накладываются технологические условия. В разных производственных ситуациях технологические условия могут изменяться, поэтому в зависимости от текущих технических условий предпочтительными будут разные режимы работы доменных печей. Для выбора плановых режимов работы доменных печей рекомендуется применять предложенный алгоритма на основе комитетного подхода к выбору планового режимного кластера для принятия решений на основе согласования взвешенных по значимости технических условий.

4. Предложенные в главе 2 алгоритмы позволяют учитывать особенности доменных печей, а также технологические ограничения, действующие при принятии решений персоналом по управлению доменными печами. В связи с этим факторные коэффициенты, получаемы в результате работы алгоритмов, предложенных в главе, целесообразно применять при оперативном управлении доменным процессом.

ГЛАВА 3. МЕТОД ПЛАНИРОВАНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ ДОМЕННЫМ ПРОИЗВОДСТВОМ НА ОСНОВЕ СОВМЕСТНОЙ ОЦЕНКИ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ДОМЕННОГО ЦЕХА В ПРОТИВОРЕЧИВЫХ УСЛОВИЯХ

3.1 Метод планирования и управления доменным производством на основе совместной оценки экономической и технологической эффективности работы доменного цеха в противоречивых условиях

Обычно процессы планирования и управления разнесены по времени, в работе предлагается объединить часть задач данных организационных процессов в одну. Из процесса планирования решается задача минимизации себестоимости чугуна, а также выбора объема производства, который требуется включить в план предприятия, из процесса управления - задача оптимального распределения объема производства между доменными печами с точки зрения эффективного выполнения заданного плана и задача оперативного управления доменным процессом.

Таким образом, задача 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. Эта задача носит многокритериальный характер и для ее решения в данной диссертационной работе предлагается использовать специализированный математический аппарат и современных методы анализа данных, таких как кластерный анализ и комитетный подход.

Постановка задачи планирования и управления доменным производством

Доменный процесс характеризуется многочисленными взаимосвязанными параметрами, влияющими на его эффективность, такими

как расход кокса, температура, давление, состав шихты и продолжительность плавки. Эти параметры зависят друг от друга и часто вступают в противоречие: улучшение одного параметра может привести к ухудшению другого. Например, увеличение интенсивности подачи сырья ускоряет плавку, но может вызвать перегрев и повреждение стенок печи. Аналогично, снижение расхода кокса помогает сократить затраты на топливо, но может приводить к ухудшению качества чугуна и нарушению стабильности процесса.

В условиях современного металлургического производства актуальной задачей также является балансировка между максимизацией производственной мощности и минимизацией удельного расхода энергоресурсов, в частности кокса. Традиционные подходы, основанные исключительно на удельном расходе кокса (УРК) или на коэффициенте использования полезного объёма доменной печи, не отражают комплексного характера эффективности доменных печей.

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.

$$E_i = \alpha \cdot \frac{\text{ПЧ}_i}{\text{ПЧ}_{\max_i}} + (1 - \alpha) \cdot \left(\frac{\text{УРК}_i}{\text{УРК}_{\min_i}} \right)^{-1}, \quad (3.1)$$

где $i = 1, 2, \dots, k_{\text{ДП}}$ – номер доменной печи;

E_i – оценка эффективности 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 целевой функции, отражающий важность учета производства чугуна и расхода кокса в составе рассматриваемой оценки эффективности.

Первое слагаемое в (3.1) представляет собой коэффициент загрузки доменной печи, характеризующий степень использования его конструктивного и технологического потенциала. Второе слагаемое — нормированный обратный показатель потребления топлива, отражающий близость текущего режима к наилучшему достигнутому уровню энергоэффективности. Обе компоненты безразмерны и нормированы относительно реперных значений, что обеспечивает сопоставимость между доменными печами различной мощности и технологического состояния.

С технической точки зрения, рассматриваемая оценка эффективности доменной печи достигает максимума в тех режимах, где одновременно обеспечивается высокая степень использования производственных мощностей и низкий удельный расход кокса.

Выбор коэффициента α производит экспертом. С помощью данного коэффициента экспертом выбирает, что в приоритете для данной доменной печи: производительность или УРК. Если ожидаемое состояние доменной печи не позволит достигнуть максимальной производительности, то коэффициент α принимает значения меньше 0,5, в этом случае алгоритм будет стремиться подобрать такие искомые значения параметров, которые позволят сократить УРК. В противном случае выбор значений оптимизируемых параметров будет направлен на повышение производительности доменной печи.

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

$$E_{\text{ДЦ}} = \sum_{i=1}^{k_{\text{ДП}}} w_{\text{ДП}} \cdot E_i, \quad (3.2)$$

где E_i – оценка эффективности i -ой доменной печи,

$$w_{\text{ДП}} = \frac{\text{ПЧ}_i}{\sum_{i=1}^{k_{\text{ДП}}} \text{ПЧ}_i} - \text{весовой коэффициент отражающий вклад доменной печи}$$

в оценку эффективности доменного цеха,

$k_{\text{ДП}}$ – количество действующих печей.

Помимо технологической эффективности, определяемой по производительности и удельному расходу кокса, работа доменного цеха характеризуется переменной составляющей себестоимостью чугуна.

Переменная составляющая себестоимости чугуна рассчитывается по следующей формуле

$$C_{\text{ч}}(\text{ПЧ}^{\text{ДЦ}}) = C_{\text{к}}^{\text{ДЦ}}(\text{М10}^{\text{ДЦ}}) + C_{\text{ЖРС}}^{\text{ДЦ}}(\text{ДА}^{\text{ДЦ}}) + C_{\text{д}}^{\text{ДЦ}} + (\text{РП} - \text{Отх} - \text{ПП}), \quad (3.3)$$

где $\text{ПЧ}^{\text{ДЦ}}$ – производство чугуна по доменному цеху, т;

$C_{\text{к}}^{\text{ДЦ}}(\text{М10}^{\text{ДЦ}})$ – точка зависимости стоимости скипового кокса на тонну чугуна от параметра М10, руб/т;

$\text{М10}^{\text{ДЦ}}$ – средневзвешенное значение М10 по доменному цеху, %;

$C_{\text{ЖРС}}^{\text{ДЦ}}(\text{ДА}^{\text{ДЦ}})$ – точка зависимость стоимости железорудного сырья (ЖРС) на тонну чугуна от доли агломерата, руб/т;

$\text{ДА}^{\text{ДЦ}}$ – средневзвешенное значение доли агломерата по доменному цеху;

$C_{\text{д}}^{\text{ДЦ}}$ – 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.

Затраты на составляющие комбинированного дутья, такие как природный газ, кислород, дутье, потребляемые доменным цехом определяются по формуле

$$C_{\text{д}}^{\text{ДЦ}} = \frac{V_{\text{пг}}^{\text{ДЦ}} \cdot C_{\text{пг}}}{1000 \cdot \text{ПЧ}^{\text{ДЦ}}} + \frac{V_{\text{O}_2}^{\text{ДЦ}} \cdot C_{\text{кг}}}{1000 \cdot \text{ПЧ}^{\text{ДЦ}}} + \frac{V_{\text{д}}^{\text{ДЦ}} \cdot C_{\text{д}}}{1000 \cdot \text{ПЧ}^{\text{ДЦ}}}, \quad (3.4)$$

где $V_{\text{пг}}^{\text{ДЦ}}$, $V_{\text{O}_2}^{\text{ДЦ}}$, $V_{\text{д}}^{\text{ДЦ}}$ – прогнозируемые объемы потребления природного газа, дутья, кислорода в доменном цехе соответственно, м³,

$C_{\text{пг}}$ – цена природного газа, руб/тыс. м³;

$C_{\text{кг}}$ – цена кислорода газообразного, руб/тыс. м³;

C_d – цена дутья, руб/тыс. м³.

Совместная оценка экономической эффективности работы доменного цеха и эффективности доменных печей при решении задачи оптимизации в работе осуществляется с помощью обобщенного критерия. Обобщенный критерий имеет следующий вид

$$q = \beta \cdot C_{чн} + (1 - \beta) \cdot (1 - E_{дц}) \rightarrow \min, \quad (3.5)$$

где β – весовой коэффициент, отражающий важность учета себестоимости и эффективности в составе критерия;

$C_{чн}$ – нормированная переменная составляющая себестоимости чугуна;

$E_{дц}$ – оценка технологической эффективности доменного цеха.

Нормирование переменной составляющей себестоимости чугуна осуществляется с помощью минимаксной нормализации.

$$C_{чн} = \frac{C_{ч} - C_{ч_{\min}}}{C_{ч_{\max}} - C_{ч_{\min}}}, \quad (3.6)$$

где $C_{ч_{\min}}$, $C_{ч_{\max}}$ – минимальные и максимальные значения переменной составляющей себестоимости чугуна.

Коэффициент β выбирается экспертами в зависимости от текущей ситуации на рынке сырья для металлургических процессов, возможности повышения эффективности на доменных печах. Например, если есть возможность привезти сырье высокого качества, то затраты на сырье будут высокие, эксперты устанавливается β меньше 0,5, чтобы алгоритм стремился повышать объем производства тем самым увеличивая объем прибыли. В противном случае, себестоимость будет низкой т.к. сырье низкого качества, как правило, имеет невысокую стоимость, и β устанавливается больше 0,5, для получения снижения переменной составляющей себестоимости чугуна.

В решаемой задаче оптимизируются следующие параметры, характеризующие работу доменных печей: 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 O₂ в горячем дутье,

удельный расход природного газа, температура горячего дутья, влажность воздуха), и показатель теплового состояния доменной печи (содержание Si в чугунае).

В задаче необходимо подобрать значения указанных параметров для каждой доменной печи.

Оптимизируемые показатели используются в факторных моделях основных показателей доменной плавки (производительности и удельного расхода кокса (УРК)), имеющие вид линейных функций с коэффициентами. Производительность и УРК для i -й доменной печи рассчитываются как

$$\text{УРК}_i = \text{УРК}_{\text{баз } i} + \frac{\text{УРК}_{\text{баз } i}}{100} \cdot \sum_{j=1}^n (k_{ij}^{\text{УРК}} \cdot \Delta P_{ij}) + k_{i \text{ ПГ}}^{\text{УРК}} \cdot \Delta R_{\text{ПГ}_{\text{уд}(i)}} + \text{УРК}_{\text{рем}}, \quad (3.7)$$

$$\text{ПЧ}_i = \text{ПЧ}_{\text{баз } i} + \frac{\text{ПЧ}_{\text{баз } i}}{100} \cdot \sum_{j=1}^n (k_{ij}^{\text{ПЧ}} \cdot \Delta P_{ij}), \quad (3.8)$$

где $j = 1, 2, \dots, n$ – номер параметра, влияющего на УРК и производительность;

$\text{УРК}_{\text{баз } i}$ – значение удельного расхода кокса в базовом периоде для i -й доменной печи, кг/т;

$\text{ПЧ}_{\text{баз } i}$ – 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;

$k_{ij}^{\text{УРК}}, k_{ij}^{\text{ПЧ}}$ – коэффициент влияния j -го параметра i -й доменной печи на УРК и производительность соответственно;

$k_{i \text{ ПГ}}^{\text{УРК}}$ – коэффициент влияния удельного расхода природного газа i -й доменной печи на УРК;

$\Delta R_{\text{ПГ}_{\text{уд}(i)}}$ – изменение удельного расхода природного газа относительно базового периода, м³/т;

$\text{УРК}_{\text{рем}}$ – удельный расход кокса на ремонты, кг/т.

$$\sum_{j=1}^n (k_{ij}^{\text{ПЧ}} \cdot \Delta P_{ij}) = K_{M10(i)}^{\text{ПЧ}} \cdot \Delta M10_{(i)} + K_{Ash(i)}^{\text{ПЧ}} \cdot \Delta Ash_{(i)} + K_{S(i)}^{\text{ПЧ}} \cdot \Delta S_{(i)} + K_{ДА(i)}^{\text{ПЧ}} \cdot \Delta ДА_{(i)} +$$

$$+ K_{Fe(i)}^{\text{ПЧ}} \cdot \Delta Fe_{(i)} + K_{O_{2(i)}}^{\text{ПЧ}} \cdot \Delta O_{2(i)} + K_{Si(i)}^{\text{ПЧ}} \cdot \Delta Si_{(i)} +$$

$$+ K_{ТГД(i)}^{\text{ПЧ}} \cdot \Delta ТГД_{(i)} + K_{W(i)}^{\text{ПЧ}} \cdot \Delta W_{(i)}; \quad (3.9)$$

$$\sum_{j=1}^n (k_{ij}^{\text{УРК}} \cdot \Delta P_{ij}) = K_{M10(i)}^{\text{УРК}} \cdot \Delta M10_{(i)} + K_{Ash(i)}^{\text{УРК}} \cdot \Delta Ash_{(i)} + K_{S(i)}^{\text{УРК}} \cdot \Delta S_{(i)} + K_{ДА(i)}^{\text{УРК}} \cdot \Delta ДА_{(i)} +$$

$$+ K_{Fe(i)}^{\text{УРК}} \cdot \Delta Fe_{(i)} + K_{O_{2(i)}}^{\text{УРК}} \cdot \Delta O_{2(i)} + K_{Si(i)}^{\text{УРК}} \cdot \Delta Si_{(i)} +$$

$$+ K_{ТГД(i)}^{\text{УРК}} \cdot \Delta ТГД_{(i)} + K_{W(i)}^{\text{УРК}} \cdot \Delta W_{(i)}; \quad (3.10)$$

где $K_{M10(i)}^{\text{ПЧ}}, K_{M25(i)}^{\text{ПЧ}}, K_{Ash(i)}^{\text{ПЧ}}, K_{S(i)}^{\text{ПЧ}}, K_{ДА(i)}^{\text{ПЧ}}, K_{Fe(i)}^{\text{ПЧ}}, K_{O_{2(i)}}^{\text{ПЧ}}, K_{Si(i)}^{\text{ПЧ}}, K_{ТГД(i)}^{\text{ПЧ}}, K_{W(i)}^{\text{ПЧ}},$
 $K_{M10(i)}^{\text{УРК}}, K_{M25(i)}^{\text{УРК}}, K_{Ash(i)}^{\text{УРК}}, K_{S(i)}^{\text{УРК}}, K_{ДА(i)}^{\text{УРК}}, K_{Fe(i)}^{\text{УРК}}, K_{O_{2(i)}}^{\text{УРК}}, K_{Si(i)}^{\text{УРК}}, K_{ТГД(i)}^{\text{УРК}}, K_{W(i)}^{\text{УРК}}$ — коэффициенты влияния параметров истираемость кокса (M10), содержание золы в коксе, содержание серы в коксе, доли агломерата, содержания Fe в шихте, содержания кислорода в дутье, содержания кремния в чугунах i -й доменной печи на УРК и производительность соответственно.

Также для описания физики процессов доменных печей в данной диссертационной работе используются следующие уравнения.

Теоретическая температура горения доменной печи связана с технологическими параметрами следующей зависимостью

$$ТГГ_i = 2405 + 0,75 \cdot (ТГД_i - 1200) - 5,4 \cdot W_i + 43 \cdot (O_{2i} - 21) - 52 \cdot \frac{R_{\text{ПГ}i}}{R_{\text{Д}i}} \cdot 100, \quad (3.11)$$

где $ТГД_i$ — температура горячего дутья, °С,

W_i — влажность дутья, г/м³,

O_{2i} — объемная доля кислорода в обогащенном дутье, %,

$R_{\text{ПГ}i}$ — расход природного газа, м³/ч,

$R_{\text{Д}i}$ — расход обогащенного дутья в прогнозируемом периоде для i -й доменной печи, м³/ч.

Расход технологического кислорода по каждой доменной печи рассчитывается через расход обогащенного дутья. Зависимость была выведена следующим образом.

С одной стороны, расход кислорода в обогащенное дутье равен произведению расхода обогащенного дутья на объемную долю кислорода в обогащенном дутье. С другой стороны, расход кислорода в обогащенном дутье равен сумме расходов кислорода в необогащенном дутье и расходу кислорода в технологическом кислороде, которые также получают путем умножения объемных долей на соответствующие расходы.

Имеем

$$O_{2i} \cdot R_{д(i)} = O_2^{необ} \cdot R_{д}^{необ} + O_2^{ТК} \cdot R_{O_{2(i)}}, \quad (3.12)$$

где $O_2^{необ}, O_2^{ТК}$ – объемные доли кислорода в необогащенном дутье и технологическом кислороде соответственно,

$R_{д}^{необ}, R_{O_{2(i)}}$ – расходы необогащенного дутья и технологического кислорода соответственно.

После преобразований получаем зависимость расхода технологического кислорода от расхода обогащенного дутья.

$$R_{O_{2(i)}} = \frac{O_2^{об} - O_2^{необ}}{O_2^{ТК} - O_2^{необ}} \cdot R_{д}^{об}. \quad (3.13)$$

Для получения расхода дутья используется зависимость следующего вида

$$R_{д(i)} = b_0 + b_1 \cdot ПЧ_{(i)}, \quad (3.14)$$

где b_0, b_1 – коэффициенты модели часового расхода дутья, определяемые с помощью регрессионного анализа статистических данных.

Часовой расход природного газа вычисляется по формуле

$$R_{ПГ(i)} = (R_{ПГ_{уд(i)}} \cdot ПЧ_{(i)})/24, \quad (3.15)$$

где $R_{ПГ_{уд(i)}}$ – удельный расход природного газа, м³/т.

В итоге каждая доменная печь характеризуется следующей системой уравнений

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{УРК}_i = \text{УРК}_{\text{баз } i} + \frac{\text{УРК}_{\text{баз } i}}{100} \cdot \sum_{j=1}^n (k_{ij}^{\text{УРК}} \cdot \Delta P_{ij}) + k_{i \text{ ПГ}}^{\text{УРК}} \cdot \Delta R_{\text{ПГ}_{\text{уд}(i)}} + \text{УРК}_{\text{рем}}, \\ \text{ПЧ}_i = \text{ПЧ}_{\text{баз } i} + \frac{\text{ПЧ}_{\text{баз } i}}{100} \cdot \sum_{j=1}^n (k_{ij}^{\text{ПЧ}} \cdot \Delta P_{ij}) \\ \text{ТТГ}_i = 2405 + 0,75 \cdot (\text{ТГД}_i - 1200) - 5,4 \cdot W_i + 43 \cdot (O_{2i} - 21) - 52 \cdot \frac{R_{\text{ПГ}_i}}{R_{\text{д}_i}} \cdot 100, \\ R_{\text{ТК}} = \frac{O_2^{\text{об}} - O_2^{\text{необ}}}{O_2^{\text{ТК}} - O_2^{\text{необ}}} \cdot R_{\text{д}}^{\text{об}} \\ R_{\text{д}(i)} = b_0 + b_1 \cdot \text{ПЧ}_{(i)}, \\ R_{\text{ПГ}(i)} = (R_{\text{ПГ}_{\text{уд}(i)}} \cdot \text{ПЧ}_{(i)})/24, \end{array} \right. \quad (3.16)$$

В данной диссертационной работе для расчета параметров, характеризующих доменный цех, используются следующие уравнения:

$$\text{ПЧ}^{\text{ДЦ}} = \sum_{i=1}^n k d_{(i)} \cdot \text{ПЧ}_{(i)}, \quad (3.17)$$

$$V_{\text{ПГ}}^{\text{ДЦ}} = \sum_{i=1}^n 24 \cdot k d_{(i)} \cdot R_{\text{ПГ}(i)}, \quad (3.18)$$

$$V_{O_2}^{\text{ДЦ}} = \sum_{i=1}^n 24 \cdot k d_{(i)} \cdot R_{O_2(i)}, \quad (3.19)$$

$$V_{\text{д}}^{\text{ДЦ}} = \sum_{i=1}^n 24 \cdot k d_{(i)} \cdot R_{\text{д}(i)}, \quad (3.20)$$

где $V_{\text{ПГ}}^{\text{ДЦ}}$, $V_{O_2}^{\text{ДЦ}}$, $V_{\text{д}}^{\text{ДЦ}}$ – прогнозируемые объемы потребления природного газа, дутья, кислорода в доменном цехе соответственно, мЗ,

$k d_i$ – количество дней в месяце работы для i -й доменной печи, не включая ремонты.

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

– на показатели качества кокса

$$M10_{\min(i)} \leq M10_{(i)} \leq M10_{\max(i)}, \quad (3.21)$$

$$M25_{\min(i)} \leq M25_{(i)} \leq M25_{\max(i)}, \quad (3.22)$$

$$\text{Ash}_{\min(i)} \leq \text{Ash}_{(i)} \leq \text{Ash}_{\max(i)}, \quad (3.23)$$

$$S_{\min(i)} \leq S_{(i)} \leq S_{\max(i)}, \quad (3.24)$$

- на показатели качества и структуры ЖРС

$$Fe_{min(i)} \leq Fe_{(i)} \leq Fe_{max(i)}, \quad (3.25)$$

$$DA_{min(i)} \leq DA_{(i)} \leq DA_{max(i)}, \quad (3.26)$$

- на дутьевые параметры:

$$O_{2min(i)} \leq O_{2(i)} \leq O_{2max(i)}, \quad (3.27)$$

$$R_{пгmin(i)} \leq R_{пг(i)} \leq R_{пгmax(i)}, \quad (3.28)$$

$$ТГД_{min(i)} \leq ТГД_{(i)} \leq ТГД_{max(i)}, \quad (3.29)$$

$$W_{min(i)} \leq W_{(i)} \leq W_{max(i)}, \quad (3.30)$$

где $M10_{(i)}$ – истираемость кокса (M10) в прогнозируемом периоде для i -й доменной печи, %,

$M25_{(i)}$ – дробимость кокса (M25) в прогнозируемом периоде для i -й доменной печи, %,

$Ash_{(i)}$ – содержание золы в коксе в прогнозируемом периоде для i -й доменной печи, %,

$S_{(i)}$ – содержание серы в коксе в прогнозируемом периоде для i -й доменной печи, %,

$Fe_{(i)}$ – содержание железа в шихте в прогнозируемом периоде для i -й доменной печи, %,

$DA_{(i)}$ – доля агломерата в железорудной шихте в прогнозируемом периоде для i -й доменной печи,

$O_{2(i)}$ – содержание кислорода в дутье в прогнозируемом периоде для i -й доменной печи, %;

$R_{пг(i)}$ – расход природного газа в прогнозируемом периоде для i -й доменной печи, м³/ч;

$ТГД_{(i)}$ – температура горячего дутья в прогнозируемом периоде для i -й доменной печи, °C;

$W_{(i)}$ – влажность дутья в прогнозируемом периоде для i -й доменной печи, г/м³;

$M10_{min(i)}, M10_{max(i)}, M25_{min(i)}, M25_{max(i)}, Ash_{min(i)}, Ash_{max(i)}, S_{min(i)}, S_{max(i)}, Fe_{min(i)}, Fe_{max(i)}, DA_{min(i)}, DA_{max(i)}, O_{2min(i)}, O_{2max(i)}, R_{пгmin(i)}, R_{пгmax(i)}, TГД_{min(i)}, TГД_{max(i)}, W_{min(i)}, W_{max(i)}$, – заданные минимальные и максимальные значения параметров доменных печей.

– на показатели теплового состояния доменной печи:

а) на теоретическую температуру горения

$$TГГ_{min(i)} \leq TГГ_{(i)} \leq TГГ_{max(i)}, \quad (3.31)$$

где $TГГ_{(i)}$ – расчетная теоретическая температура горения в прогнозируемом периоде для i -й доменной печи, °С;

$TГГ_{min(i)}, TГГ_{max(i)}$ – заданные минимальные и максимальные значения теоретической температуры горения для i -й доменной печи, °С.

б) на содержание кремния в чугуна

$$Si_{min(i)} \leq Si_{(i)} \leq Si_{max(i)}, \quad (3.32)$$

где $Si_{(i)}$ – содержание кремния в чугуна в прогнозируемом периоде для i -й доменной печи, %;

$Si_{min(i)}, Si_{max(i)}$ – заданные минимальные и максимальные значения содержания кремния в чугуна для i -й доменной печи, °С.

Ограничение на производительность доменных печей в данной диссертационной работе характеризует производство, которое возможно получить на каждой доменной печи.

$$ПЧ_{min(i)} \leq ПЧ_{(i)} \leq ПЧ_{max(i)}, \quad (3.33)$$

где $ПЧ_{(i)}$ – объем производства чугуна в прогнозируемом периоде по i -й доменной печи, т/сут;

$ПЧ_{min(i)}, ПЧ_{max(i)}$ – заданные минимальные и максимальные значения объема производства чугуна для i -й доменной печи, т/сут.

Также задаются ограничение на удельный расход кокса по каждой доменной печи

$$УРК_{min(i)} \leq УРК_{(i)} \leq УРК_{max(i)}, \quad (3.34)$$

где $УРК_{(i)}$ – удельный расход кокса в прогнозируемом периоде по i -й доменной печи, кг/т;

$УРК_{min(i)}, УРК_{max(i)}$ – заданные минимальные и максимальные значения удельного расхода кокса для i -й доменной печи, кг/т.

При планировании доменного производства также необходимо учитывать объем располагаемых ресурсов, который может быть использован для обеспечения доменного производства. На работу доменного цеха, как правило, накладываются следующие ограничения на объем производства чугуна по цеху и потребление дутьевых ресурсов:

$$ПЧ_{зад}^{ДЦ} \leq ПЧ^{ДЦ} \leq ПЧ_{зад}^{ДЦ} + \varepsilon, \quad (3.35)$$

$$V_{пг}^{ДЦ} \leq V_{пг\ max}^{ДЦ}, \quad (3.36)$$

$$V_{O2}^{ДЦ} \leq V_{O2\ max}^{ДЦ}, \quad (3.37)$$

$$V_{д}^{ДЦ} \leq V_{д\ max}^{ДЦ}, \quad (3.38)$$

где $ПЧ_{зад}^{ДЦ}$ – требуемый объем производства чугуна,

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

$V_{пг}^{ДЦ}, V_{O2}^{ДЦ}, V_{д}^{ДЦ}$ – прогнозируемые объемы потребления природного газа, дутья, кислорода в доменном цехе соответственно, м³;

$V_{пг\ max}^{ДЦ}, V_{O2\ max}^{ДЦ}, V_{д\ max}^{ДЦ}$ – заданные максимальные значения объемов потребления природного газа, дутья, кислорода в доменном цехе соответственно, м³.

В уравнениях зависимости показателей доменного процесса от технологических параметров (3.7)-(3.8), как правило, используются коэффициенты из технологической инструкции, рассчитанные для усредненных условий работы доменных печей. В работе предлагается использовать факторные коэффициенты, входящие в режимные кластеры значений параметров доменного процесса, определяемые алгоритмом на основе кластерного анализа и алгоритм на основе комитетного подхода к выбору планового режимного кластера, которые были предложены в главе 2.

Алгоритм определения зависимости значений обобщенного критерия для разных объемов производства

Алгоритм начинается с подгрузки исходных данных, включающих технологические условия, экспертные оценки.

На следующем шаге формируется вектор объемов производства на основе исходных данных следующим образом. Сначала рассчитываются максимальный и минимальный объемы производства по доменному цеху.

$$ПЧ_{min}^{ДЦ} = \sum_{i=1}^n k d_{(i)} \cdot ПЧ_{min(i)}, \quad (3.39)$$

$$ПЧ_{max}^{ДЦ} = \sum_{i=1}^n k d_{(i)} \cdot ПЧ_{max(i)}, \quad (3.40)$$

где $ПЧ_{min(i)}$, $ПЧ_{max(i)}$ – минимально и максимально возможное производство по доменным печам.

Далее формируется вектор объема производства от минимально до максимально возможного с заданным шагом.

$$\{ПЧ_{min}^{ДЦ}, \dots, ПЧ_k^{ДЦ}, \dots, ПЧ_{max}^{ДЦ}\}. \quad (3.41)$$

После этого для точки объема производства подгружаются зависимости стоимости угольной шихты и железорудного сырья из подсистем оптимизации привоза и потребления угольного сырья и ЖРС. Данные зависимости представляют собой несколько вариантов шихты, характеризующиеся значениями различных показателей, в том числе стоимостью кокса и ЖРС.

Далее для каждого объема производства определяются оптимальные значения параметров по доменным печам и доменному цеху с помощью алгоритма управления доменным производством. В случае успешного завершения к результатам работы алгоритма, включающих оптимальные значения параметров доменных печей и доменного цеха, добавляются данные по привозу и потреблению сырья соответствующих точкам зависимостей угольной шихты и ЖРС, которые вошли в оптимальные значения параметров для объема производства чугуна.

В итоговую зависимость значений обобщенного критерия от объема производства чугуна включаются те объемы производства, для которых удалось найти оптимальные значения параметров, удовлетворяющих всем технологическим условиям. Если для точки объема производства решение не удалось найти алгоритм переходит к следующей точки без формирования результирующих данных. Кроме того, в конце алгоритма при наличии зависимости значений обобщенного критерия от объемов производства чугуна определяется рекомендованный объем производства чугуна, соответствующий точке с наименьшим значением обобщенного критерия. На рисунке 3.1 представлена блок-схема алгоритма определения зависимости значений обобщенного критерия для разных объемов производства.

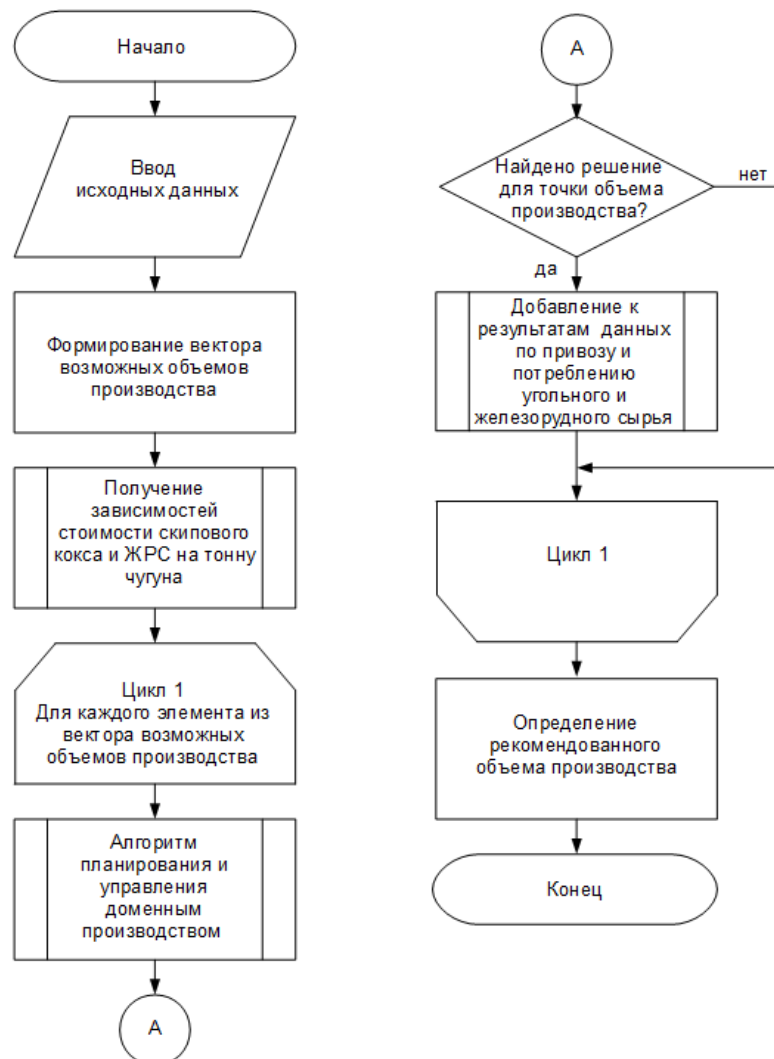


Рисунок 3.1 – Блок-схема алгоритма определения зависимости значений обобщенного критерия q для разных объемов производства

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

Ограничения (3.21-3.38) составляют систему ограничений в решаемой задаче, которая часто является противоречивой (несовместной). Число неравенств в данной системе значительно превышает число оптимизируемых параметров, т.е. с математической точки зрения система ограничений является переопределенной.

При решении оптимизационной задачи необходимо, чтобы система была совместной т.е. чтобы область допустимых значений не была пустой.

Для определения совместна ли система ограничений решаемой задачи на первом этапе алгоритма происходит поиск значений искомых параметров, удовлетворяющих всем технологическим условиям с помощью метода ветвей и границ по критерию [21]

$$\max_{(x)} C(x), \quad C(x) = \sum_{j=1}^m \omega_j \mu_j(x), \quad (3.42)$$

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.

Данный критерий позволяет определить, когда искомые значения полностью удовлетворяют системе неравенств, полученных из технологических условий.

В данной диссертационной работе поиск значений параметров технологического процесса происходит для сложной многоуровневой системы. В связи с этим коэффициенты, отражающие важность выполнения условия по параметру технологического процесса, рассчитываются на основе выставления экспертных оценок на уровне доменной печи и доменного цеха.

Так на уровне доменной печи технологи выставляют важность поддержания значений параметров печи в заданных технологических условиях, т.е. соотношение весов для ограничений по доменной печи между собой определяется как

$$\sum_j^{j \in J_{\text{ДП}_i}} \frac{2\omega_j}{\sum_j^{j \in J_{\text{ДП}_i}} \omega_j} = 1, \quad (3.43)$$

где $J_{\text{ДП}}$ – индексы ограничений по i -ой доменной печи

В формуле (3.43) и последующих формулах добавлено умножение коэффициента на 2 так как значение параметра проверяется на минимальное и максимальное значение т.е. на одно значение приходится два ограничения.

Соотношение для каждого ограничения по доменной печи определяется на основе экспертных оценок.

$$\frac{2\omega_j}{\sum_j^{j \in J_{\text{ДП}}} \omega_j} = \frac{\sum_{k=1}^{n_E} u_{i,k}^{\text{ДП}}}{\sum_{i=1}^{n_P} \sum_{k=1}^{n_E} u_{i,k}^{\text{ДП}}}. \quad (3.44)$$

где $u_{i,k}^{\text{ДП}}$ – экспертные оценки важности выполнения ограничений,

n_P – количество параметров,

n_E – количество экспертов.

Также соотношение между коэффициентами отражают приоритетность загрузки доменных печей

$$\sum_{i=1}^n \frac{\sum_j^{j \in J_{\text{ДП}}} 2\omega_j}{\sum_{i=1}^{k_{\text{ДП}}} \sum_j^{j \in J_{\text{ДП}}} \omega_j} = 1. \quad (3.45)$$

Соотношение для суммы весов ограничений по каждой доменной печи определяется на основе среднего производства чугуна по доменным печам за текущий период.

$$\frac{\sum_j^{j \in J_{\text{ДП}}} 2\omega_{ij}}{\sum_{i=1}^n \sum_j^{j \in J_{\text{ДП}}} \omega_{ij}} = \frac{\text{ПЧ}_{\text{тек}_i}}{\sum_{i=1}^{k_{\text{ДП}}} \text{ПЧ}_{\text{тек}_i}}. \quad (3.46)$$

где $\text{ПЧ}_{\text{тек}_i}$ – средний объем производства чугуна по i -ой доменной печи.

Помимо этого, на уровне доменного цеха задается соотношением важности выполнения того или иного ограничения на потребление ресурсов доменного цеха.

$$\sum_{j=1}^{j \in J_{\text{ДЦ}}} \frac{\omega_j}{\sum_{j=1}^{j \in J_{\text{ДЦ}}} \omega_j} = 1, \quad (3.47)$$

$$\frac{\omega_j}{\sum_{j \in J_{\text{ДЦ}}} \omega_j} = \frac{\sum_{k=1}^{n_E} u_{i,k}^{\text{ДЦ}}}{\sum_{i=1}^{n_P} \sum_{k=1}^{n_E} u_{i,k}^{\text{ДЦ}}}. \quad (3.48)$$

В формулах (3.44), (3.45) умножение на 2 отсутствует так как потребление ресурсов сравнивается только с максимально возможным значением.

Для все ограничений накладываются условия:

$$\sum_j^m \omega_j = 100, \quad (3.49)$$

Для $\forall \omega_j, j \in J_{\text{ДП}} \omega_j \geq 0,05$.

Для $\forall \omega_j, j \in J_{\text{ДЦ}} \omega_j \geq 0,5$.

Решение задач по критерию (3.39) дискретного программирования включает выбор направлений поиска решения и поиск значений искомых параметров [18].

Для поиска искомых значений оптимизируемых параметров, удовлетворяющих условиям, система ограничений приводится к каноническому виду

$$\left\{ \begin{array}{l}
M10_{\min(i)} - M10_{(i)} \leq 0, \quad M25_{\min(i)} - M25_{(i)} \leq 0, \quad Ash_{\min(i)} - Ash_{(i)} \leq 0, \\
M10_{(i)} - M10_{\max(i)} \leq 0, \quad M25_{(i)} - M25_{\max(i)} \leq 0, \quad Ash_{(i)} - Ash_{\max(i)} \leq 0, \\
S_{\min(i)} - S_{(i)} \leq 0, \quad Fe_{\min(i)} - Fe_{(i)} \leq 0, \quad \Delta A_{\min(i)} - \Delta A_{(i)} \leq 0, \\
S_{(i)} - S_{\max(i)} \leq 0, \quad Fe_{(i)} - Fe_{\max(i)} \leq 0, \quad \Delta A_{(i)} - \Delta A_{\max(i)} \leq 0, \\
O_{2\min(i)} - O_{2(i)} \leq 0, \quad TГД_{\min(i)} - TГД_{(i)} \leq 0, \quad W_{\min(i)} - W_{(i)} \leq 0, \\
O_{2(i)} - O_{2\max(i)} \leq 0, \quad TГД_{(i)} - TГД_{\max(i)} \leq 0, \quad W_{(i)} - W_{\max(i)} \leq 0, \\
Si_{\min(i)} - Si_{(i)} \leq 0, \quad ПЧ_{\min(i)} - ПЧ_{(i)} \leq 0, \quad УРК_{\min(i)} - УРК_{(i)} \leq 0, \\
Si_{(i)} - Si_{\max(i)} \leq 0, \quad ПЧ_{(i)} - ПЧ_{\max(i)} \leq 0, \quad УРК_{(i)} - УРК_{\max(i)} \leq 0, \\
R_{\PiГ_{\min}} - \frac{1}{24} R_{\PiГ_{уд}} \cdot ПЧ \leq 0, \quad \frac{1}{24} R_{\PiГ_{уд}} \cdot ПЧ - R_{\PiГ_{\max}} \leq 0, \\
TГГ_{\min(i)} - \left(2405 + 0,75(TГД_{(i)} - 1200) - 5,4 \cdot W_{(i)} + 43(O_{2(i)} - 21) - 52 \cdot 100 \cdot \frac{R_{\PiГ_{уд(i)}} \cdot ПЧ_{(i)}}{24(b_0 + b_1 \cdot ПЧ_{(i)})} \right) \leq 0, \\
\left(2405 + 0,75(TГД_{(i)} - 1200) - 5,4 \cdot W_{(i)} + 43(O_{2(i)} - 21) - 52 \cdot 100 \cdot \frac{R_{\PiГ_{уд(i)}} \cdot ПЧ_{(i)}}{24(b_0 + b_1 \cdot ПЧ_{(i)})} \right) - TГГ_{\max(i)} \leq 0, \\
\sum_{i=1}^k kd_{(i)} \cdot ПЧ_{(i)} - ПЧ_{\text{зад}}^{\text{ДП}} - \varepsilon \leq 0, \quad ПЧ_{\text{зад}}^{\text{ДП}} - \sum_{i=1}^k kd_{(i)} \cdot ПЧ_{(i)} \leq 0, \\
\sum_{i=1}^k \left(24 \cdot kd_{(i)} \cdot \frac{O_2 - O_2^{\text{необ}}}{O_2^{\text{тк}} - O_2^{\text{необ}}} \cdot (b_0 + b_1 \cdot ПЧ_{(i)}) \right) - (V_{O_2}^{\text{ДП}})_{\max} \leq 0, \\
\sum_{i=1}^k \left(24 \cdot kd_{(i)} \cdot (b_0 + b_1 \cdot ПЧ_{(i)}) \right) - (V_{\Delta}^{\text{ДП}})_{\max} \leq 0, \\
\sum_{i=1}^k (kd_{(i)} \cdot R_{\PiГ_{уд(i)}} \cdot ПЧ_{(i)}) - (V_{\PiГ}^{\text{ДП}})_{\max} \leq 0,
\end{array} \right. \quad (3.50)$$

где $УРК_i = УРК_{\text{баз } i} + \frac{УРК_{\text{баз } i}}{100} \cdot \sum_{j=1}^n (k_{ij}^{\text{УРК}} \cdot \Delta P_{ij}) + k_i^{\text{УРК}} \cdot \Delta R_{\PiГ_{уд(i)}} + УРК_{\text{рем}}$,

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

Частные квадратичные критерии для неравенств формируются в виде функций потерь

$$q_i(x) = 0,5(g_i^+(x))^2, \quad (3.51)$$

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

Соответствующие частные производные по компонентам вектора x будут иметь вид

$$d_{jk}(x) = g_j^+(x) \frac{\partial g_j(x)}{\partial x_k}. \quad (3.52)$$

Оценки перспективных направлений поиска искомых значений оптимизируемых параметров, удовлетворяющих всем ограничениям, формируются следующим образом.

Оценки перспективных направлений поиска решений для ограничений системы (3.47) определяются как

$$\sigma_{jk}(x) = \begin{cases} +1, & \text{при } g_{jk}(x) > 0, d_{jk}(x) < 0, \\ 0, & \text{при } g_{jk}(x) \leq 0, \\ -1, & \text{при } g_{jk}(x) > 0, d_{jk}(x) > 0. \end{cases} \quad (3.53)$$

Кроме того, определяются частные направления поиска решений

$$\delta_k = \begin{cases} +1, & \text{переменная } x_k \text{ возрастает} \\ 0, & \text{переменная } x_k \text{ неизменна,} \\ -1, & \text{переменная } x_k \text{ убывает.} \end{cases} \quad (3.54)$$

В l -м направлении поиска ожидаемое значение характеристической функции j -ого соотношения системы (3.50) определяется следующим образом

$$\mu_j^{\text{ож}}(l) = \begin{cases} 1, & \text{если } \forall k \sigma_{jk} \delta_k(l) \geq 0 \\ 0, & \text{если } \exists k \sigma_{jk} \delta_k(l) < 0. \end{cases} \quad (3.55)$$

Отсюда ожидаемое значение целевой функции (3.42)

$$C^{\text{ож}}(x) = \sum_{j=1}^n \omega_j \mu_j^{\text{ож}}(l). \quad (3.56)$$

Для нахождения реального значения целевой функции (3.42) в l -м направлении систему уравнений и неравенств (3.50) решается по критерию

$$\min_{(x)} Q^{\text{ож}}(l, x), \quad Q^{\text{ож}}(l, x) = \sum_j \mu_j^{\text{ож}}(l) \cdot (g_j^+(x))^2, \quad (3.57)$$

Решение задачи (3.57) выполняется градиентным методом на основе рекуррентного соотношения

$$x_r = x_{r-1} - \gamma_1 \left(\sum_j \mu_j^{\text{ож}}(l) \cdot g_j^+(x_{r-1}) \mathbf{grad} g_j(x_{r-1}) \right), \quad (3.58)$$

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

Найденные значения по рекуррентному соотношению (3.58) используются для нахождения реального значения целевой функции (3.42) в l -м направлении поиска.

$$C^p(x) = \sum_{j=1}^n \omega_j \mu_j^p(x(l)). \quad (3.59)$$

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

$$Tab_s \left\{ \{ \mu_j^{\text{ож}}(l) \}, C^{\text{ож}}(l) : l \in L_{s-1} \cup L_s, C^{\text{ож}}(l) > \max \{ C_{s-1}^p(x), C_s^p(x) \} \right\}, \quad (3.60)$$

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 в предложенном алгоритме происходит выбор перспективного направления из таблицы (3.60). 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 (3.53)-(3.56). На начальном шаге процедуры поиска искомых значений оптимизируемых параметров $\mu_i^{ож}$ для все ограничений выставляется равным 1.

Далее для выбранного направления определяются значения искомых параметров и рассчитывается реальное значение целевой функции C_s^p .

Процедура поиска максимально совместной подсистемы завершается, когда в таблице (3.60) не удастся найти направлений, которые могут быть выбраны в качестве перспективных. Оптимальные значения искомых параметров соответствуют тому направлению, которое имеет наибольшее реальное значение целевой функции.

Однако по завершению процедуры поиска значений часть ограничений может нарушаться. Для того, чтобы выполнились все технологические условия вводятся уступки на часть ограничений, где это возможно. 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 планирования и управления доменным производством.

Второй этап предложенного алгоритма предполагает поиск оптимальных значений оптимизируемых параметров по обобщенному критерию q (3.1)

$$q = \beta \cdot Cч^H + (1 - \beta) \cdot (1 - E_{ДЦ}^H) \rightarrow \min \quad (3.1)$$

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 [85].

Метод SQP основан на итеративном решении квадратичных подзадач. Далее приведем описание данного метода.

Определение лагранжиана происходит следующим образом

$$L(x, \lambda, \mu) = f(x) + \lambda^T h(x) + \mu^T g(x), \quad (3.61)$$

где $\lambda \in R^m$ – множители Лагранжа для равенств,

$\mu \in R^p$ – множители Лагранжа для неравенств ($\mu_i \geq 0$),

$h(x), g(x)$ – векторы левых частей уравнений и неравенств.

На каждой итерации k , зная текущую точку x_k , SQP строит квадратичную аппроксимацию лагранжиана и линеаризует ограничения.

Подзадача SQP формулируется как

$$\min_{d \in R^n} \nabla f(x_k)^T d + \frac{1}{2} d^T B_k d, \quad (3.62)$$

При условиях: $h(x_k) + \nabla h(x_k)^T d = 0$,

$$g(x_k) + \nabla g(x_k)^T d \leq 0,$$

где d – направление поиска (шаг),

$\nabla f(x_k)$ – градиент целевой функции,

$\nabla h(x_k) \in R^{n \times m}$ – якобиан ограничений-равенств,

$\nabla g(x_k) \in R^{n \times p}$ – якобиан ограничений-неравенств,

$B_k \in R^{n \times n}$ – аппроксимация гессиана лагранжиана $\nabla_{xx}^2 L(x_k, \lambda_k, \mu_k)$.

После решения QR-подзадачи получаем: направление \mathbf{d}_k , оценки множителей Лагранжа λ_{k+1}, μ_{k+1} (из двойственной задачи QR).

Затем обновляем точку:

$$\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{x}_k + \alpha_k \mathbf{d}_k, \quad (3.63)$$

где $\alpha_k \in (0,1]$ – шаг, выбирается с помощью линейного поиска.

Алгоритм SQP включает следующие шаги:

1. Инициализация

На этом шаге выбирается начальное приближение \mathbf{x}_0 , задается начальная матрица B_0 (обычно I или приближение гессиана),

2. Пока не выполнены условия остановки в цикле выполняются следующие действия

а) формирование QR-задачи в точке \mathbf{x}_k ,

б) решение QR-задачи: в результате получаются $\mathbf{d}_k, \lambda_{k+1}, \mu_{k+1}$,

в) линейный поиск для нахождения α_k , минимизирующего мерит-функцию,

г) обновление \mathbf{x} по формуле (3.63)

д) обновление B_{k+1} (по формуле BFGS с учетом градиентов лагранжиана),

3. Найденное значение \mathbf{x}_k является приближением к локальному минимуму

Найденные на втором этапе алгоритма значения оптимизируемых параметров будут являться решением задачи управления доменным производством.

Далее приведем укрупненное описание предложенного алгоритма решения задач планирования и управления доменным производством на основе кластерных моделей и комитетного подхода к принятию решений в противоречивых условиях.

На начальном этапе алгоритма вводятся исходные данные, такие как технологические условия, объем производства чугуна, для которого

происходит поиск оптимальных значений, данные из точек зависимостей стоимости скипового кокса и ЖРС.

Далее с помощью алгоритма на основе комитетного подхода к выбору режимного кластера для принятия решений по каждой доменной печи определяется режимный кластер, факторные коэффициенты которого входят в факторные модели показателей доменного процесса (производительности и УРК), используемые в оптимизационной задаче.

Следующим шагом выступает определение области допустимых решений для системы ограничений, характеризующих технологические условия. После этого проверяется удалось ли найти значения оптимизируемых параметров, удовлетворяющих всем ограничениям, входящим в систему. Если все ограничения выполнены, то происходит переход на следующий шаг алгоритма – определение оптимальных значений оптимизируемых параметров по обобщенному критерию q . Значения технологических параметров, полученные в результате данного шага, и будут являться решением рассматриваемой в работе оптимизационной задачи.

Блок-схема алгоритма решения задач планирования и управления доменным производством на основе кластерных моделей и комитетного подхода к принятию решений в противоречивых условиях представлена на рисунке 3.2.

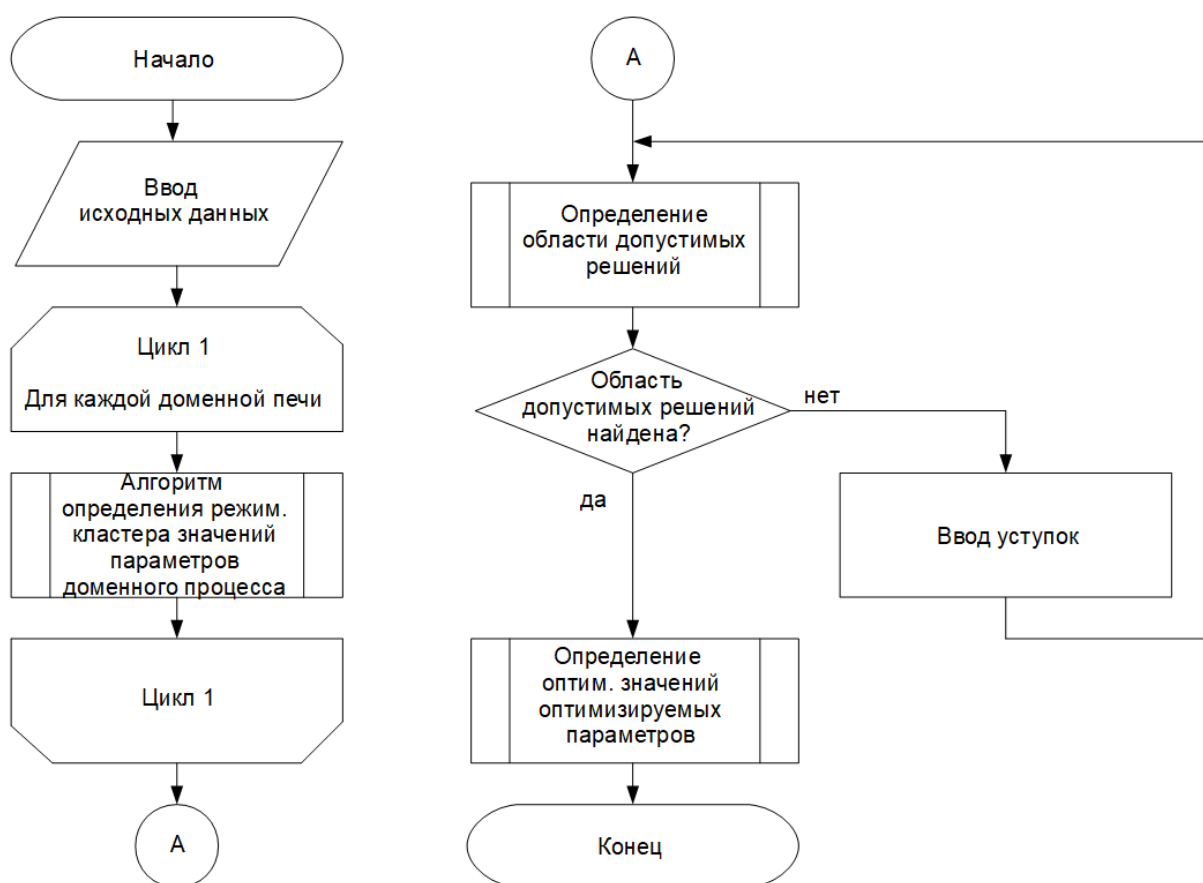


Рисунок 3.2 – Блок-схема алгоритма планирования и управления доменным производством

3.3 Результаты решения задачи поиска оптимальных значений параметров работы доменных печей

В данном разделе приведен пример использования предложенного алгоритма планирования и управления доменным производством на реальных данных.

Исходные данные для расчета включают в себя технологические ограничения для доменных печей (таблица 3.1) и доменного цеха (таблица 3.2).

Таблица 3.1 – Технологические ограничения для доменных печей

Название параметра	ДП №1		ДП №2		ДП №4		ДП №6	
	минимум	максимум	минимум	Максимум	минимум	максимум	минимум	максимум
Истираемость кокса (M10), %	7,08	8,63	6,9	9,27	6,9	9,27	6,9	9,27
Дробимость кокса (M25), %	87,88	90,53	84,4	89,14	83,68	88,21	83,68	89,14
Содержание золы в коксе, %	11,1	12,27	11,17	12,15	11,17	12,08	11,17	12,15
Содержание серы в коксе, %	0,36	0,52	0,38	0,52	0,38	0,52	0,38	0,52
Содержание Fe в шихте, %	54,88	59,95	54,73	59,78	55,34	59,44	54,85	59,35
Доля агломерата	0,48	0,85	0,53	0,86	0,52	0,85	0,52	0,86
Содержание O2 в дутье, %	24,1	31,6	22,9	28,8	23,9	27,2	23,9	30,7
Расход природного газа, м3/ч	18333,4	26352,1	3405,4	18800	18804,9	21226,3	17942,5	23501
Содержание Si в чугуна, %	0,349	1,155	0,48	1,893	0,401	1,022	0,342	1,06
Температура горячего дутья, оС	1237,95	1253,13	1124,7	1218,1	1071,14	1170,23	1106,15	1189,41
Влажность дутья, г/м3	0,68	22,82	0,3	12,31	0,46	22,25	0,65	20,91
ТТГ, оС	1826,4	2078	1542,3	2120	1804,5	2137	1776,8	2120
УРК, кг/т	395,2	454,3	389,8	428	394	466,7	382,8	472,6
Производство чугуна, т/сут	2968,2	4338,9	1972,4	4250,9	2617,2	3960,4	2573,8	3864,4

Продолжение таблицы 3.1

Название параметра	ДП №7		ДП №8		ДП №9		ДП №10	
	минимум	максимум	минимум	Максимум	минимум	максимум	минимум	максимум
Истираемость кокса (M10), %	6,13	9,13	6,13	9,13	6,4	10,78	7,73	10,78
Дробимость кокса (M25), %	84,99	90,39	84,99	90,39	83,95	90,02	83,95	89,37
Содержание золы в коксе, %	11,05	12,2	11,05	12,11	11,03	12,2	11	12,83
Содержание серы в коксе, %	0,4	0,53	0,4	0,53	0,39	0,53	0,3	0,54
Содержание Fe в шихте, %	54,97	59,53	55,29	59,34	55,78	60,67	55,89	59,93
Доля агломерата	0,48	0,8	0,5	0,87	0,41	0,73	0,53	0,82
Содержание O2 в дутье, %	23,3	29,8	22,6	27,2	23,1	28,5	24,4	29,5
Расход природного газа, м3/ч	13550	22544,2	9450	14515,4	20049,4	29983,3	19990	28423,3
Содержание Si в чугуна, %	0,358	1,437	0,371	1,90	0,407	1,394	0,411	1,127
Температура горячего дутья, оС	1016,77	1128,78	950,03	1212,10	1007,25	1038,36	701,399	1163,9
Влажность дутья, г/м3	0,51	22,13	2,77	18,04	0,53	13,3	0,23	12,85
ТТГ, оС	1706,4	2106	1938,6	2380	1761,7	2047,7	1889,5	2148,8
УРК, кг/т	404,4	486,9	404,2	495,6	402,5	442,6	396,4	431,6
Производство чугуна, т/сут	2298	3381,3	1798,4	3159,6	3754,4	5671,6	3621,5	5552,9

Таблица 3.2 – Технологические ограничения для доменного цеха

Параметр	Минимальное значение	Максимальное значение
Потребление природного газа, м ³	98 808 153	107 558 153
Потребление кислорода, м ³	61 960 940	96 698 000
Объем дутья, м ³	1 062 997 999	1 137 939 687

Оценки экспертов, отражающие важность выполнения технологических ограничений по доменным печам представлены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Экспертные оценки для параметров из технологических условий на доменные печи

Эксперт	Параметр				
	Истираемость кокса (M10), %	Дробимость кокса (M25), %	Содержание золы в коксе, %	Содержание серы в коксе, %	Содержание Fe в шихте, %
Эксперт 1	80	75	70	70	75
Эксперт 2	85	70	75	65	80
Эксперт 3	80	80	80	60	85

Продолжение таблицы 3.3

Эксперт	Параметр				
	Доля агломерата	Содержание O ₂ в дутье, %	Расход природного газа, м ³ /ч	Содержание Si в чугуна, %	Температура горячего дутья, оС
Эксперт 1	65	75	45	55	75
Эксперт 2	70	85	40	60	80
Эксперт 3	60	80	35	50	75

Продолжение таблицы 3.3

Эксперт	Параметр			
	Влажность дутья, г/м ³	ТТГ, оС	УРК, кг/т	Объем производства чугуна, т/сут
Эксперт 1	40	75	95	90
Эксперт 2	45	65	90	85
Эксперт 3	50	70	85	89

Соотношения весовых коэффициентов, отражающее приоритетность доменных печей (таблица 3.4), было рассчитано в зависимости от средних значений объемов производства по печам по формуле (3.46).

Таблица 3.4 – Соотношение для весовых коэффициентов, отражающее приоритетность доменных печей

ДП №1	ДП №2	ДП №4	ДП №6	ДП №7	ДП №8	ДП №9	ДП №10
0,13	0,12	0,12	0,11	0,09	0,09	0,17	0,17

Для параметров, входящих в технологические ограничения для доменного цеха, были получены следующие экспертные оценки, представленные в таблице 3.5.

Таблица 3.5 – Экспертные оценки важности выполнения технологических условий для доменного цеха

Эксперт	Параметр		
	Потребление природного газа, м ³	Потребление кислорода, м ³	Объем дутья, м ³
Эксперт 1	70	90	82
Эксперт 2	75	95	75
Эксперт 3	72	92	80

В таблице 3.6 представлены полученные значения весовых коэффициентов для технологических условий для доменных печей, в таблице 3.7 – для доменного цеха.

Таблица 3.6 – Весовые коэффициенты для технологических условий по доменным печам

Название параметра	ДП №1	ДП №2	ДП №4	ДП №6	ДП №7	ДП №8	ДП №9	ДП №10
Истираемость кокса (M10), %	0,26	0,24	0,24	0,24	0,20	0,19	0,35	0,35
Дробимость кокса (M25), %	0,24	0,22	0,22	0,22	0,18	0,17	0,32	0,32

Продолжение таблицы 3.6

Название параметра	ДП №1	ДП №2	ДП №4	ДП №6	ДП №7	ДП №8	ДП №9	ДП №10
Содержание золы в коксе, %	0,24	0,22	0,22	0,22	0,18	0,17	0,32	0,32
Содержание серы в коксе, %	0,21	0,19	0,19	0,19	0,16	0,15	0,28	0,28
Содержание Fe в шихте, %	0,26	0,24	0,24	0,23	0,19	0,18	0,35	0,34
Доля агломерата	0,21	0,19	0,19	0,189	0,16	0,15	0,28	0,28
Содержание O ₂ в дутье, %	0,26	0,24	0,24	0,23	0,19	0,18	0,35	0,34
Расход природного газа, м ³ /ч	0,13	0,12	0,12	0,12	0,10	0,09	0,17	0,17
Содержание Si в чугуна, %	0,18	0,16	0,16	0,16	0,13	0,13	0,24	0,24
Температура горячего дутья, оС	0,25	0,23	0,23	0,22	0,18	0,18	0,33	0,33
Влажность дутья, г/м ³	0,14	0,13	0,13	0,13	0,11	0,10	0,19	0,19
ТТГ, оС	0,22	0,21	0,21	0,20	0,17	0,16	0,30	0,30
УРК, кг/т	0,29	0,26	0,27	0,26	0,22	0,21	0,39	0,39
Производство чугуна, т/сут	0,28	0,26	0,26	0,25	0,21	0,20	0,38	0,38

Таблица 3.7 – Весовые коэффициенты для технологических условий по доменному цеху

Название параметра	Доменный цех
Потребление природного газа, м ³	10,52
Потребление кислорода, м ³	13,43
Объем дутья, м ³	11,49
Производство чугуна, т/сут	14,55

Значение коэффициентов, входящих в обобщенный показатель, которые были использованы в расчетах, приведены в таблице 3.8.

Таблица 3.8 – Значения коэффициентов, входящих в обобщенный критерий

β	α
0,3	0,5

На этапе поиска области допустимых значений для объема производства 830 тыс. т удалось найти значения искомых параметров, такие что выполнены все технологические условия ($C = 100$), ввод уступок не потребовался. На этапе поиска оптимальных значений удалось улучшить значение обобщенного критерия.

В таблице 3.9 представлены полученные значения обобщенного критерия q и его составляющих.

Таблица 3.9 – Результирующие показатели

Этап работы алгоритма	Оценка эффективности доменного цеха	Нормированная переменная составляющая себестоимость чугуна	Обобщенный критерий q
Поиск области допустимых значений	0,892	0,65	0,27
Поиск оптимальных значений	0,901	0,60	0,25

На рисунке 3.3 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 3.3 представлены значения параметров, входящих в технологические условия и весовые коэффициенты.

На рисунке 3.4 представлены результаты поиска оптимальных значений технологических параметров по обобщенному критерию q .

ДП1	ω	минимум	план	максимум
Истираемость кокса (M10), %	0,26	0,26	7,08	7,54
Дробимость кокса (M25), %	0,24	0,24	87,88	89,76
Содержание золы в коксе, %	0,24	0,24	11,1	11,67
Содержание серы в коксе, %	0,21	0,21	0,36	0,42
Содержание Fe в шихте, %	0,26	0,26	54,88	58,93
Доля агломерата	0,21	0,21	0,48	0,63
Содержание O2 в дутье, %	0,26	0,26	24,1	27,60
Расход природного газа, м3/ч	0,13	0,13	18333,4	22843
Содержание Si в чугуна, %	0,18	0,18	0,349	0,63
Температура горячего дутья, оС	0,25	0,25	1237,95	1250,00
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	405,1
Производство чугуна, т/сут	0,28	0,28	2968,2	3635

ДП7	ω	минимум	план	максимум
Истираемость кокса (M10), %	0,20	0,20	6,13	7,35
Дробимость кокса (M25), %	0,18	0,18	84,99	87,84
Содержание золы в коксе, %	0,18	0,18	11,05	11,58
Содержание серы в коксе, %	0,16	0,16	0,4	0,44
Содержание Fe в шихте, %	0,19	0,19	54,97	58,08
Доля агломерата	0,16	0,16	0,48	0,62
Содержание O2 в дутье, %	0,19	0,19	23,3	25,50
Расход природного газа, м3/ч	0,10	0,10	13550	13609
Содержание Si в чугуна, %	0,13	0,13	0,358	0,79
Температура горячего дутья, оС	0,18	0,18	1016,77	1120,00
Влажность дутья, г/м3	0,11	0,11	0,51	3,50
ТТГ, оС	0,17	0,17	1706,4	2072,7
УРК, кг/т	0,22	0,22	404,4	416,62
Производство чугуна, т/сут	0,21	0,21	2296	2726

ДЦ	ω	минимум	план	максимум
Истираемость кокса (M10), %				7,84
Содержание Fe в шихте, %				58,39
Доля агломерата				0,66
Потребление природного газа, м3	10,52	98808152,8	103808153	107558152,8
Потребление кислорода, м3	13,43	61960940,48	86357303	96700000
Объем дутья, м3	11,49	1062997999	1100632594	1137939687
Производство чугуна, т	14,55		830465	
УРК, кг/т			413,9	

ДП2	ω	минимум	план	максимум
Истираемость кокса (M10), %	0,24	0,24	6,9	8,10
Дробимость кокса (M25), %	0,22	0,22	84,4	86,46
Содержание золы 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 агломерата	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	18029
Содержание Si в чугуна, %	0,16	0,16	0,48	0,71
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

ДП8	ω	минимум	план	максимум
Истираемость кокса (M10), %	0,19	0,19	6,13	7,35
Дробимость кокса (M25), %	0,17	0,17	84,99	87,84
Содержание золы в коксе, %	0,17	0,17	11,05	11,58
Содержание серы в коксе, %	0,15	0,15	0,4	0,44
Содержание Fe в шихте, %	0,18	0,18	55,29	57,60
Доля агломерата	0,15	0,15	0,5	0,77
Содержание O2 в дутье, %	0,18	0,18	22,6	26,60
Расход природного газа, м3/ч	0,09	0,09	9450	9482
Содержание Si в чугуна, %	0,13	0,13	0,371	1,81
Температура горячего дутья, оС	0,18	0,18	950,03	1200,00
Влажность дутья, г/м3	0,10	0,10	2,77	3,50
ТТГ, оС	0,16	0,16	1938,6	2373,7
УРК, кг/т	0,21	0,21	404,2	453,6
Производство чугуна, т/сут	0,20	0,20	1798,4	2621

ДП4	ω	минимум	план	максимум
Истираемость кокса (M10), %	0,24	0,24	6,9	8,10
Дробимость кокса (M25), %	0,22	0,22	83,68	86,46
Содержание золы 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 агломерата	0,19	0,19	0,52	0,66
Содержание O2 в дутье, %	0,24	0,24	23,9	25,53
Расход природного газа, м3/ч	0,12	0,12	18804,9	19681
Содержание Si в чугуна, %	0,16	0,16	0,401	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

ДП9	ω	минимум	план	максимум
Истираемость кокса (M10), %	0,35	0,35	6,4	7,35
Дробимость кокса (M25), %	0,32	0,32	83,95	87,84
Содержание золы в коксе, %	0,32	0,32	11,03	11,58
Содержание серы в коксе, %	0,28	0,28	0,39	0,44
Содержание Fe в шихте, %	0,35	0,35	55,78	58,83
Доля агломерата	0,28	0,28	0,41	0,66
Содержание O2 в дутье, %	0,35	0,35	23,1	26,63
Расход природного газа, м3/ч	0,17	0,17	20049,4	23892
Содержание Si в чугуна, %	0,24	0,24	0,407	0,72
Температура горячего дутья, оС	0,33	0,33	1007,25	1030,00
Влажность дутья, г/м3	0,19	0,19	0,53	3,50
ТТГ, оС	0,30	0,30	1761,7	1998,0
УРК, кг/т	0,39	0,39	402,5	406,1
Производство чугуна, т/сут	0,38	0,38	3754,4	4908

ДП6	ω	минимум	план	максимум
Истираемость кокса (M10), %	0,24	0,24	6,9	8,10
Дробимость кокса (M25), %	0,22	0,22	83,68	86,46
Содержание золы 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	58,13
Доля агломерата	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	17942,5	20629
Содержание Si в чугуна, %	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

ДП10	ω	минимум	план	максимум
Истираемость кокса (M10), %	0,35	0,35	7,73	8,64
Дробимость кокса (M25), %	0,32	0,32	83,95	87,23
Содержание золы в коксе, %	0,32	0,32	11	11,67
Содержание серы в коксе, %	0,28	0,28	0,3	0,47
Содержание Fe в шихте, %	0,34	0,34	55,89	58,40
Доля агломерата	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	19990	20655
Содержание Si в чугуна, %	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	0,39	0,39	386,4	412,0
Производство чугуна, т/сут	0,38	0,38	3621,5	4868

Рисунок 3.3 – Полученные значения оптимизируемых параметров доменных печей для объема производства 830 тыс. т после этапа поиска области допустимых решений

ДП1	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 агломерата	0,48	0,64	0,85
Содержание O2 в дутье, %	24,1	27,97	31,6
Расход природного газа, м3/ч	18333,4	22922	28352,1
Содержание Si в чугуна, %	0,349	0,63	1,155
Температура горячего дутья, оС	1237,95	1250,00	1253,13
Влажность дутья, г/м3	0,68	3,50	22,82
ТТГ, оС	1826,4	2066,8	2078
УРК, кг/т	395,2	403,5	454,3
Производство чугуна, т/сут	2968,2	3635	4338,9

ДП7	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 агломерата	0,48	0,63	0,8
Содержание O2 в дутье, %	23,3	25,86	29,8
Расход природного газа, м3/ч	13550	13895	22544,2
Содержание Si в чугуна, %	0,358	0,76	1,437
Температура горячего дутья, оС	1018,77	1120,00	1128,78
Влажность дутья, г/м3	0,51	3,50	22,13
ТТГ, оС	1706,4	2078,7	2106
УРК, кг/т	404,4	414,46	486,9
Производство чугуна, т/сут	2298	2726	3381,3

ДЦ	минимум	план	максимум
Истираемость кокса (M10), %		7,84	
Содержание Fe в шихте, %		58,33	
Доля агломерата		0,66	
Потребление природного газа, м3	98808152,8	103808153	107558153
Потребление кислорода, м3	61960940,48	89027519	96700000
Объем дутья, м3	1062997999	1100632594	1137939687
Производство чугуна, т		830465	
УРК, кг/т		412,5	

ДП2	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 агломерата	0,53	0,65	0,86
Содержание O2 в дутье, %	22,9	26,79	28,8
Расход природного газа, м3/ч	3405,4	18241	18800
Содержание Si в чугуна, %	0,48	0,72	1,893
Температура горячего дутья, оС	1124,7	1210,00	1218,1
Влажность дутья, г/м3	0,3	3,50	12,31
ТТГ, оС	1542,3	2111,4	2120
УРК, кг/т	389,8	407,92	428
Производство чугуна, т/сут	1972,4	3332,88	4250,9

ДП8	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 агломерата	0,5	0,75	0,87
Содержание O2 в дутье, %	22,6	26,60	27,2
Расход природного газа, м3/ч	9450	9649	14515,4
Содержание Si в чугуна, %	0,371	1,86	1,9
Температура горячего дутья, оС	950,03	1200,00	1212,1
Влажность дутья, г/м3	2,77	3,50	18,04
ТТГ, оС	1938,6	2369,3	2380
УРК, кг/т	404,2	452,6	495,6
Производство чугуна, т/сут	1798,4	2621	3159,6

ДП4	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 агломерата	0,52	0,65	0,85
Содержание O2 в дутье, %	23,9	26,17	27,2
Расход природного газа, м3/ч	18804,9	20317	21226,3
Содержание Si в чугуна, %	0,401	0,71	1,022
Температура горячего дутья, оС	1071,14	1160,00	1170,23
Влажность дутья, г/м3	0,46	3,50	22,25
ТТГ, оС	1804,5	2001,8	2137
УРК, кг/т	394	411,0	466,7
Производство чугуна, т/сут	2617,2	3378	3960,4

ДП9	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 агломерата	0,41	0,65	0,73
Содержание O2 в дутье, %	23,1	26,72	28,5
Расход природного газа, м3/ч	20049,4	23590	29983,3
Содержание Si в чугуна, %	0,407	0,71	1,394
Температура горячего дутья, оС	1007,25	1030,00	1038,36
Влажность дутья, г/м3	0,53	3,50	13,3
ТТГ, оС	1761,7	2008,0	2047,7
УРК, кг/т	402,5	405,0	442,6
Производство чугуна, т/сут	3754,4	4908	5671,6

ДП6	минимум	план	максимум
Истираемость кокса (M10), %	6,9	8,15	9,27
Дробимость кокса (M25), %	83,68	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, %	54,85	58,11	59,35
Доля агломерата	0,52	0,66	0,86
Содержание O2 в дутье, %	23,9	27,94	30,7
Расход природного газа, м3/ч	17942,5	20016	23501
Содержание Si в чугуна, %	0,342	0,71	1,06
Температура горячего дутья, оС	1106,15	1110,00	1189,41
Влажность дутья, г/м3	0,65	3,50	20,91
ТТГ, оС	1776,8	2105,8	2120
УРК, кг/т	382,8	410,81	472,6
Производство чугуна, т/сут	2573,8	3282	3864,4

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 агломерата	0,53	0,68	0,82
Содержание O2 в дутье, %	24,4	26,26	29,5
Расход природного газа, м3/ч	19990	20152	28423,3
Содержание Si в чугуна, %	0,411	0,73	1,127
Температура горячего дутья, оС	701,399	1150,00	1163,9
Влажность дутья, г/м3	0,23	3,50	12,85
ТТГ, оС	1889,5	2142,5	2148,8
УРК, кг/т	396,4	411,8	431,6
Производство чугуна, т/сут	3621,5	4868	5552,9

Рисунок 3.4 – Полученные оптимальные значения оптимизируемых параметров доменных печей для объема производства 830 тыс. т.

Далее было проведено сравнение полученных значений производительности, удельного расхода кокса с значениями этих показателей из проекта плана на основе формул оценки эффективности доменных печей и цеха, используемых в задаче оптимизации. На рисунке 3.5 приведено сравнение проектных и оптимальных значений производительности с максимально возможной по каждой доменной печи.

Сравнение проектных и оптимальных значений удельного расхода кокса с минимальным достигнутым за прошлые периоды представлено на рисунке 3.6.

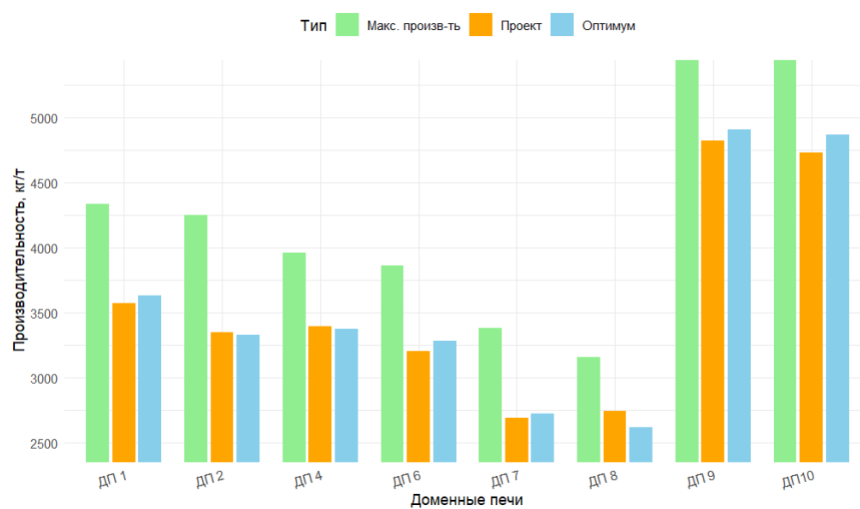


Рисунок 3.5 – Сравнение проектных и оптимальных производительностей доменных печей

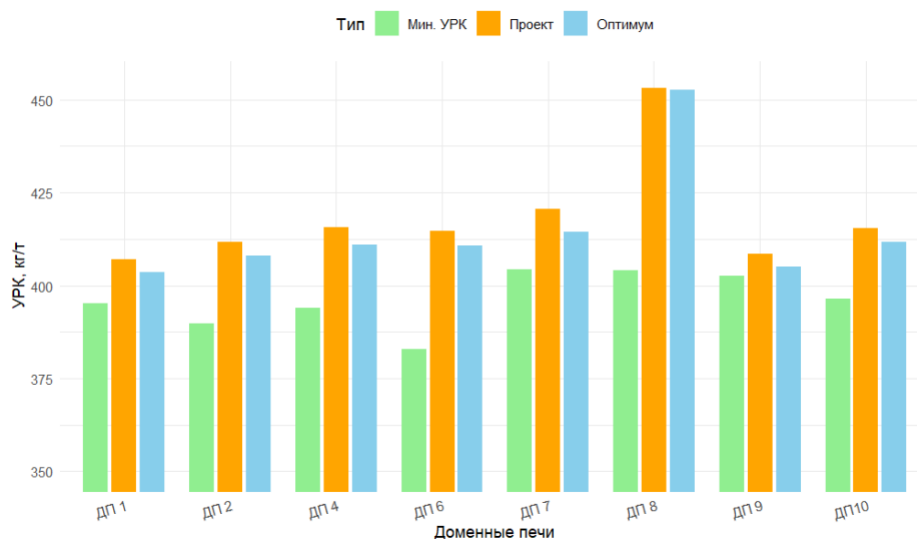


Рисунок 3.6 – Сравнение проектных и оптимальных удельных расходов кокса доменных печей

В результате подбора алгоритмом значений оптимизируемых параметров производительность на доменных печах № 2, 4, 8 была снижена, на доменных печах № 1, 6, 7 была увеличена. Также по всем доменным печам алгоритму удалось получить более низкий удельный расход кокса.

Данное перераспределение позволило повысить значение оценки эффективности практически для всех доменных печей (рисунок 3.7), тем самым повысив оценку технологической эффективности всего доменного цеха (таблица 3.10).

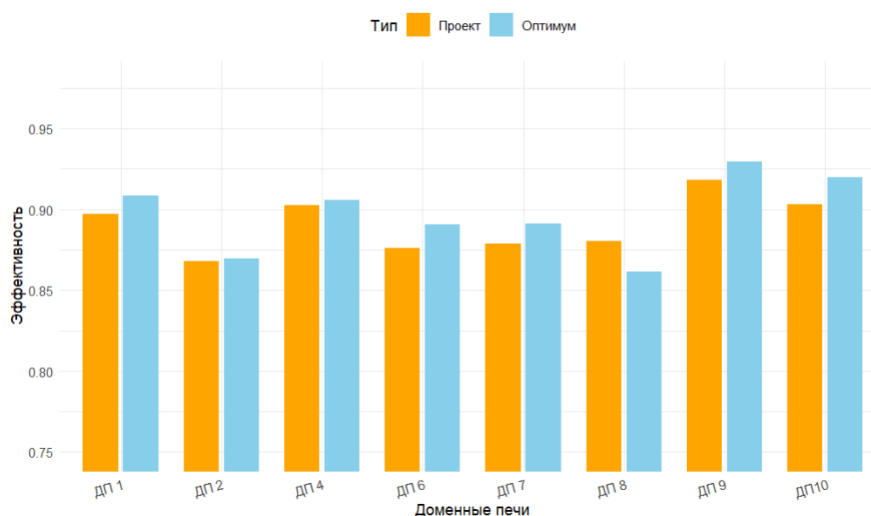


Рисунок 3.7 – Сравнение значений оценок эффективности доменных печей для проектных и оптимальных значений технологических параметров

Таблица 3.10 – Сравнение проектной и оптимальной оценок технологической эффективности по цеху

	Проект	Оптимум
Оценка технологической эффективности доменного цеха	0,893	0,901

Рассматриваемые полученные оптимальные значения технологических параметров для объема производства 830 тыс. т. были получены в рамках применения алгоритма определения зависимости обобщенного критерия для разных объемов производства. В таблице 3.11 представлены полученные значения обобщенного критерия q и его составляющих для элементов

сформированного вектора объемов производства. На рисунке 3.8 представлена полученная зависимость обобщенного критерия q от объема производства.

Таблица 3.11 – Значения обобщенного критерия q и его составляющих для разных объемов производства чугуна

Объем производства	Оценка эффективности доменного цеха	Нормированная себестоимость чугуна	Обобщенный критерий q
790465	0,881	0,560	0,252
800465	0,885	0,568	0,251
810465	0,889	0,576	0,250
820465	0,894	0,584	0,250
830465	0,901	0,595	0,248
840465	0,902	0,605	0,250



Рисунок 3.8 – 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.

3.4 Оперативное управление тепловым состоянием доменной печи

В реальных производственных условиях управление доменным процессом осуществляется в двухуровневой постановке. На верхнем уровне производится расчет оптимальных технико-экономических показателей и параметров доменного процесса исходя из решения общей задачи верхнего уровня управления доменным цехом. В результате на верхнем уровне управления задаются оптимальные значения технико-экономических параметров как производства в целом, так и требуемые для достижения указанных показателей значения параметров доменных печей на нижнем уровне. На нижнем уровне управления осуществляется оперативное управление доменным процессом. Задаче оперативного управления является достижение оптимальных параметров процесса, номенклатура которых включает в себя как параметры, задаваемые на верхнем уровне, так и конкретные параметров режимов, которые регулируются на нижнем уровне персоналом конкретных доменных печей.

Одними из важных параметров состояния доменного процесса, который контролируется на нижнем уровне оперативного управления для конкретных доменных печей, являются показатели теплового состояния доменной печи и другие параметры оперативного управления, которые включены в технологическую инструкцию по управлению доменной печью. Обе группы параметров связаны между собой при этом достижение параметров верхнего уровня существенно зависит от значений параметров нижнего уровня. Одним из таких параметров, определяющих тепловой режим печи, является содержание кремния в чугуна.

С точки зрения синергетики доменного процесса управление тепловым состоянием печи представляет собой удержание процесса в точке бифуркации теплового режима печи. При этом превышение значения температурного состояния печи выше равновесной точки бифуркации приводит к «перегреву» печи, при этом шихта верхней части шахты печи «размягчается»,

аэродинамическое сопротивление потоку доменных газов возрастает, при этом резко падает технологическая эффективность доменной печи, и тепловой режим теряет свою устойчивость и явление перегрева печи самопроизвольно возрастает.

При снижении теплового состояния печи ниже точки бифуркации происходит «переохлаждение» печи, при этом в нижней части шахты печи увеличивается вязкость расплавленного металла и возрастает аэродинамическое сопротивление печи доменным газом. Данный процесс также является неустойчивым и самоподдерживающимся, приводящий к неустойчивости работы доменной печи.

Исходя из сказанного одной из центральных задач оперативного управления является расчет оптимального уровня теплового состояния печи исходя из заданных на верхнем уровне значений технико-экономическим показателем. Данный расчет выполняется технологами на основе энергетического баланса печи для значений верхнего уровня. Расчетное значение показателей теплового состояния доменной печи передается в качестве уставки мастеру доменной печи, который на основе изменения подачи кокса, параметров дутья и других определяемых технологами мероприятий регулируют тепловое состояние печи. При этом в следствии невозможности оценить тепловое состояние доменной печи, на основе прямых измерений температуры, используется косвенный показатель – содержание кремния (y_{Si}) в чугуне.

Как следует из приведенного выше материала, одной из базовых стратегий оперативного управления тепловым состоянием доменного процесса является парирование отклонений косвенного показателя температурного состояния процесса (Δy_{Si}) путем корректирующих подач кокса (Δu_K) при стабилизации значений всех остальных режимных параметров.

В ходе работы над диссертацией в работе [20] была рассмотрена возможность применения модельно-упреждающего управления для оперативного управления тепловым состоянием доменной печи. В работе

отмечено, 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.

Данная структура управления вытекает из того факта, что оптимальное температурное состояние процесса, как было сказано выше, находится в зоне бифуркации его температурных режимов.

Использованная в работе [20] композиция рекуррентных соотношений для расчета целевых трендов объекта управления по каналу «подача кокса → содержание кремния» была преобразована в прогнозные соотношения вида:

$$\Delta y_{\text{УРК},c+1} = \frac{T_{\text{ин},c}}{T_{\text{ин},c} + \Delta t_{c+1}} \Delta y_{\text{УРК},c} + \frac{\Delta t_{c+1}}{T_{\text{ин},c} + \Delta t_{c+1}} F_{K,c} \left(\Delta u_{K,c+1} (t_{c+1} - \tau_{\text{тр},c}) \right), \quad c = 1, 2, \dots \quad (3.64a)$$

$$\Delta y_{Si,c+1} = g(\Delta y_{\text{УРК},c+1}), \quad (3.64b)$$

Рекуррентные соотношения оптимизации целевого процесса определяются по критерию

$$\min_{(\Delta u_{K,c+1})} (\Delta y_{Si,c+1} - \Delta y_{Si,c+1,p})^2. \quad (3.65)$$

Для решения оптимизационной задачи в работе используется градиентный метод поиска оптимальных решений при условии, что горизонт прогноза составляет один шаг цикла.

$$\Delta u_{K,c+1,s+1} = \Delta u_{K,c+1,s} - K_c (\Delta y_{Si,c+1,s} - \Delta y_{Si,c+1,p}) \frac{\delta y_{Si,c,s}}{\delta u_{K,c,s}}, \quad (3.66)$$

где s – итерационный шаг вычислительного процесса: $s = 0, 1, 2, \dots$

Начальное условие s процесса в данных обозначениях равно при $s = 0$:

$$\Delta y_{Si,c+1,s=0} = \Delta y_{Si,c}, \quad (3.67)$$

При этом траектория:

$$y_{Si,c,p} = y_{Si,n} + \Delta y_{Si,c,p}, \quad (3.68)$$

где $y_{Si,n}$ – номинальное значение y_{Si} ,

представляет собой расчетную траекторию порядка вывода температурного режима печи в целевую область. Подобная траектория задается технологами доменного процесса.

Величина коэффициента K_c выбирается из условий сходимости вычислительного процесса.

Структура вычислительного процесса (3.66) представлена на рисунке 3.9.

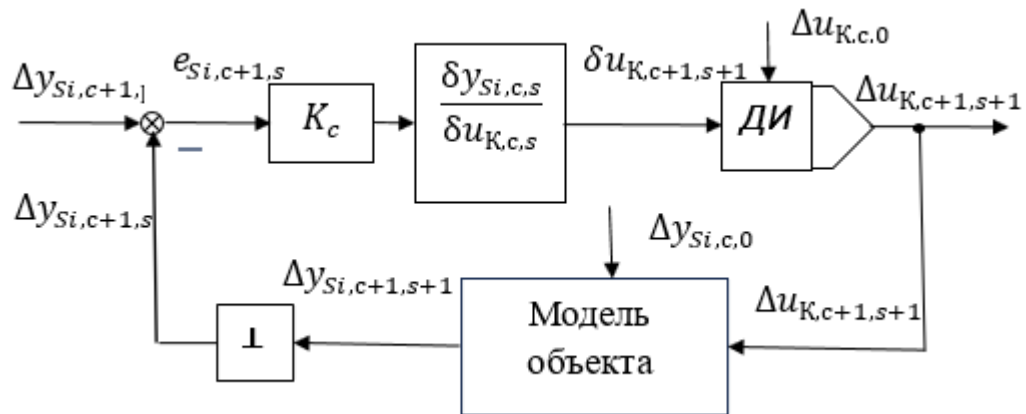


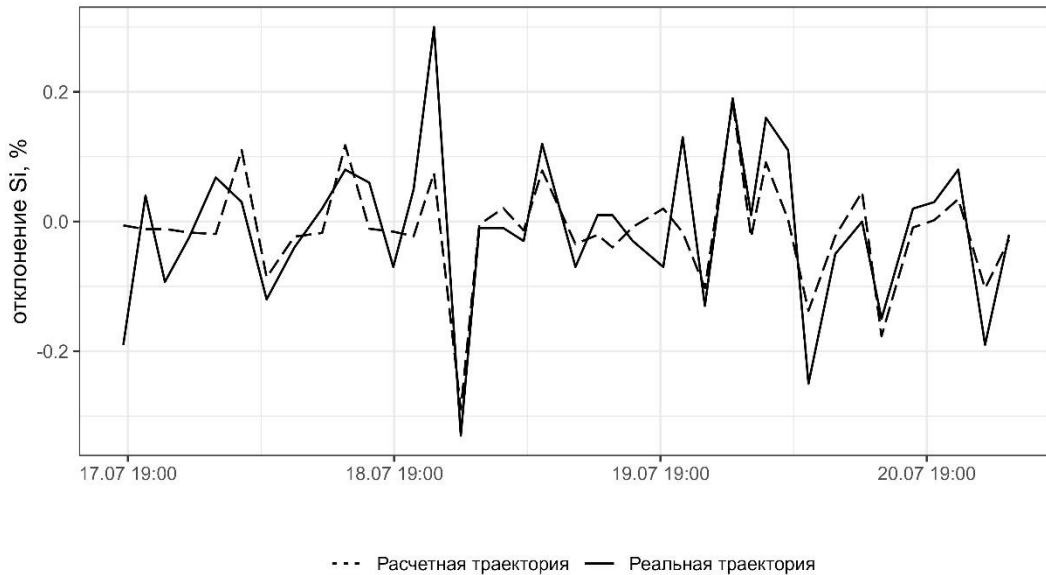
Рисунок – 3.9 Структура вычислительного процесса расчета $\Delta u_{K,c,s}$

Здесь: блок «Модель объекта» представляет собой рекуррентные соотношения расчета процессов в объекте управления (3.64); 1 – элемент задержки на один такт физического времени; s – индексная переменная тактов вычислений; c – индексная переменная тактов физического времени; $ДИ$ – дискретный интегратор (дигратор), суммирующий в цикле частные расчетные значения подач кокса $\delta u_{K,c,s}$; $\Delta u_{K,c,0}$ – начальное значение сумм дигратора; $\Delta u_{K,c,s}$ – текущее значение сумм дигратора.

Вычислительный процесс завершается, когда ошибка управления не превышает заданную точность:

$$|e_{Si,c,s}| \leq \varepsilon_{\text{доп}}. \quad (3.69)$$

В качестве численного примера далее на рисунке 3.10 представлены графики реальной и расчетной траекторий изменения содержания кремния в чугуне в зависимости от подачи кокса на интервалах решения задачи идентификации зависимостей (3.63).



ВЫВОДЫ К ГЛАВЕ 3

1. Результаты решения рассматриваемой в главе 3 задачи оптимизации дают информацию для поддержки принятия решений по минимизации себестоимости чугуна, а также для решения задачи оптимального распределения заданного объема производства между печами. Для решения указанных выше задач оптимизации в работе предложен алгоритм планирования и управления доменным производством на основе кластерных моделей и комитетного подхода к принятию решений в противоречивых условиях. В результате применения данного алгоритма на реальных данных удалось повысить значение оценки эффективности доменного цеха путем соответствующей рекомендуемой алгоритмом корректировки загрузки доменных печей относительно проекта плана, и снижения удельного расхода кокса по печам.

2. В работе предлагается алгоритм формирования зависимости обобщенного критерия для разных объемов производства, позволяющий рассмотреть несколько вариантов объемов производства. На основе предложенных вариантов сотрудники подразделений, участвующие в планировании, получают данные позволяющие принимать эффективные решения.

3. Предложенную в главе 3 схему решения задачи управления тепловым состоянием доменной печи рекомендуется применять в системах поддержки принятия решений при оперативном управлении доменными печами.

ГЛАВА 4. АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ ИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ДОМЕННЫМ ПРОИЗВОДСТВОМ

4.1 Общее описание АИС управления доменным производством

Предложенные во второй и третьей главах алгоритмы были использованы для создания системы поддержки принятия решений (СППР) для решения задач планирования и управления доменным производством и оперативного управления доменными печами.

На рисунке 4.1 представлена структура корпоративной информационной системы, включающей разработанную автоматизированную информационную систему управления доменным производством.

АИС управления доменным производством взаимодействует с подсистемами привоза и потребления угольного железорудного сырья, получая данные зависимостей стоимости скипового кокса и железорудного сырья (ЖРС) от истираемости кокса и доли агломерата соответственно. Подсистемы оптимизации привоза и потребления угольного сырья и ЖРС [2, 28] формируют варианты шихты путем определения доли поставщиков сырья с учетом технологических и экономических ограничений по критерию минимума затрат на закупку и транспортировку сырья.

АИС управления доменным производством также получает данные работы доменных печей из корпоративной системы хранения данных.

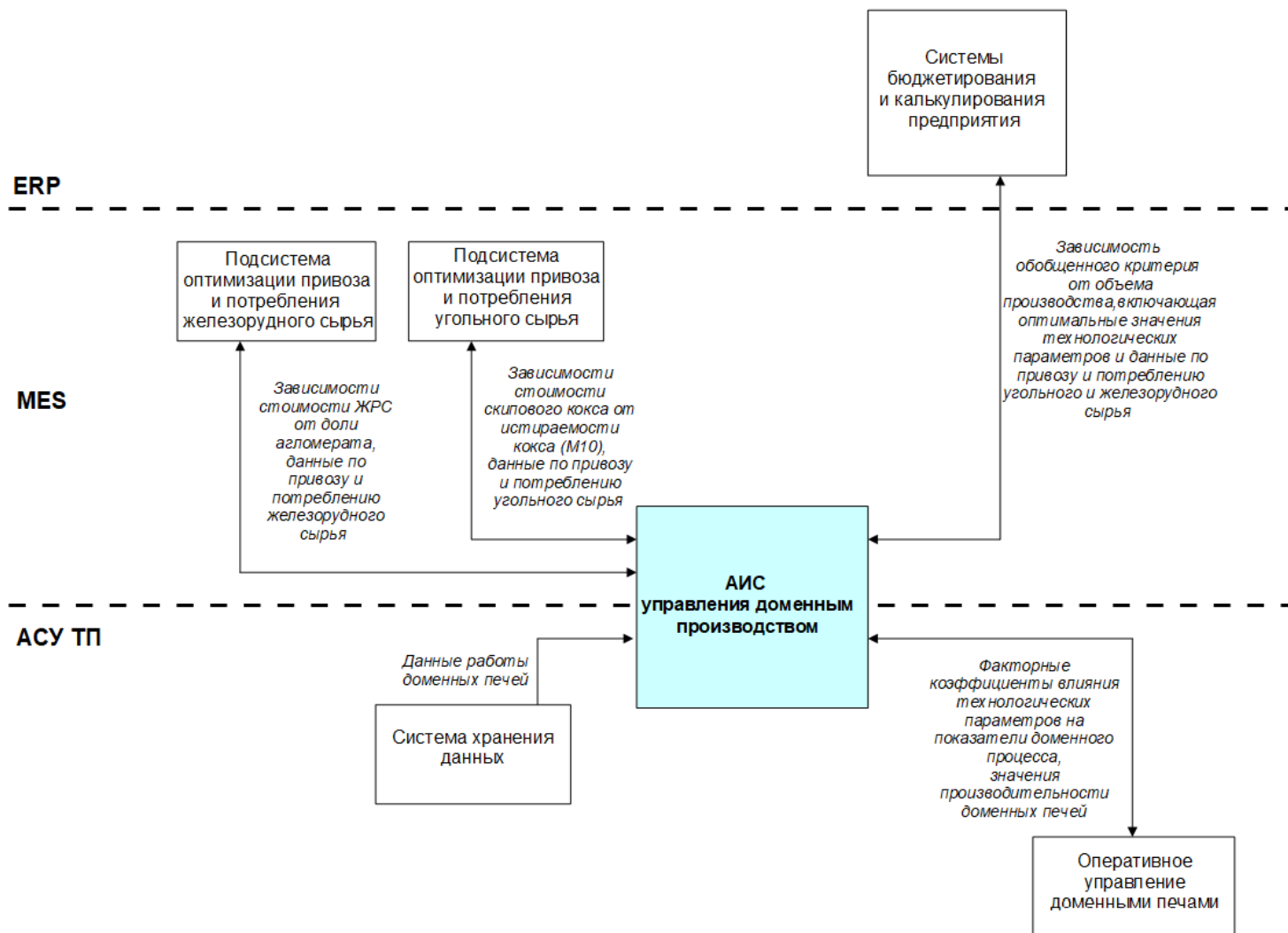


Рисунок 4.1 – Корпоративная информационная система, включающая АИС управления доменным производством

АИС управления доменным производством реализует следующие функции:

1. Построение зависимости обобщенного критерия для разных объемов производства, которая может использоваться в качестве исходных данных для принятия решений в системах бюджетирования и калькулирования, а также управления доменным производством.

2. Определение эффективной области значений параметров доменного процесса и поддержка принятия решений при оперативном управлении доменным процессом.

4.2 Описание программного обеспечения АИС управления доменным производством

АИС управления доменным производством включает в себя:

1) подсистему первичной обработки и хранения данных, обеспечивающая сбор, первичную обработку и хранение исходных и расчетных данных АИС управления доменным производством;

2) аналитическую подсистему, отвечающую за выполнение сложных математических расчетов, выполняемых АИС управления доменным производством;

3) подсистема визуализации, реализующая вывод обработанных данных эксплуатации ДП и расчетных данных, генерируемых АИС управления доменным производством в удобной для конечного пользователя графической форме в виде мнемосхем, графиков и таблиц с использованием различных инструментов динамизации изображений.

Основные функциональные подсистемы АИС управления доменным производством представлены на рисунке 4.2.

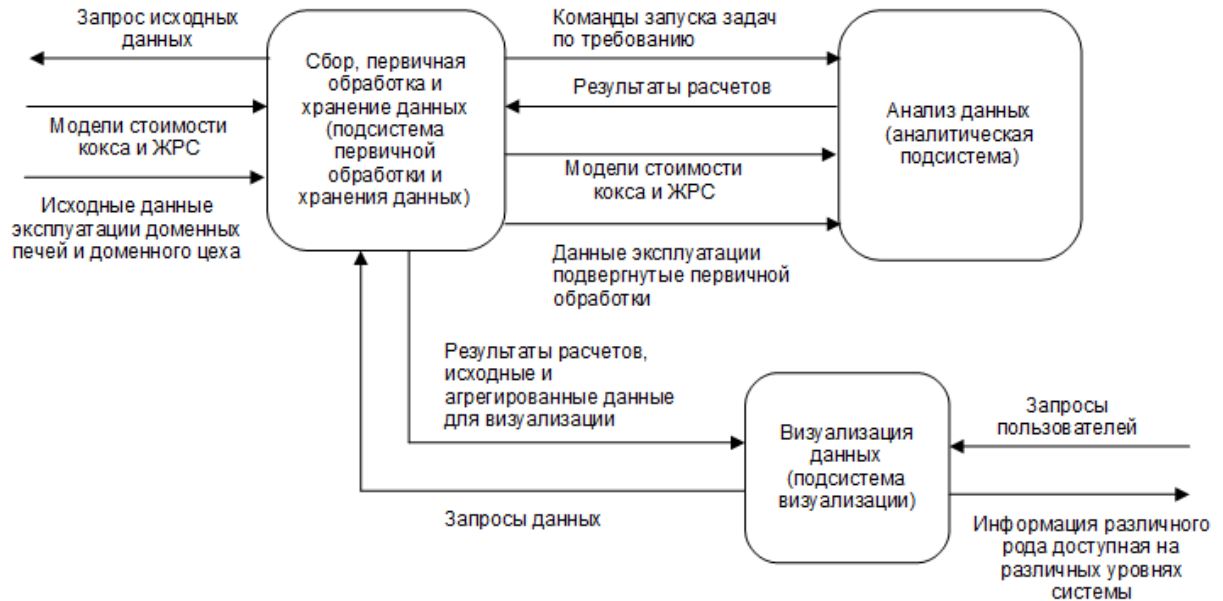


Рисунок 4.2 – Основные функциональные подсистемы
АИС управления доменным производством

Подсистема первичной обработки и хранения данных реализует функции двух модулей АИС управления доменным производством:

- 1) модуля интеграции, предназначенного для обмена данными с внешними системами;
- 2) модуля сбора, хранения и архивирования данных, используемого для сбора, первичной обработки и хранения данных. Модуль обрабатывает следующие входные данные: исходные данные из модуля интеграции; запросы на ввод и чтение данных из подсистемы визуализации; запросы на ввод и чтение данных из аналитической подсистемы.

В модуле интеграции используются программные интерфейсы (API) ядра ПТК «ПолиТЭР», реализованных на языке PostgreSQL. Благодаря этому обмен данными с внешними системами в новых проектах организован без создания дополнительных промежуточных структур данных и функций. Также в модуле интеграции используется свободно-настраиваемая схема БД. Такая схема позволяет обмениваться данными с внешними системами, в которых данные хранятся в виде специфичных структур или доступ

к данным реализуется с использованием встроенных специфичных процедур внешних систем.

Диаграмма потоков данных подсистемы первичной обработки и хранения данных представлена на рисунке 4.3.



Рисунок 4.3 – Подсистема первичной обработки и хранения данных
АИС управления доменным производством

Аналитическая подсистема АИС управления доменным производством отвечает за запуск и выполнение задач математической интеллектуальной обработки данных и оптимизации. Диаграмма потоков данных аналитической подсистемы представлена на рисунке 4.4.

Аналитическая подсистема реализует запуск подпрограмм модулей математического анализа и оптимизации. Подсистема, включающая в себя:

- модуль интеллектуального определения режимных кластеров значений параметров доменного процесса,
- модуль экспертных оценок,
- модуль месячного планирования.

Модуль интеллектуального определения режимных кластеров значений параметров доменного процесса включает подпрограммы, решающие следующие задачи: определение режимных кластеров значений технологических параметров и задач поддержки принятия решений при оперативном управлении.

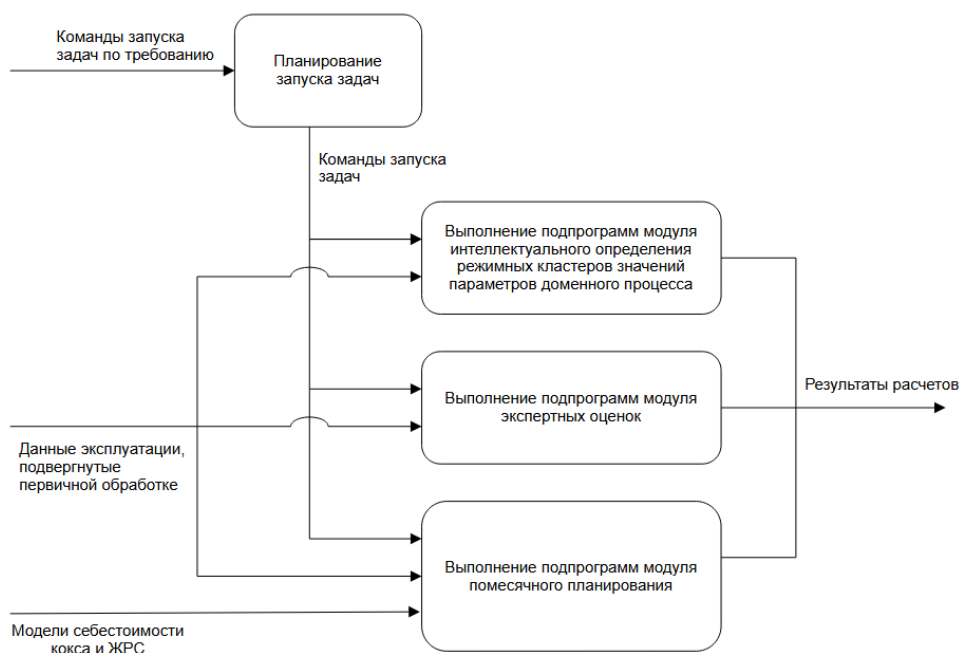


Рисунок 4.4 – Аналитическая подсистема АИС управления
доменным производством

Модуль экспертных оценок предназначен для введения технологических условий на доменный процесс, экспертных оценок, также в модуль входят подпрограммы, позволяющие анализировать статистику работы доменных печей и формировать значения базового периода. Выходная информация модуля (технологические условия, значения технологических параметров в базовом периоде) используются в качестве исходных данных в других модулях АИС управления доменным производством.

Модуль месячного планирования предназначен для решения задач поиска рекомендованных плановых значений технологических параметров для разных объемов производства. В модуль входят подпрограммы, реализующие предложенные в работе алгоритм планирования и управления доменным производством.

По запросу из модуля месячного планирования модуль интеллектуального определения режимных кластеров значений параметров доменного процесса и модуль экспертных оценок передают исходные данные для работы подпрограмм модуля месячного планирования. Схема потоков

данных между модулями аналитической подсистемы представлена на рисунке 4.5.

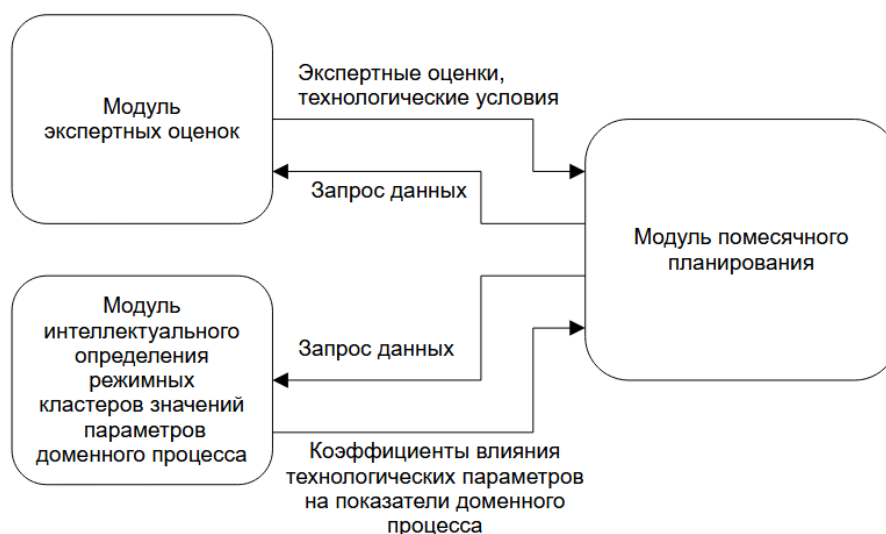


Рисунок 4.5 – Схема потоков данных между модулями аналитической системы

Подсистема визуализации АИС управления доменным производством предназначена для отображение генерируемых системой данных в формате, удобном для зрительного восприятия пользователем. Подсистема визуализации представлена модулем web-интерфейса. Модуль позволяет технологам, руководителям доменного цеха и специалистам отдела экономики работать и мастерам доменных печей с обработанными исходными и расчетными данными.

Модуль web-интерфейса состоит из двух частей (рисунок 4.6):

а) Клиентской части (web-клиент) web-интерфейса, отвечающей за визуализацию требуемых данных, передачу команд и данных, введенных пользователями системы, серверной части web-интерфейса, прием данных для визуализации от серверной части web-интерфейса.

б) Серверной части (web-сервер) web-интерфейса, реализующей прием команд и данных от клиентской части web-интерфейса и формирование запросов к подсистеме первичной обработки и хранения данных на получение

исходных и расчетных данных системы для последующей аналитической обработки, передачу данных, прошедших аналитическую обработку, для визуализации в клиентскую часть web-интерфейса.

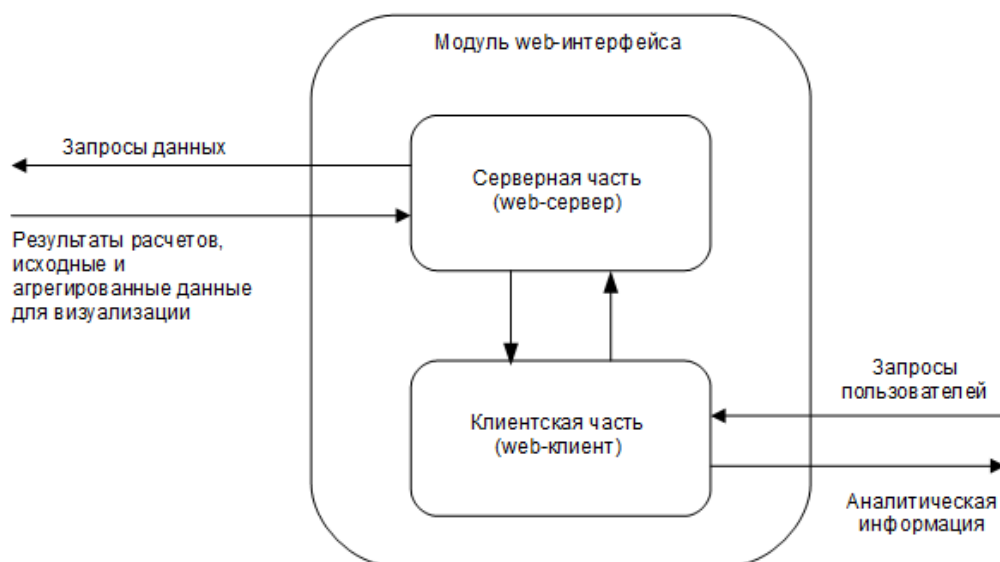


Рисунок 4.6 –Подсистема визуализации
АИС управления доменным производством

Предложенные в работе алгоритмы реализованы в программном обеспечении АИС У ДП с использованием среды программирования математических расчетов RStudio. Скрипты алгоритмов в аналитических модулях системы выполнены на языке программирования R, имеющем открытый исходный код и предназначенного для статистической обработки данных.

Использование указанных среды и языка программирования позволяет решать различного рода задачи, в которых требуется проводить интеллектуальный анализ данных для идентификации закономерностей между параметрами технологического процесса, оптимизировать их значения для улучшения показателей эффективности процесса и других целей. Кроме того, RStudio в связке с языком программирования R часто применяются при прогнозировании и управлении различными

технологическими процессами и производствами. Также в RStudio есть возможность подключать дополнительные пакеты для применения в разрабатываемых алгоритмах современных вычислительных методов. При разработки аналитических модулей использовались следующие пакеты `nloptr`, `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.

4.3 АИС управления доменным производством: уровень планирования и управления доменным производством

Данный раздел содержит видеокadres пользовательского web-интерфейса АИС управления доменным производством.

Видеокадры модуля интеллектуального определения режимных кластеров значений параметров доменного процесса (рисунок 4.7-4.11) позволяют оценить влияние технологических параметров на показатели доменного процесса как в графическом, так и аналитическом виде.

Видеокадры, содержащие графическое представление зависимостей изменения производительности чугуна и удельного расхода кокса от технологических параметров в плановом режимном кластере, представлены на рисунках 4.7, 4.8.

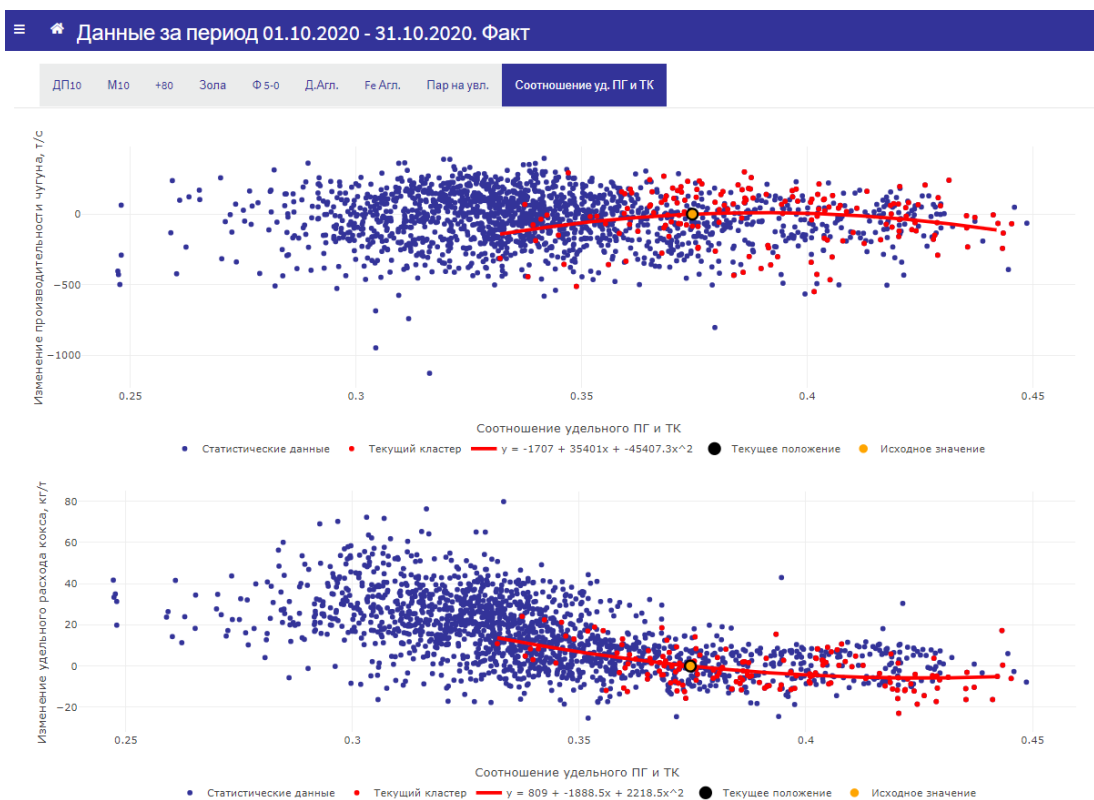


Рисунок 4.7 – Видеокадр зависимости производительность и УРК от соотношения $V_{\text{ПГ}}/V_{\text{ТК}}$ в выбранном плановом режимном кластере

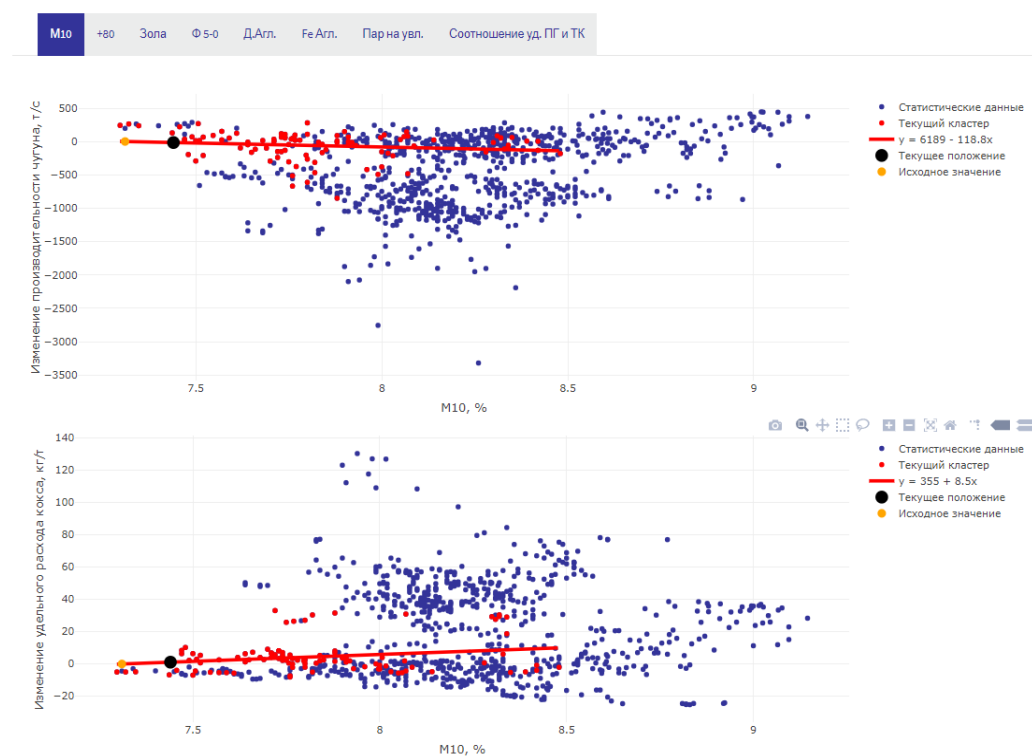


Рисунок 4.8 – Видеокадр зависимости производительность и УРК от истираемости кокса (M10) в выбранном плановом режимном кластере

Также к модулю интеллектуального определения режимных кластеров значений параметров доменного процесса относится видеокادر оценки значений коэффициентов влияния технологических параметров на показатели доменной плавки в выбранном плановом режимном кластере (рисунок 4.9).

	Наименование фактора	Прогноз для ДП1		Прогноз для ДП		Прогноз для ДП		Прогноз для ДП		Прогноз для ДП		Прогноз для ДП		Прогноз для ДП		Прогноз для ДП	
		изм. расхода кокса	изм. произв-ти	изм. расхода кокса	изм. произв-ти	изм. расхода кокса	изм. произв-ти	изм. расхода кокса	изм. произв-ти	изм. расхода кокса	изм. произв-ти	изм. расхода кокса	изм. произв-ти	изм. расхода кокса	изм. произв-ти	изм. расхода кокса	изм. произв-ти
1	Истираемость кокса по M10, %	2.8	-2.43	2.88	-2.67	2.8	-2.52	2.88	-2.59	2.8	-2.67	3.01	-2.53	3.01	-2.4	3.12	-2.46
2	Прочность кокса по M25, %	-0.51	0.66	-0.6	0.6	-0.51	0.6	-0.52	0.6	-0.52	0.66	-0.52	0.64	-0.51	0.68	-0.57	0.61
3	Зола в коксе, %	1.69	-1.31	1.5	-1.5	1.5	-1.46	1.59	-1.37	1.5	-1.5	1.53	-1.4	1.68	-1.41	1.5	-1.5
4	Сера в коксе, %	3.1	-3	3	-3	3	-3	3	-3	3	-3	3	-3	3	-3	3	-3
5	Доля агломерата, д.е.	1.12	-1.66	1	-1.7	1.07	-1.44	1.14	-1.49	1.1	-1.7	1.06	-1.5	1.1	-1.5	1	-1.7
6	Содержание Fe в офлюс. шихте, %	-0.9	1.94	-0.88	1.7	-0.89	1.7	-0.85	1.89	-0.92	1.93	-0.89	1.91	-0.88	1.95	-0.85	1.7
7	Содержание Si в чугуна, %	0.82	-0.72	0.8	-0.8	0.86	-0.8	0.89	-0.76	0.89	-0.74	0.89	-0.79	0.88	-0.69	0.82	-0.74
8	Содержание O ₂ , %	0.34	2.42	0.34	2.14	0.3	2.4	0.32	2.34	0.3	2.24	0.34	2.24	0.34	2.33	0.32	2.26
9	Удельный расход природного газа, м3/т	-0.6	0	-0.6	0	-0.65	0	-0.62	0	-0.6	0	-0.6	0	-0.6	0	-0.64	0
10	Температура горячего дутья, °C	-0.19	0.22	-0.2	0.23	-0.22	0.24	-0.22	0.22	-0.21	0.22	-0.22	0.22	-0.2	0.22	-0.22	0.22
11	Сезонная влажность, г/м3	0.16	-0.06	0.16	-0.07	0.16	-0.06	0.17	-0.07	0.17	-0.07	0.16	-0.06	0.17	-0.06	0.15	-0.07

Рисунок 4.9 – Видеокادر оценки значений коэффициентов влияния параметров доменного процесса на производительность и УРК доменных печей

Видеокадры модуля экспертных оценок, представленные на рисунках 4.10-4.12, позволяют вводить значения технологических условий на доменный процесс и формировать значения работы доменных печей и цеха в базовом периоде.

Видеокадры модуля месячного планирования представлены на рисунках 4.13-4.14. На рисунке 4.13 представлен видеокادر для просмотра зависимостей стоимости скипового кокса и ЖРС в зависимости от значений параметров качества кокса и ЖРС.

Для просмотра результатов формирования зависимости обобщенного критерия q от объема производства и рекомендуемых плановые значения технологических параметров доменного процесса для одной точки зависимости используется видеокادر, представленный на рисунке 4.14.

Расчет зав-тей

«Исходные данные»

Плановые данные

Зависимости

Ремонты

Доменный цех

Доменные печи

Базовые данные

Технологические ограничения

Учет факторов влияния

Запустить расчет

«Результаты»

Статус решений

Пофакторный анализ

Технико-экономические расчеты

планируемый период

202212

Обновить данные

Данные обновлены!

Технологические ограничения по доменным печам

		Доменная печь №1		Доменная печь №2		Доменная печь №4		Доменная печь №6		Доменная печь №7		Доменная печь №8		Доменная печь №9		Доменная печь №10	
	Наименование	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
1	Содержание Si в чугуне, %	0.35	0.84	0.5	0.83	0.4	0.83	0.41	0.83	0.36	0.83	0.5	0.9	0.41	0.81	0.48	0.83
2	Расход кислорода, м3/ч	16048.2	39470.2	13978.28	36219.96	16235.43	33030.89	20992.77	36743.23	9977.5	26596.12	5004.8	18217.65	21003.16	33007.59	18317.9	30936.88
3	Расход природного газа, м3	18253.9	27663.7	15924.9	25458.7	17762.5	24303.7	16518.6	22503.1	16920.1	23204.2	10025.3	15000.7	21725	30478.5	14988.9	24021.8
4	Расход дутья, м3/ч	130525.6	163789	141607.1	174258.7	145152.2	176134.8	137225.9	163520.3	137629.3	159277.4	160755.5	187904.3	207529.8	232917	188645	249296.2
5	Содержание O2, %	26.3	32.5	26.2	30.2	26.7	31.7	26.9	33.6	26.2	30.9	23	26.8	26.5	29.5	24.9	29.2
6	Удельный расход природного газа, м3/т	118.2	181.3	107	169.6	112.7	171.1	121.5	171.4	120.5	168.1	84.1	137.3	110.4	136.8	79.4	115
7	Содержание Fe в шихте ДЦ, %	54.88	58.71	54.73	58.29	55.39	59.44	55.27	58.49	55	59.53	55.45	58.51	55.99	60.13	56.59	59.68
8	Истираемость кокса по M10, %	7.18	8.63	7.07	9.13	7.07	9.22	7.07	9.22	6.13	8.7	6.29	9.11	6.76	10.32	7.93	10.78
9	Прочность кокса по M25, %	87.95	90.52	83.36	88.39	83.36	88.39	83.68	88.39	85.15	90.03	84.99	90.39	83.95	88.77	84.3	88.43
10	Сера в коксе, %	0.38	0.51	0.39	0.5	0.41	0.51	0.41	0.51	0.4	0.51	0.41	0.51	0.4	0.52	0.41	0.52
11	Выход колошникового газа, м3/ч	210095.8	271468.8	213996.1	294510.1	222501	276175.5	156669.8	194859	168714.5	272966.6	201680.9	244736.9	289089.4	379583	241264.4	335008.6
12	Доля агломерата, д.е.	49.6	85.1	54.3	85.7	55	84.1	52.7	84.8	47.9	100	51.4	85.8	44.4	68.6	54.3	81.5
13	Зола в коксе, %	11.17	12.23	11.25	12.17	11.28	12.17	11.2	12.3	11.05	12.03	11.1	12.04	11.22	12.1	6.77	12
14	УРК, кг/т	398.9	454.3	401.4	428	394	442	398.1	436.3	407.9	463.3	408.6	479.9	405.8	425.8	397.9	421.5

Сохранить изменения

Рисунок 4.10 – Видеокадр «Технологические условия»

Расчет зав-тей

«Исходные данные»

Плановые данные

Зависимости

Ремонты

Доменный цех

Базовые данные

Технологические ограничения

Учет факторов влияния

Доменные печи

Запустить расчет

«Результаты»

Статус решений

Пофакторный анализ

Технико-экономические расчеты

начало базового периода

2022-10-01

окончание базового периода

2022-10-30

планируемый период

202212

Обновить данные

Базовый период выбран! Данные выбраны с 2021-01-01 по 2021-01-31

Базовые данные

	Наименование	Доменный цех
1	Производительность, т/сут	29035.41
2	УРК, кг/т	419.38
3	Истираемость кокса по М10, %	7.78
4	Прочность кокса по М25, %	86.85
5	Зола в коксе, %	11.57
6	Сера в коксе, %	0.49
7	Кокс +80, %	15
8	Доля агломерата, %	66.21
9	Содержание Fe в шихте ДЦ, %	58.04
10	Содержание фракции 0-5 мм в агломерате, %	7.58
11	Содержание Si в чугуна, %	0.76
12	Содержание O2, %	27.57
13	Удельный расход природного газа, м3/т	132.25
14	Расход дутья, м3/ч	1386430.79
15	Температура горячего дутья, °C	1119.72
16	Теоретическая температура горения, °C	1976.29

Сохранить изменения

Рисунок 4.11 – Видеокадр значений базового периода в разрезе доменного цеха

Расчет зав-тей

«Исходные данные»

Плановые данные

Зависимости

Ремонты

Доменный цех

Доменные печи

Базовые данные

Технологические ограничения

Учет факторов влияния

Запустить расчет

«Результаты»

Статус решений

Пофакторный анализ

Технико-экономические расчеты

начало базового периода

2022-10-01

окончание базового периода

2022-10-30

планируемый период

202212

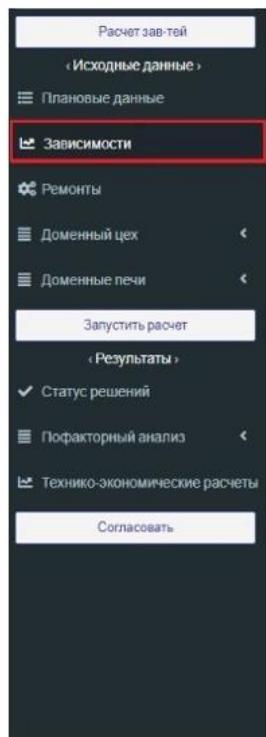
Обновить данные

Базовый период выбран! Данные выбраны с 2021-01-01 по 2021-01-31

	Наименование	Доменная печь №1	Доменная печь №2	Доменная печь №4	Доменная печь №6	Доменная печь №7	Доменная печь №8	Доменная печь №9	Доменная печь №10
1	Производительность, т/сут	3857.54	3787.79	3341.77	3300.78	2805.15	2820.85	4331.99	4844.85
2	УРК, кг/т	411.5	416.62	420.27	421.3	424.76	422.54	419.41	421.09
3	Истираемость кокса по M10, %	7.45	8.31	8.31	8.31	6.93	6.93	6.93	8.68
4	Прочность кокса по M25, %	89.63	84.61	84.61	84.61	88.46	88.46	88.46	86.16
5	Зола в коксе, %	11.56	11.57	11.57	11.57	11.51	11.51	11.51	11.7
6	Сера в коксе, %	0.47	0.49	0.49	0.49	0.48	0.48	0.48	0.49
7	Кокс +80, %	13.53	10.94	11.62	11.62	10.32	10.72	12.17	31.73
8	Доля агломерата, д.е.	63.69	65.56	65.67	62.7	68.36	65.07	70.37	66.83
9	Содержание Fe в шихте ДЦ, %	58.19	57.51	58.67	58.05	57.85	58.33	57.72	58.12
10	Содержание фракции 0-5 мм в агломерате, %	6.19	8.69	6.39	8.69	7.8	8.32	8.44	6.61
11	Содержание Si в чугуне, %	0.6	0.72	0.77	0.72	0.78	0.92	0.73	0.78
12	Содержание O2, %	27.33	28.09	27.56	27.56	27.68	27.31	26.25	28.64
13	Удельный расход природного газа, м3/т	120.79	132.12	137.89	145.62	139.85	127.75	133.53	126.2
14	Расход дутья, м3/ч	155035.79	155345.98	158269.16	160179.19	147475.73	153028.06	219286.64	239449.39
15	Температура горячего дутья, °C	1231.09	1138.14	1150.33	1125.54	1055.04	1132.29	1097.5	1043.78
16	Теоретическая температура горения, °C	2091.46	1761.74	1932.14	1963.12	1915.23	2145.69	1973.13	2025.98

Сохранить изменения

Рисунок 4.12 – Видеокадр значений базового периода
в разрезе доменных печей



Расчет был выполнен: 2022-11-11 13:48:50

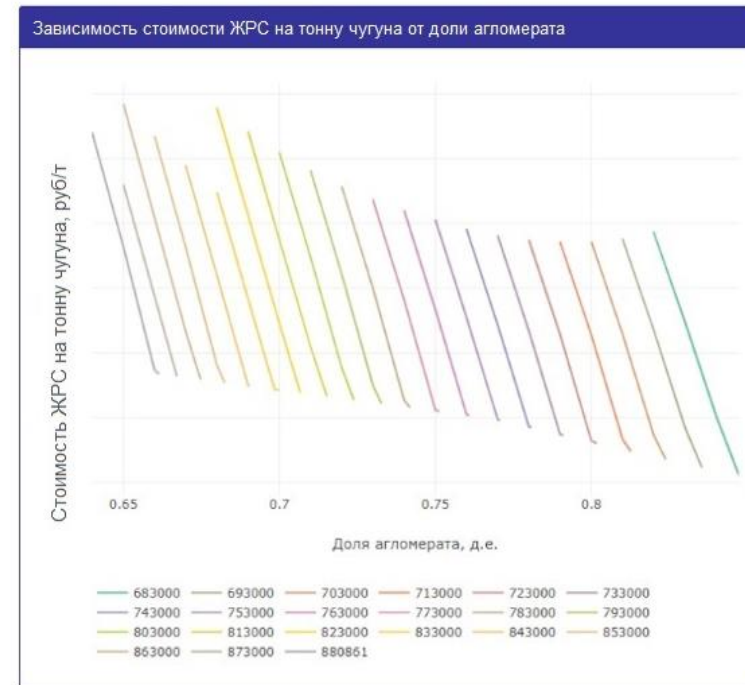
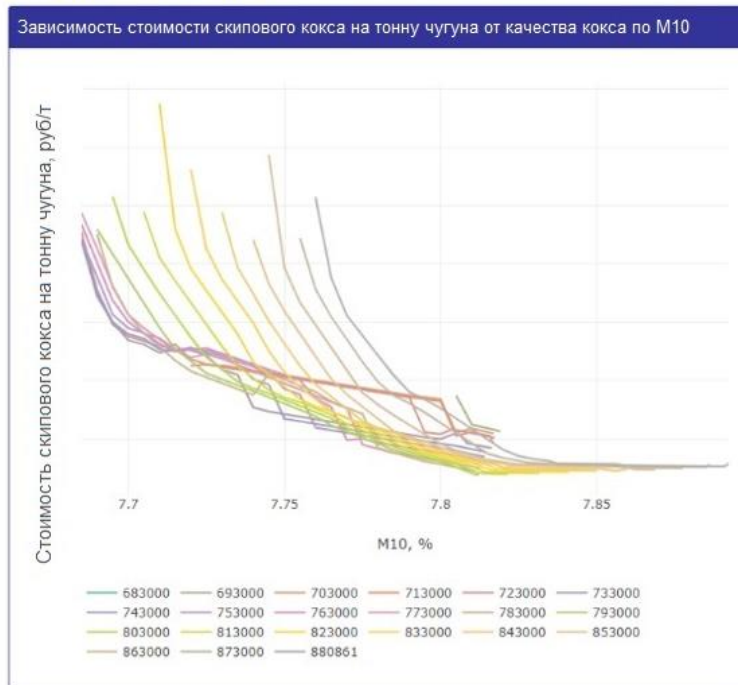


Рисунок 4.13 – Видеокадр «Зависимости стоимости скипового кокса и ЖРС от истираемости кокса (M10) и доли агломерата»

ДП1	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 агломерата	0,48	0,64	0,85
Содержание O2 в дутье, %	24,1	27,97	31,6
Расход природного газа, м3/ч	18333,4	22922	26352,1
Содержание Si в чууне, %	0,349	0,63	1,155
Температура горячего дутья, оС	1237,95	1250,00	1253,13
Влажность дутья, г/м3	0,68	3,50	22,82
ТТГ, оС	1826,4	2066,8	2078
УРК, ккал/т	395,2	403,5	454,3
Производство чууна, т/сут	2968,2	3635	4338,9

ДП7	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 агломерата	0,48	0,63	0,8
Содержание O2 в дутье, %	23,3	25,86	29,8
Расход природного газа, м3/ч	13550	13895	22544,2
Содержание Si в чууне, %	0,358	0,76	1,437
Температура горячего дутья, оС	1016,77	1120,00	1128,78
Влажность дутья, г/м3	0,51	3,50	22,13
ТТГ, оС	1706,4	2078,7	2106
УРК, ккал/т	404,4	414,46	486,9
Производство чууна, т/сут	2298	2726	3381,3

ДЦ	минимум	план	максимум
Истираемость кокса (M10), %		7,84	
Содержание Fe в шихте, %		58,33	
Доля агломерата		0,66	
Потребление природного газа, м3	98808152,8	103808153	107558153
Потребление кислорода, м3	61960940,48	89027519	96700000
Объем дутья, м3	1062997999	1100632594	1137939687
Производство чууна, т		830465	
УРК, ккал/т		412,5	

Объем производства, т	сумма(E_i) (нормированная)	Себестоимость (нормированная)	Обобщенный критерий q
790465	0,881	0,560	0,252
800465	0,885	0,568	0,251
810465	0,889	0,576	0,250
820465	0,894	0,584	0,250
830465	0,901	0,595	0,248
840465	0,902	0,605	0,250

ДП2	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 агломерата	0,53	0,65	0,86
Содержание O2 в дутье, %	22,9	26,79	28,8
Расход природного газа, м3/ч	3405,4	18241	18800
Содержание Si в чууне, %	0,48	0,72	1,893
Температура горячего дутья, оС	1124,7	1210,00	1218,1
Влажность дутья, г/м3	0,3	3,50	12,31
ТТГ, оС	1542,3	2111,4	2120
УРК, ккал/т	389,8	407,92	426
Производство чууна, т/сут	1972,4	3332,88	4250,9

ДП8	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 агломерата	0,5	0,75	0,87
Содержание O2 в дутье, %	22,6	26,60	27,2
Расход природного газа, м3/ч	9450	9649	14515,4
Содержание Si в чууне, %	0,371	1,86	1,9
Температура горячего дутья, оС	950,03	1200,00	1212,1
Влажность дутья, г/м3	2,77	3,50	18,04
ТТГ, оС	1938,6	2369,3	2380
УРК, ккал/т	404,2	452,6	495,6
Производство чууна, т/сут	1798,4	2621	3159,6

ДП4	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 агломерата	0,52	0,65	0,85
Содержание O2 в дутье, %	23,9	26,17	27,2
Расход природного газа, м3/ч	18804,9	20317	21226,3
Содержание Si в чууне, %	0,401	0,71	1,022
Температура горячего дутья, оС	1071,14	1160,00	1170,23
Влажность дутья, г/м3	0,46	3,50	22,25
ТТГ, оС	1804,5	2001,8	2137
УРК, ккал/т	394	411,0	466,7
Производство чууна, т/сут	2617,2	3378	3960,4

ДП6	минимум	план	максимум
Истираемость кокса (M10), %	6,9	8,15	9,27
Дробимость кокса (M25), %	83,68	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, %	54,85	58,11	59,35
Доля агломерата	0,52	0,66	0,86
Содержание O2 в дутье, %	23,9	27,94	30,7
Расход природного газа, м3/ч	17942,5	20016	23501
Содержание Si в чууне, %	0,342	0,71	1,08
Температура горячего дутья, оС	1106,15	1110,00	1189,41
Влажность дутья, г/м3	0,65	3,50	20,91
ТТГ, оС	1776,8	2105,8	2120
УРК, ккал/т	382,8	410,81	472,6
Производство чууна, т/сут	2573,8	3282	3864,4

ДП9	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 агломерата	0,41	0,65	0,73
Содержание O2 в дутье, %	23,1	26,72	28,5
Расход природного газа, м3/ч	20049,4	23590	29983,3
Содержание Si в чууне, %	0,407	0,71	1,394
Температура горячего дутья, оС	1007,25	1030,00	1038,36
Влажность дутья, г/м3	0,53	3,50	13,3
ТТГ, оС	1761,7	2008,0	2047,7
УРК, ккал/т	402,5	405,0	442,6
Производство чууна, т/сут	3754,4	4908	5671,6

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 агломерата	0,53	0,68	0,82
Содержание O2 в дутье, %	24,4	26,26	29,5
Расход природного газа, м3/ч	19990	20152	28423,3
Содержание Si в чууне, %	0,411	0,73	1,127
Температура горячего дутья, оС	701,399	1150,00	1163,9
Влажность дутья, г/м3	0,23	3,50	12,85
ТТГ, оС	1889,5	2142,5	2148,6
УРК, ккал/т	396,4	411,8	431,6
Производство чууна, т/сут	3621,5	4868	5552,9



Рисунок 4.14 – Видеокادر результатов формирования зависимости обобщенного критерия q от объема производства и рекомендуемых плановых значений технологических параметров доменного процесса для одной точки зависимости

4.4 АИС управления доменным производством: уровень оперативного управления доменными печами

Оперативное управление доменными печами происходит на более коротких промежутках времени: неделя, сутки, смена. В основном на металлургических предприятиях управление доменными печами осуществляется специалистами доменного цеха и мастерами доменных печей по технологической инструкции.

АИС управления доменным производством включает в себя подпрограммы, реализующие функции системы поддержки принятия решений при оперативном управлении доменным процессом. Данные подпрограммы предназначены для прогнозирования значения показателей доменного процесса на основе значений технологических параметров. Прогнозирование осуществляется с помощью факторных моделей, а также с помощью методов машинного обучения. Прогнозирование производства чугуна по доменной печи описано в работе [5], выполненной в рамках работы над диссертационным исследованием. Данная работа содержит сравнение методов машинного обучения для прогнозирования производства чугуна. Наилучший результат показал градиентный бустинг, именно он был применен при создании подпрограмм.

На рисунке 4.15 представлена схема автоматизированного управления доменным процессом с применением подпрограмм АИС управления доменным производством.

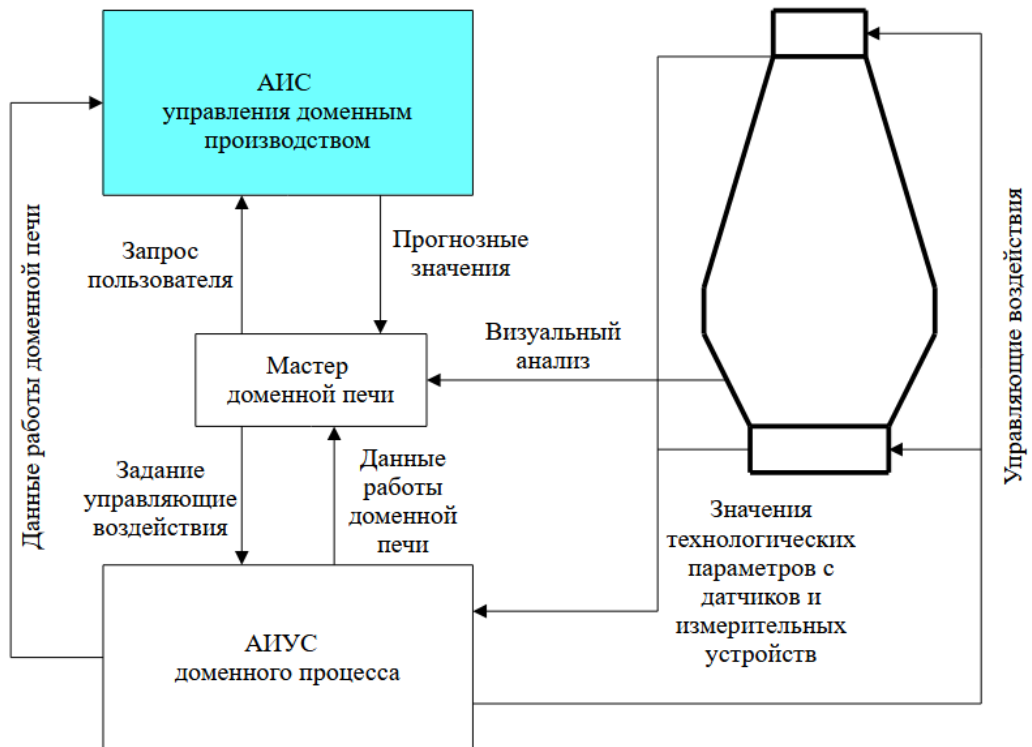


Рисунок 4.15 – Схема автоматизированного управления доменным процессом

Пример видеокладов, с помощью которых пользователь может получить прогнозное значение производительности и УРК с помощью факторных моделей. Видеоклад, позволяющий установить вручную значение технологического параметра, и видеоклад для оценки изменение производительности и УРК в зависимости от установленного значения представлены на рисунках 4.16 и 4.17.

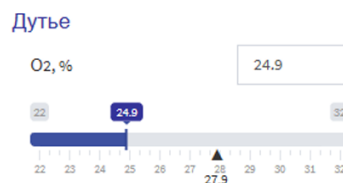
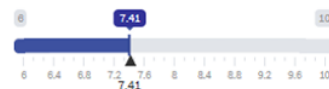


Рисунок 4.16 – Видеоклад ручной установки значений содержания кислорода в дутье

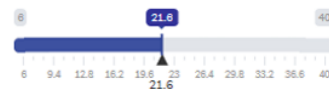
ДП6 ДП9 ДП10 Проч ДЦ

Качество кокса

М10, % 7.41



Кокс +80, % 21.6



Зола в коксе, % 0



Анализ влияния факторов

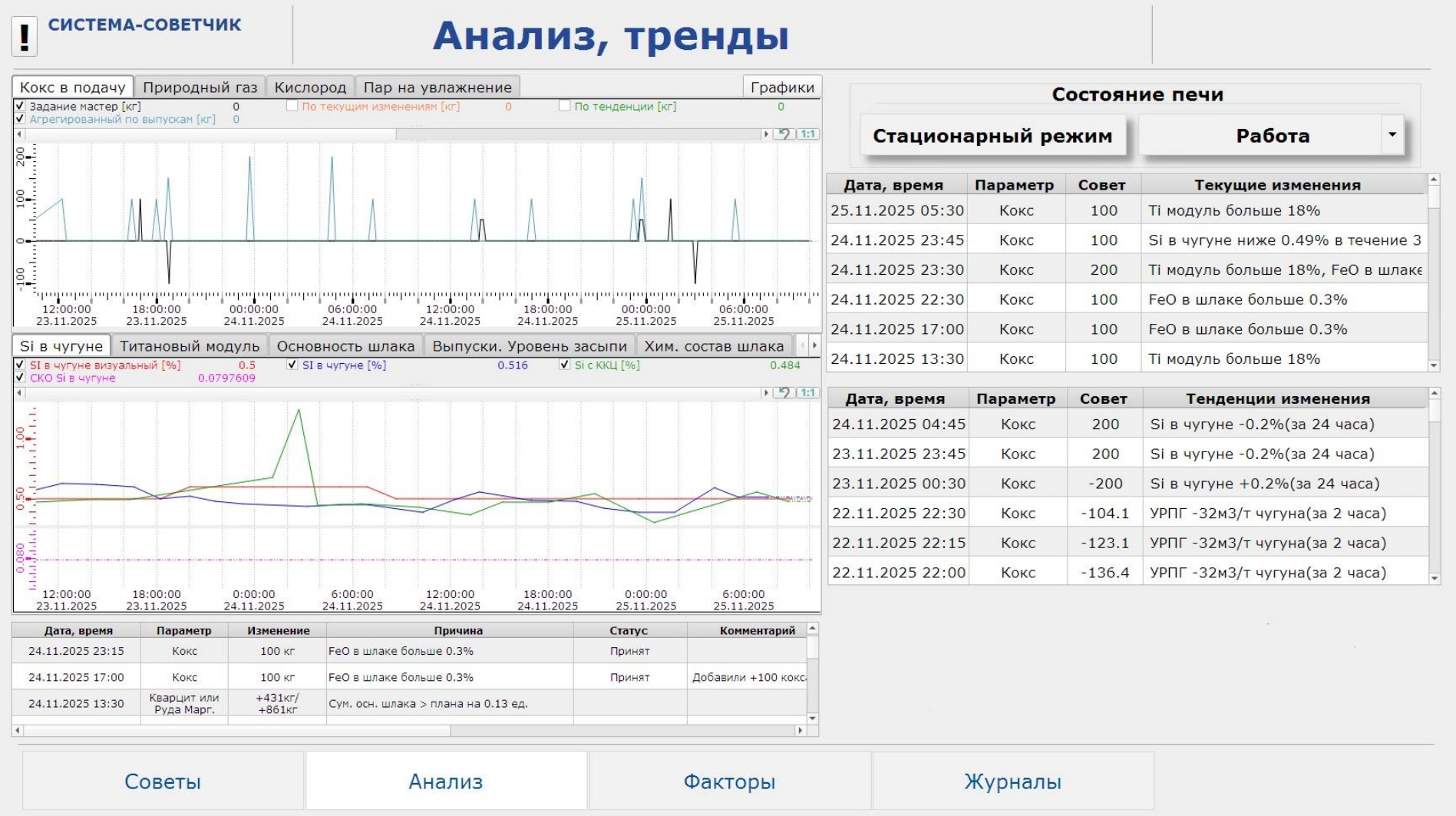
Факторы	ДП6	ДП9	ДП10	Проч	ДЦ
1 Прочность на истирание (М10), %	7.91	7.41	8.03	7.76	7.71
2 Изменение прочности на истирание (М10), %	0	0	0		0
3 Кокс +80, %	11.3	21.6	33.1	16.6	18.6
4 Зола в коксе, %	0	0	0	0	0
5 Доля агломерата в ЖРС, д.е.	0.6	0.61	0.69	0.58	0.6
6 Изменение доли агломерата в ЖРС, д.е.	0	0	0		0
7 Фракция 5-0, %	0	0	0	0	0
8 Fe агло., %	55.1	55.2	55.2	55.1	55.1
9 Содержание кислорода в дутье, %	27.4	24.9	28.4	26.2	26.5
10 Пар на увлажнение, г/м3	0	0	0	0	0
11 Расход природного газа, м3/ч	16348	25778	22032	16195	18142
12 УРК, кг/т	0	1.56	0	0	0.52
13 Изменение производительности, т/сут	0	-318	0	0	-318

Рисунок 4.17 – Видеокадр отображения влияния изменения содержания кислорода в дутье на производительность и УРК

В настоящее время активно внедряются системы поддержки принятия решений на уровне оперативного управления [44-46]. Данные системы выдают рекомендации по объему подачи кокса (рисунок 4.18), а также позволяют путем решения задачи оптимизации улучшать показатели доменного процесса такие как расход кокса (рисунок 4.19).

Интеграция разработанной системы АИС управления доменным производством с системами поддержки принятия решений на уровне оперативного управления осуществляется посредством программно-технического комплекса ПолиТЭР. Для каждой технологической недели с помощью алгоритма определения планового режимного кластера значений параметров доменного процесса определяются факторные коэффициенты влияния технологических параметров на показатели доменного процесса. На рисунке 4.20 приведено изменение коэффициентов факторного счета каждую неделю.

В системах поддержки принятия решений мастера доменной печи расчет рекомендаций по корректировке расхода кокса в подачу осуществляется на основе факторных коэффициентов влияния на производство чугуна и удельный расход кокса показателей качества кокса, структуры и качества ЖРС, режимных параметров работы доменной печи в соответствии с таблицей пофакторного счета из технологической инструкции.



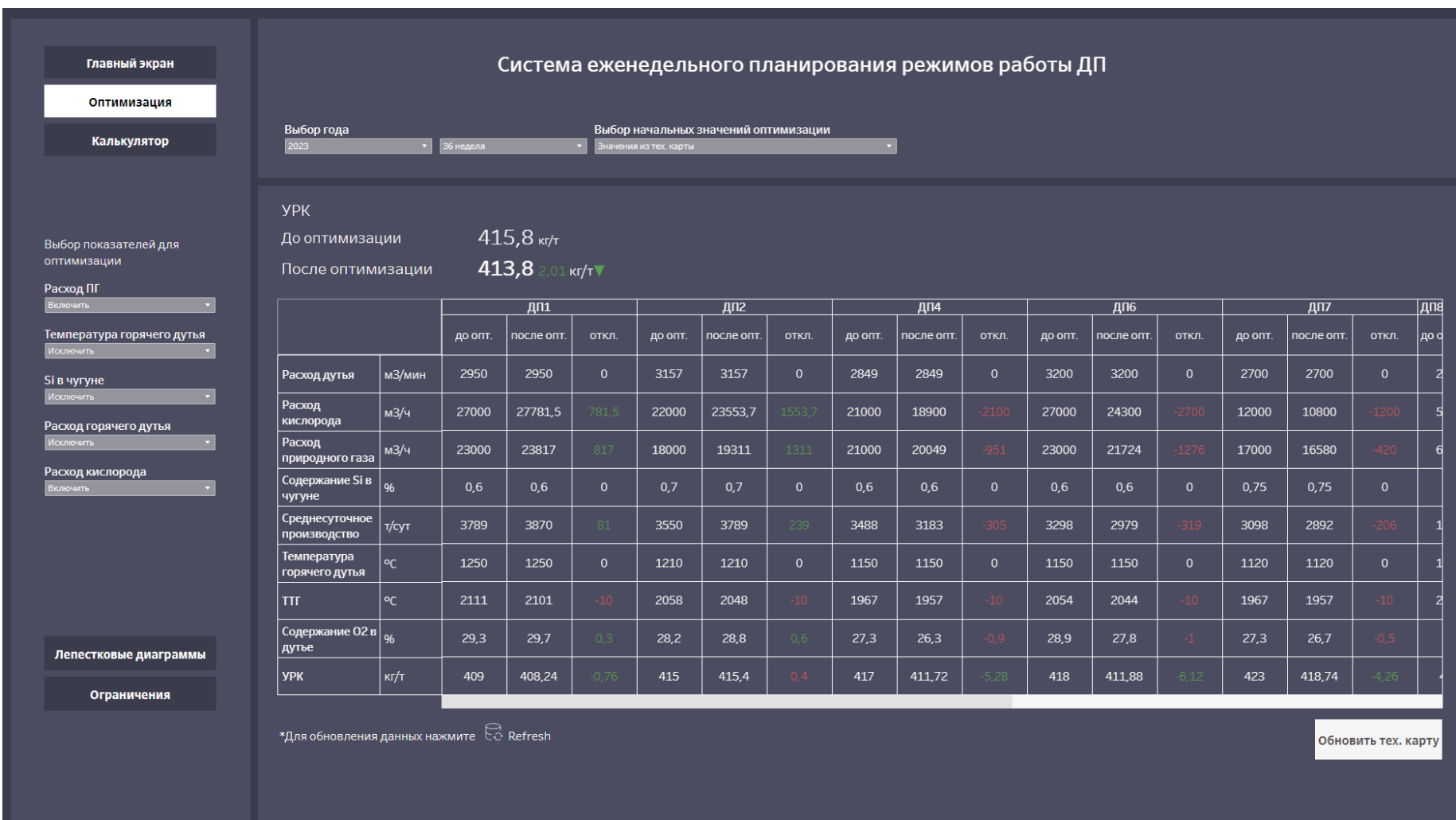


Рисунок 4.19 – Видеокадр системы еженедельного оптимального планирования работы доменных печей

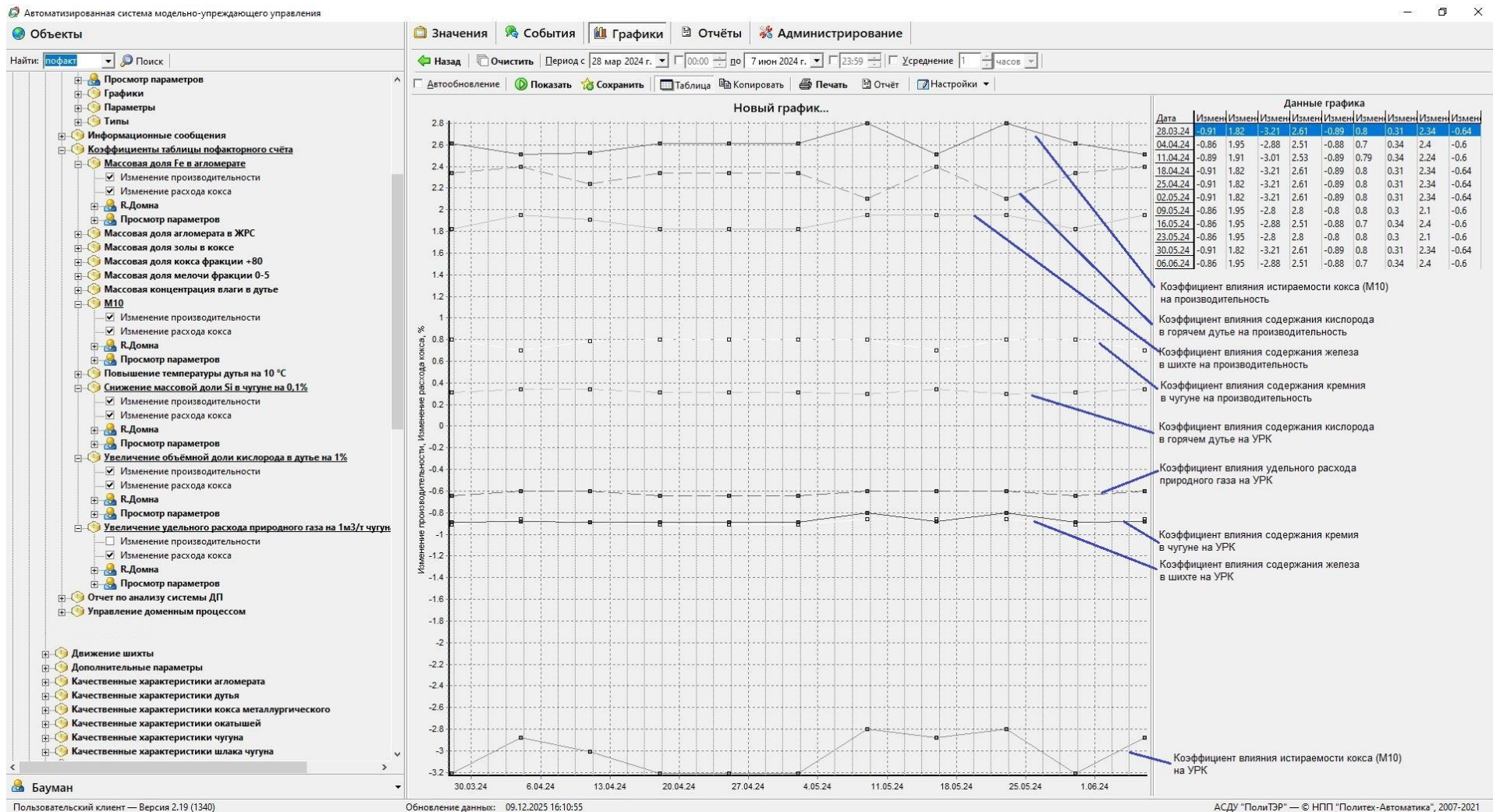


Рисунок 4.20 – Видеокадр ПТК ПолиТЭР

Также предусмотрена возможность использования уточненных значения коэффициентов для текущего режима доменной печи, которые определяются АИС управления доменным производством. Для этого в системах-советчиках мастеру доменной печи пользователь может выбрать с помощью каких коэффициентов формировать рекомендации: с помощью факторных коэффициентов из технологической инструкции или определенных с помощью алгоритмов АИС управления доменным производством (рисунок 4.21).

СИСТЕМА-СОВЕТЧИК

Факторные коэффициенты

Период расчета факторных коэффициентов: 13.11.2025 - 19.11.2025

№	Мероприятия	РК (из ТИ)	РК (расчет)	Ед. изм.	Выбор(расчет)
1	Увеличение массовой доли железа в рудной сыпи на 1%	-1.10	-0.90	%	<input type="checkbox"/>
2	Повышение температуры дутья на 10 °С до:				
2.1	800 – 900 °С	-0.42		%	<input type="checkbox"/>
2.2	901 – 1000 °С	-0.39		%	<input type="checkbox"/>
2.3	1001 – 1100 °С	-0.25		%	<input type="checkbox"/>
2.4	1101 – 1200 °С	-0.22	-0.22	%	<input type="checkbox"/>
2.5	1201 – 1300 °С	-0.20		%	<input type="checkbox"/>
3	Повышение давления газа под колошником на 0.1 кг/см²	-0.20	-0.17	%	<input type="checkbox"/>
4	Снижение массовой доли кремния в чугуна на 0.1% до:				
4.1	1.0 – 0.80%	-1.20		%	<input type="checkbox"/>
4.2	0.80 – 0.60%	-0.80	-0.90	%	<input type="checkbox"/>
4.3	0.60 – 0.40%	-0.60		%	<input type="checkbox"/>
5	Увеличение массовой концентрации влаги в дутье на 1г/м³	0.15	0.15	%	<input type="checkbox"/>
6	Увеличение удельного расхода природного газа на 1 м³/т чугуна в интервале до:				

РК - расход кокса; ТИ - технологическая инструкция.

Подтвердить

Советы

Анализ

Факторы

Журналы

Рисунок 4.21 – Видеокадр настройки формирования рекомендаций в системе-советчике мастеру доменной печи

Использование коэффициентов рассчитанных АИС управления доменным производством позволяет учитывать особенности доменных печей при оперативном управлении доменными процессом.

ВЫВОДЫ К ГЛАВЕ 4

1. Предложена функциональная структура АИС управления доменным производством, реализующая поддержку принятия решений пользователю при решении задач планирования и управления доменным производством, а также при оперативном управлении доменным процессом.

2. В работе разработано программное обеспечение АИС управления доменным производством для формирования зависимости показателя эффективности от объема производства. Система включает алгоритмы, предложенные во второй и третьей главах и включающие построение режимных кластеров значений параметров доменного процесса с использованием методов кластерного анализа и комитетного подхода, а также определение оптимальных значений технологических параметров доменных печей, являющихся решением рассмотренной в работе многокритериальной задачи управления доменным производством.

3. В главе 4 предложена схема автоматизированного управления доменной плавки с использованием разработанной системы – АИС управления доменным производством. Помимо этого, рассмотрено использование факторных коэффициентов влияния, которые являются результатом работы используемых в системе алгоритмов определения режимных кластеров значений параметров доменного производства и выбора плановых режимных кластеров, в системах поддержки принятия решений мастеру доменной печи.

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, 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.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Авдеев В.П. Идентификация промышленных объектов с учетом нестационарностей и обратных связей / В.П. Авдеев, Т.М. Даниелян, П.Г. Белоусов. Новокузнецк: СибМИ, 1984. – 88 с.
- 2 Астратова, Е.В. Модель оптимизации привоза и потребления железорудного сырья в ПАО "Магнитогорский металлургический комбинат" / Е. В. Астратова, А. В. Липатников, Д. А. Шнайдер, М. А. Цыгалов // Научно-технический прогресс в черной металлургии – 2017: Материалы III Международной научной конференции, Череповец, 19–20 октября 2017 года / Череповец: Череповецкий государственный университет, 2017. – С. 15-22.
- 3 Бабарыкин Н.Н. Теория и технология доменного процесса: Учебное пособие / Н.Н. Бабарыкин. Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2009. – 257 с.
- 4 Барбасова, Т.А. 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.
- 5 Барбасова, Т.А. 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.
- 6 Барсегян А.А. Анализ данных и процессов / А.А. Барсегян, М.С. Куприянов, И.И. Холод, М.Д. Тесс, С.И. Елизаров. СПб.: БХВ-Петербург, 2009. – 512 с.

7 Бахтадзе Н.Н., Бегинюк В.А., Елпашев Д.В., Захаров Э.А., Дончан Д.М., Салихов З.Г., Пятецкий В.Е. Интеллектуальная система поддержки принятия решений на основе распознавания видеообразов фурменных очагов доменной печи / Н.Н. Бахтадзе, В.А. Бегинюк, Д.В. Елпашев, Э.А. Захаров, Д.М. Дончан, З.Г. Салихов, В.Е. Пятецкий // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2022. – №88(1(I)). – С. 98-110.

8 Бериков, В.С. Современные тенденции в кластерном анализе / В.С. Бериков, Г.С. Лбов // Всероссийский конкурсный отбор обзорно-аналитических статей по приоритетному направлению «Информационно-телекоммуникационные системы», 2008. – 26 с.

9 Большаков, В.И. Экспертные системы управления доменной плавкой / В.И. Большаков, И.Г. Муравьева, Д.Н. Тогобицкая, Н.М. Можаренко, Н.Г. Иванча, Ю.С. Семенов, Е.И. Шумельчик // Бюллетень «Черная металлургия». – 2015. – №9. – С. 25-32.

10 Бордецкий, А.Б. Об определении комитета системы взвешенных неравенств / А.Б. Бордецкий, Л.С. Казаринов // Кибернетика. – 1981. – №6. – С. 44-48.

11 Габова, Ю. А. Оптимизационное планирование на предприятии черной металлургии с использованием автоматизированных информационных систем / Ю. А. Габова, Е. С. Замбрыцкая // Корпоративная экономика. – 2022. – № 2(30). – С. 4-13.

12 Геердес, М. Современный доменный процесс: введение / М. Геердес [и др.] пер. с англ. и ред. И. Ф. Курунова. – 3-е изд. – М: Металлургиздат, 2016. – 274 с.

13 Гилёва, Л.Ю. Технология доменной плавки. Расчет технологического режима. / Л.Ю. Гилёва, С.А. Загайнов – Екатеринбург: Уральский федеральный университет, 2019. – 54 с.

14 Готлиб, А.Д. О принципе М.А. Павлова / А.Д. Готлиб // Исследование доменного процесса: Сборник трудов. – М.: Изд. АН СССР, 1957. – С. 24-32.

15 Готлиб, А.Д. Основы автоматического регулирования доменного процесса / А.Д. Готлиб, Г.Г. Ефименко, А.А. Гиммельфарб // В кн.: Доменный процесс по новейшим исследованиям. – М.: Metallurgizdat, 1963. – С. 285-295.

16 Гурин И.А. Разработка автоматизированной системы оптимального распределения сырьевых и топливно-энергетических ресурсов комплекса доменных печей: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.06. / И.А. Гурин – Екатеринбург, 2019. – 164 с.

17 Дмитриев, А.Н. Основы теории и технологии доменной плавки / А.Н. Дмитриев, Н.С. Шумаков, Л.И. Леонтьев, О.П. Онорин. – Екатеринбург: УрО РАН, 2005. – 545 с.

18 Дмитриев, А.Н. Совершенствование аглококсодоменного производства с использованием цифровых технологий в рамках “индустрии 4.0” / А.Н. Дмитриев, М.О. Золотых, Г.Ю. Витькина // Бюллетень «ЧЕРНАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ». – 2020. – Т. 76, № 4. – С. 339-344.

19 Казаринов, Л.С. Метод эффективного управления доменным процессом на основе кластерного анализа / Л.С. Казаринов, Т.А. Барбасова, Х.М.А. Мохсен // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. – 2016. – Т. 16, № 2. – С. 164-169.

20 Казаринов, Л.С. 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.

21 Казаринов, Л.С. Системы. Управление и познание: аналитические очерки / Л.С. Казаринов. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2017. – 496 с., ил.

22 Канторович, Л.В. Математические методы организации и планирования производства / Л.В. Канторович. – Ленинград: ЛГУ. – 1939. – 68 с.

23 Карачунов, А.Г. Метод повышения эффективности планирования сталеплавильного производства на основе унификации химических составов стали / А.Г. Карачунов, Е.В. Ершов, П.А. Виноградова, А.А. Иванов // Вестник Череповецкого государственного университета. – 2022. – № 6(111). – С. 42-52.

24 Карачунов, А.Г. Методы планирования распределения заказов между плавками в сталеплавильном производстве / А.Г. Карачунов, В. В. Мухин, Е.В. Ершов // Вестник Череповецкого государственного университета. – 2025. – № 5(128). – С. 32-40.

25 Китаев, Б.И. Теплотехника доменного процесса / Б.И. Китаев, Ю.Г. Ярошенко, Е.Л. Суханов, Ю.Н. Овчинников, В.С. Швыдкий – М.: «Металлургия», 1978. – 248 с.

26 Кустов, М. А. Планирование прокатки и нагрева слябов на стане 5000 с применением технологий искусственного интеллекта / М.А. Кустов, Е.В. Ершов, И.А. Варфоломеев // Вестник Череповецкого государственного университета. – 2023. – № 1(112). – С. 47-58.

27 Лаптева, Е.В. Применение нейронных сетей в задачах идентификации / Е.В. Лаптева, Т.А. Барбасова // Научное сообщество студентов: материалы IV Международной студенческой научно-практической конференции, Чебоксары, 30 марта 2015 года. – Чебоксары: Общество с ограниченной ответственностью "Центр научного сотрудничества "Интерактив плюс", 2015. – С. 68-71.

28 Липатников, А.В. Оптимизация потребления угольного сырья в ПАО ММК на основе математического моделирования / А.В. Липатников, А.Е. Шмелёва, Е.Н. Степанов, Д.А. Шнайдер // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им Г.И. Носова. – 2018. – №4(1). – С. 30-38.

29 Лялюк, В.П. Сравнительный анализ эффективности технологий доменной плавки с вдуванием пылеугольного топлива и загрузкой кускового антрацита / В.П. Лялюк, И.Г. Товаровский, А.К. Тараканов, В.Н. Захарченко, Д.А. Кассим // Сталь. – 2014. – №1. – С. 2-5.

30 Модельные системы поддержки принятия решений в АСУ ТП доменной плавки / под ред. Н.А. Спирина. – Екатеринбург: ФГАОУ ВПО УрФУ, 2011. – 462 с.

31 Муравьева, И.Г. Новый уровень управления доменной плавкой в разработках ИЧМ / И.Г. Муравьева, Д.Н. Тогобицкая, А.С. Нестеров, Н.Г. Иванча // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. – 2019. – Т. 75. № 11. – С. 1231-1236.

32 Овчинников, Ю.Н. Нестационарные процессы и повышение эффективности доменной плавки / Ю.Н. Овчинников, В.И. Мойкин, Н.А. Спирин, Б.А. Боковиков. – Челябинск: Металлургия: Челяб. отд-ние, 1989. – 120 с.

33 Овчинникова, Е.В. Влияние параметров дутьевого режима на эффективность доменной плавки в условиях ОАО «Уральская сталь» / Е.В. Овчинникова, А.Н. Шаповалов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». – 2013. – № 13(1). – С. 61-67.

34 Павлов, А.В. Анализ шлакового режима доменной плавки с использованием модельных систем поддержки принятия решений / А.В. Павлов, Н.А. Спирин, В.А. Бегинюк, В.В. Лавров, И.А. Гурин // Известия вузов. Черная металлургия. 2022. – Т. 65. № 6. – С. 413–420.

35 Павлов, А.В. Информационно-моделирующая система прогнозирования состава и свойств конечного шлака в доменной печи в режиме реального времени / А.В. Павлов, Н.А. Спирин, И.А. Гурин, В.В. Лавров, В.А. Бегинюк, А.С. Истомина // Известия вузов. Черная металлургия. – 2023. – №66. – С. 244–252.

36 Павлов, А.В. О работе доменных печей с высокой долей окатышей в шихте / А.В. Павлов, О.П. Онорин, Н.А. Спирин, И.Е. Косаченко // Современные научные достижения металлургической теплотехники и их реализация в промышленности: сборник докладов международной научно-практической конференции «Современные научные достижения металлургической теплотехники и их реализация в промышленности», посвященной 95-летию основания кафедры ТИМ, УрФУ и 85-летию основания ОАО «ВНИИМТ», Екатеринбург, 17–18 сентября 2015 г. – Екатеринбург: УрФУ, 2015. – С. 145-154.

37 Парсункин, Б.Н. Повышение производительности доменной печи при оптимизации автоматического управления подачей природного газа и технического кислорода в дутье / Б.Н. Парсункин, Б.К. Сеничкин, С.М. Андреев, М. Ю. Рябчиков // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2011. – № 4(36). – С. 69-73.

38 Паршаков, В.М. АСУ ТП доменной плавки и её технологическое насыщение. Доменное производство / В.М. Паршаков, А.А. Третьак, А.П. Уланов // XXI век. Труды Международного конгресса доменщиков. – М.: Издательский дом «Кодекс», 2010. – С. 391-413.

39 Паршаков, В.М. Двумерная модель теплообмена в доменной печи / В.М. Паршаков, Т.Ю. Каширская, В.А. Заболотских // Теплотехническое обеспечение основных технологических процессов чёрной металлургии. Сборник трудов. – М.: «Металлургия», 1988. – С. 22-25.

40 Паршаков, В.М. Повышение эффективности использования пылеугольного топлива в доменной печи / В. М. Паршаков // «Сталь». – 2005. – № 8 – С. 32-37.

41 Рамм, А.Н. О влиянии интенсивности плавки на производительность доменных печей и относительный расход кокса / А.Н. Рамм // Исследование доменного процесса: Сб. научн. тр. АН СССР. – М.: Изд. АН СССР, 1957. – С. 85-87.

42 Рамм, А.Н. Современный доменный процесс / А.Н. Рамм. – М.: Metallurgy, 1980. – 304 с.

43 Савельев С.Г. Современное состояние и перспективы развития производства железорудных окатышей / С.Г. Савельев, Г.В. Губин, Я.А. Стойкова // Сталь. – 2013. – №8. – С. 2-6.

44 Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023681423 Российская Федерация. Система-советчик мастеру доменной печи: № 2023680261: заявл. 04.10.2023: опубл. 13.10.2023 / Д.А. Шнайдер, О.В. Колесникова, А.А. Басалаев, А.В. Точилкин; заявитель Общество с ограниченной ответственностью Научно-производственное предприятие "Политех-Автоматика".

45 Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024668629 Российская Федерация. Модуль экспертных оценок для поддержки принятия решений мастеру доменной печи: № 2024665456: заявл. 05.07.2024: опубл. 08.08.2024 / О.В. Колесникова, Д.А. Шнайдер, А.А. Басалаев, А.Д. Мойсук; заявитель Общество с ограниченной ответственностью научно-производственное предприятие "Политех-Автоматика".

46 Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025687990 Российская Федерация. Модуль web-интерфейса системы советчика мастеру доменной печи: заявл. 01.10.2025: опубл. 16.10.2025 / П.А. Самолетова, С.А. Черепанова, Т.А. Барбасова; заявитель Общество с ограниченной ответственностью научно-производственное предприятие "Политех-Автоматика".

47 Сергеев, П.А. Улучшение производительности и снижение энергоемкости доменного производства чугуна / П.А. Сергеев, Е.Г. Нешпоренко // Наука и производство Урала. – 2015. – № 11. – С. 42-46.

48 Сивоголовко Е.В. Методы оценки качества четкой кластеризации / Е.В. Сивоголовко // Компьютерные инструменты в образовании. – 2011. – №4. – С. 14-31.

49 Соловьев В.И. Экспертная система для диагностики и регулирования хода доменной печи / В.И. Соловьев, В.А. Краснобаев, Ю.А. Сарапулов, Е.А. Павлов // Международная научно-техническая конференция «Теория и практика производства чугуна», 24- 27 мая 2004 г.: труды. – Украина; Кривой Рог, 2004. – С. 484-487.

50 Спирин, Н.А. Информационные системы в металлургии / Н.А. Спирин, Ю.В. Ипатов, В.И. Лобанов и др., под ред. Н.А. Спирина. – Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2001. – 617 с.

51 Спирин, Н.А. Оптимизация и идентификация технологических процессов в металлургии / Н.А. Спирин, В.В. Лавров, С.И. Паршаков, С.Г. Денисенко, под ред. Н.А. Спирина. – Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2006. – 307 с.

52 Спирин, Н.А. 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 высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2014. – №6. – С. 45-49.

53 Спирин, Н.А. Цифровая трансформация пирометаллургических технологий: состояние, научные проблемы и перспективы развития / Н.А. Спирин, В.В. Лавров, В.Ю. Рыболовлев, Д.А. Шнайдер, А.В. Краснобаев, И.А. Гурин // Известия вузов. Черная металлургия. – 2021. – Т.64. №8. – С. 588-598.

54 Сучков А.В. Проблемы построения системы поддержки принятия решений для доменного производства / А.В. Сучков // Вестник ВГТУ. – 2009. – №10. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/problemy-postroeniya-sistemy-podderzhki-prinyatiya-resheniy-dlya-domennogo-proizvodstva> (дата обращения: 31.03.2025).

55 Сучков А.В. Совершенствование управления многомерными технологическим объектом на примере доменной печи: монография / А.В. Сучков, В.Г. Лисиенко, В.А. Сучков. – Екатеринбург: УрФУ, 2012. – 126 с.

56 Сучков, А.В. Анализ и совершенствование управления многомерным технологическим объектом на примере доменной печи: дис ... канд. Техн. наук / А.В. Сучков. – Екатеринбург, 2010. – 183 с.

57 Тобер, С.Г. Стабилизация теплового режима доменной плавки в условиях непостоянства влажности кокса / С.Г. Тобер, М.Г. Потапов, М.В. Потапова // Теория и технология металлургического производства. – 2016. – № 1(18). – С. 19-21.

58 Товаровский, И.Г. Влияние кинетических характеристик шихты на показатели и процессы доменной плавки / И.Г. Товаровский // Сталь 2012. – №5. – С.2-11.

59 Товаровский, И.Г. Доменная плавка. Монография, 2-е издание, и уточненное / И.Г. Товаровский // Днепропетровск, «ПОРОГИ», 2009. – 621 с.

60 Товаровский, И.Г. Нормативная оценка влияния параметров доменной плавки на расход кокса и производительность / И.Г. Товаровский // Сталь. – 2014. – № 5. – С. 4-11.

61 Товаровский, И.Г. Применение математических методов и ЭВМ для анализа и управления доменным процессом / И.Г. Товаровский, Е.И. Райх, К.К. Шкодин и др. – М.: Металлургия, 1978. – 204 с.

62 Товаровский, И.Г. Совершенствование и оптимизация параметров доменного процесса / И.Г. Товаровский. – М.: Металлургия, 1987. – 192 с.

63 Филатов С.В. Анализ влияния горячей прочности кокса (CSR) на показатели работы доменных печей / С.В. Филатов, И.Ф. Курунов, В.Н. Титов, А.М. Логинов // Сталь. – 2014. – № 10. – С. 10-14.

64 Филатов Ю.В. Эффективность применения кокса улучшенного качества (“Премиум”) при работе доменных печей с использованием пылеугольного топлива / Ю.В. Филатов, А.Н. Рыженков, А.В. Емченко, В.Е. Попов, А.И. Дрейко, С.Л. Ярошевский, И.В. Мишин / Бюллетень «Черная металлургия». – 2011. – №1. – С. 30-40.

65 Харченко, А.С. Снижение удельного расхода кокса в доменной печи воздействием на зону замедленного теплообмена / А.С. Харченко,

М.И. Сибагатуллина, Е.О. Харченко [и др.] // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2023. – Т. 66, № 4. – С. 394-402.

66 Ченцов, А.В. Балансовая логико-статистическая модель доменного процесса / А.В. Ченцов, Ю.А. Чесноков, С.В. Шаврин – Екатеринбург: УрО РАН, 2003. – 176 с.

67 Щукин П.А. Исследование свойств металлургического кокса / П.А. Щукин – М: Металлургия, 1971. – 184 с.

68 Agrawal, A. Advances in thermal level measurement techniques using mathematical models, statistical models and decision support systems in blast furnace / A. Agrawal, A.K. Kothari, A. Kumar, M.K. Singh, S.K. Dubey, R.V. Ramna, S. Nath // Metall. Res. Technol. – 2019. – №116 (421). – P. 1-16.

69 Angela, X. G. A Neural Network Approach to the Modeling of Blast Furnace: Bachelor of Science in Computer Science and Engineering and Master of Engineering in Electrical Engineering and Computer Science / X. G. Angela. – Massachusetts Institute of Technology, 1999. – 69 p.

70 Azadi, P. A hybrid dynamic model for the prediction of molten iron and slag quality indices of a large-scale blast furnace / P. Azadi, J. Winz, E. Leo, R. Klock, S. Engell // Computers and Chemical Engineering. – 2022. – № 156. – P. 1-17.

71 Azadi, P. Improved operation of a large-scale blast furnace using a hybrid dynamic model based optimizing control scheme / P. Azadi, H. Elwan, R. Klock, S. Engell, // Journal of Process Control. – 2023. – №129. – P. 1-22

72 Azadi, P. Model Predictive Control of Molten Iron and Slag Quality Indices in a Large-scale Ironmaking Blast Furnace using a Hybrid Dynamic Model / P. Azadi, R. Klock, S. Engell // IFAC-PapersOnLine. – 2022. – V.55 – P. 138-143.

73 Barbasova T.A. A multilevel resource-saving blast furnace process control / T.A. Barbasova // Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics. – 2021. – V. 21. № 1. – P. 136–146.

74 Barbasova, T. A. Application of recurrent neural network and matrix pencil method in predicting blast furnace thermal state indicators / T.A. Barbasova, Y.V. Lapteva, D.D. Salov // 2018 International Russian Automation Conference, RusAutoCon 2018, Sochi, 09–16 сентября 2018 года. – Sochi, 2018. – P. 8501682.

75 Burgess, J.M. Analysis of Blast Furnace Pressure Tappings, using a Cohesive-zone Gas-distribution Model / J.M. Burgess, D.R. Jenkins, K.L. Hockings // *Ironmaking and Steelmaking*. – 1984. – № 5. – P. 253-261.

76 Caliński, T. A dendrite method for cluster analysis / T. Caliński, J. Harabasz // *Communications in Statistics*. – 1974. – №3(1). – P. 1-27.

77 Cardoso, W. A novel committee machine to predict the quantity of impurities in hot metal produced in blast furnace / W. Cardoso, R. Di Felice // *Computers and Chemical Engineering*. – 2022. – №163. – P. 1-20.

78 Cardoso, W. Artificial neural network for predicting silicon content in the hot metal produced in a blast furnace fueled by metallurgical coke / W. Cardoso, R. di Felice, R.C. Baptista // *Mater Research*. – 2022. – V. 25. – P. 1–11.

79 Cardoso, W. Mathematical modelling to control the chemical composition of blast furnace slag using artificial neural networks and empirical correlation / W. Cardoso, D. Barros, R. Baptista, R. Di Felice // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. – 2021. – V. 1203. – P. 1-10.

80 David, S. F. Artificial Neural Network Model for Predict of Silicon Content in Hot Metal Blast Furnace/ S.F. David, F.F. David, M.L.P. Machado // *Materials Science Forum*. – 2016. – P. 572-577.

81 Fernández, J.M.M. Online estimation of electric arc furnace tap temperature by using fuzzy neural networks / J.M.M. Fernández, V.A. Cabal, V.R. Montequin, J.V. Balsera // *Engineering Applications of Artificial Intelligence* – 2008. – №21. – P.1001-1012.

82 Fontes, D.O.L. Blast furnace hot metal temperature and silicon content prediction using soft sensor based on fuzzy C -means and exogenous nonlinear autoregressive models / D.O.L. Fontes, L.G.S. Vasconcelos, R.P. Brito // *Computers and Chemical Engineering*. – 2020. – № 141. – P.1-10.

83 Frolov, Yu.A. Method of calculating and analyzing the factors that affect the coke consumption and productivity of blast furnaces at the Chelyabinsk metallurgical combine / Yu.A. Frolov, A.G. Ptichnikov, V.Kh. Barinov, N.N. Gorshkov // *Metallurgist*. – 2013. – V. 57. – P. 183-193.

84 Gasparini, V.M. Thermochemical model for blast furnace process control with the prediction of carbon consumption / V.M. Gasparini, L.F.A. de Castro, A.C.B. Quintas, V.E. de Souza Moreira, A.O. Viana, D.H.B. Andrade // *J. Mater. Res. Technol.* – 2017. №6 (3). – P. 220–225.

85 Gill, P.E. Sequential Quadratic Programming Methods / P.E. Gill, E. Wong, // *Mixed Integer Nonlinear Programming. The IMA Volumes in Mathematics and its Applications*. vol. 154.– New York: Springer, 2012. – P. 147–224.

86 Gobetto, M. Operations Management in Automotive Industries: From Industrial Strategies to Production Resources Management / M. Gobetto // *Through the Industrialization Process*. Springer Science+Business Media Dordrecht. – 2014. – 245 p.

87 Harvey, J. Process Simulation and control optimization of a blast furnace using classical thermodynamics combined to a direct search algorithm / J. Harvey, A.Gheribi // *Journal Metallurgical and materials transactions B*. – 2014. – № 45B. – P. 307-327.

88 Hastie, T. The Elements of Statistical Learning Data Mining, Inference, and Prediction. / T. Hastie, R. Tibshirani, J. Friedman. – Springer, 2008. – 784 p.

89 Huang, X. Data and knowledge collaborative-driven fault identification and self-healing control action inference framework for blast furnace / X. Huang, C. Yang, H. Zhang, S. Lou, D. Gao, L. Kong // *Expert Systems with Applications*. – 2024. – V. 245. – P. 1-12.

90 Kazarinov, L.S. Elliptic component analysis / L.S. Kazarinov, T.A. Barbasova // *2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing. ICIEAM*. – 2016.

91 Kohonen, T. The self-organizing map / T. Kohonen // *Proceedings of the IEEE*. – 1990. – T.78. №. 9. – P. 1464-1480.

- 92 Kule, J. Blast Furnace model development and application in the British Steel Corporation / J. Kule // Ind. Use Thermochem.Data Proc. Conf., Univ. Surrey. Sept. 11th – 13th.1979. – 1980. – P. 403- 415.
- 93 Kumar, D. Optimization of blast furnace parameters using artificial neural network: Master of technology in metallurgical and materials engineering / D. Kumar. – 2015. – 36 p.
- 94 Li, Y. Multi time scale inception-time network for soft sensor of blast furnace ironmaking process / Y. Li, C. Yang // Journal of Process Control. – 2022. – V. 118. – P. 106-114.
- 95 Liu, W. Predictive control of Si content in blast furnace smelting based on improved SA-BP / W. Liu, H. Wang, L. Shi // Journal of mines, metals & fuels. – 2021. – № 69(5). – P. 155-163.
- 96 Na, H. Integrative optimization for energy efficiency, CO2 reduction, and economic gains in the iron and steel industry: A holistic approach / H. Na, Y. Yuan, J. Sun, L. Zhang, T. Du, //Resources, Conservation and Recycling. – 2025. – №212. – P. 1-12.
- 97 Nie, H. Numerical investigation of oxygen-enriched operations in blast furnace ironmaking / H. Nie, Z. Li, S. Kuang, L. Yan, W. Zhong, A. Yu, X. Mao, H. Xu // Journal Fuel. – 2021. – № 296. – P. 1-20.
- 98 Pavlov, A.V. Decision-Making Support in Blast-Furnace Operation / A.V. Pavlov, A.A. Polinov, N.A. Spirin, O.P. Onorin, V.V. Lavrov, I.A. Gurin // Steel in Translation. – 2019. – T. 49. – №3. – C. 185-193.
- 99 Radhakrishnan V.R. Neural networks for the identification and control of blast furnace hot metal quality // V.R Radhakrishnan, A.R Mohamed // Journal of Process Control. – 2000. – V.10 (№6). – P. 509-524.
- 100 Sacramento Municipal Utility District /SMUD/. – Режим доступа: <http://smud.org>.
- 101 Sasaki, M. Formation and Melt-down of Softening-Melting Zone in Blast Furnace / M. Sasaki, K. Ono, A. Suzuki // Trans. Of the Iron and Steel Inst. Jap. – 1977. – Vol.17. – № 7. – P. 391-400.

102 Saxen H., Data-Driven Time Discrete Models for Dynamic Prediction of the Hot Metal Silicon Content in the Blast Furnace—A Review / H. Saxen, C. Gao, Z. Gao, // IEEE Transactions on industrial informatics. – 2013. – V.9 (№ 4). – P. 2213-2225.

103 Semenov, Y.S. Using thermal probes to regulate the batch distribution in a blast furnace with pulverized-coal injection / Y.S. Semenov, E.I. Shumelchik, V.V. Horupakha, A.M. Kuznetsov, A.V. Zubenko, A.G. Kovalenko // Steel Transl. – 2017. – № 47(6). – P. 389–393

104 Shnayder, D.A. Data mining and model-predictive approach for blast furnace thermal control / D.A. Shnayder, L.S. Kazarinov, T.A. Barbasova, A.V. Lipatnikov // Intelligent Systems Conference. IntelliSys. – 2017. – V. 2018-January. – P. 653-660.

105 Speight, J.G. Handbook of coal analysis / J.G. Speight. John Wiley & Sons, Inc. – 2005. – 238 c.

106 Ueda, S. Recent progress and future perspective on mathematical modeling of blast furnace / S. Ueda, S. Natsui, H. Nogami, J.I. Yagi, T. Ariyama // ISIJ International. – 2010. – T. 50. № 7. – P. 914-923.

107 Xie, H. Application of big data in optimization of blast furnace operation / H. Xie, J. Wang, G. Wang, X.-D. Xiao-dong Sun // AISTech 2019 – Proceedings of the Iron & Steel Technology Conference. – 2019. – T. 2019 №5. – P. 587-591.

108 Yagi, J. Two-dimensional Simulation on the Gas Flow and Heat Transfer in the Blast Furnace / J. Yagi, K. Takeda, Y. Omori et al. // Trans. of the Iron and Steel Inst. Jap. – 1983. – Vol.22. – № 11. – P. 884-892.

109 Zagorskina, E.V. Control of the blast furnace thermal state based on the neural network simulation / E.V. Zagorskina, T.A. Barbasova // SIBIRCON 2019 - International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences, Proceedings, Novosibirsk, 21–27 октября 2019 года. – Novosibirsk: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2019. – P. 714-718.

110 Zagoskina, E.V. Intelligent Control System of Blast-furnace Melting Efficiency / E.V. Zagoskina, T.A. Barbasova, D.A. Shnaider // SIBIRCON 2019 - International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences, Proceedings, Novosibirsk, 21–27 октября 2019 года. – Novosibirsk: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2019. – P. 710-713.

111 Zhang, X. A comparative study of deep and shallow predictive techniques for hot metal temperature prediction in blast furnace ironmaking / X. Zhang, M. Kano, S. Matsuzaki // Journal Computers and Chemical Engineering. – 2019. – № 130. – P. 1-12.

112 Zhou P. Data-driven predictive control of molten iron quality in blast furnace ironmaking using multi-output LS-SVR based inverse system identification / P. Zhou, D. Guo, T. Chai // Neurocomputing. – 2018. – V. 308. – P. 101-110.

113 Zhou, P. Data-driven nonlinear subspace modeling for prediction and control of molten iron quality indices in blast furnace ironmaking / P. Zhou, H. Song, H. Wang, T. Chai // IEEE Transactions on control systems technology. – 2017. – V. 25 (№ 5). – P. 1761-1774.

114 Zhou, P. Multivariable dynamic modeling for molten iron quality using online sequential random vector functional-link networks with self-feedback connections / P. Zhou, M. Yuan, H. Wang, Z. Wang, T.-Y. Chai // Journal Information Sciences. – 2015. – №325. – P237-255.

ПРИЛОЖЕНИЯ

**ПРИЛОЖЕНИЕ А. ПЕРЕЧЕНЬ ПАРАМЕТРОВ, УЧАСТВУЮЩИХ
В ПОИСКЕ РЕЖИМНЫХ КЛАСТЕРОВ ЗНАЧЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ
ДОМЕННОГО ПРОЦЕССА**

Таблица А.1 – Перечень параметров, участвующих в поиске эффективных областей значений параметров доменного процесса

№ п/п	Наименование сигнала	Ед. изм.
1	Производство чугуна	т
2	Удельный расход кокса	кг/т
Дутьевые параметры		
3	Расход холодного дутья	м ³ /ч
4	Температура горячего дутья	°С
5	Расход природного газа	м ³ /ч
6	Содержание кислорода в дутье	%
7	Влажность дутья	г/м ³
8	Перепад давлений общий	ат
9	Давление колошникового газа	ат
Химия чугуна		
10	Содержание Mn	%
11	Содержание Si	%
12	Содержание Ti	%
13	Содержание S	%
14	Титановый модуль	—
15	Степень использования колошникового газа	%
Химия шлака		
16	Содержание Al ₂ O ₃	%
17	Содержание CaO	%
18	Содержание FeO	%
19	Содержание K ₂ O	%
20	Содержание MgO	%
21	Содержание MnO	%
22	Содержание NaO	%
23	Содержание S	%
24	Содержание SiO ₂	%
25	Содержание TiO ₂	%

Продолжение таблицы А.1

№ п/п	Наименование сигнала	Ед. изм.
Химия кокса		
26	Истираемость кокса (M10)	%
27	Дробимость (M25)	%
28	Содержание золы	%
29	Содержание кокса +80	%
30	Содержание углерода	%
31	Реакционная способность (CRI)	%
32	Горячая прочность (CSR)	%
Химия агломерата		
33	Содержание Fe	%
34	Содержание Zn	%
35	Содержание фракций 0-5	%
Структура металлошихты		
36	Доля агломерата	%
37	Содержание Fe в металлошихте	%

ПРИЛОЖЕНИЕ Б. СВИДЕТЕЛЬСТВА НА РЕГИСТРАЦИЮ
ПРОГРАММЫ ЭВМ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2023665788

Модуль интеллектуального управления
эффективностью доменной плавки

Правообладатель: *Общество с ограниченной
ответственностью Научно-производственное
предприятие "Политех-Автоматика" (RU)*

Авторы: *Барбасова Татьяна Александровна (RU),
Черепанова Светлана Андреевна (RU), Самолетова
Полина Алексеевна (RU), Бауман Екатерина
Вячеславовна (RU)*



Заявка № 2023664242

Дата поступления 07 июля 2023 г.

Дата государственной регистрации
в Реестре программ для ЭВМ 20 июля 2023 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат: 429b5a0f63553164ba196f83b73b4aa7
Владелец: **Зубов Юрий Сергеевич**
Действителен с 18.06.2023 по 02.08.2024

Ю.С. Зубов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2025689386

**Модуль оперативного определения режимов работы
доменной печи на основе выделения эффективных
областей**

Правообладатель: *Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования «Южно-
Уральский государственный университет (национальный
исследовательский университет)» (RU)*

Авторы: *Шнайдер Дмитрий Александрович (RU), Бауман
Екатерина Вячеславовна (RU), Барбасова Татьяна
Александровна (RU)*

Заявка № 2025688220

Дата поступления 17 октября 2025 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 28 октября 2025 г.



*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат 00a570e4f7ca180531b4b8818e75f29506
Владелец **Зубов Юрий Сергеевич**
Действителен с 04.07.2025 по 28.11.2026

Ю.С. Зубов

ПРИЛОЖЕНИЕ В. АКТ ВНЕДРЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

АКТ

внедрения результатов диссертационной работы
преподавателя кафедры автоматизации и управления ФГБОУ ВПО ЮУрГУ (НИУ)
Бауман Екатерины Вячеславовны:
**«Управление эффективностью доменного процесса на основе кластерных
моделей и комитетного подхода к принятию решений»**
представленной на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Комиссия в составе: начальника доменного цеха ПАО «ММК» к.т.н. Павлова А.В., начальника Центра искусственного интеллекта ООО «ММК-Информсервис» Ph.D., к.т.н. Муравьева Д.С., старшего менеджера ООО «ММК-Информсервис» к.т.н. Краснобаева А.В. рассмотрела результаты диссертационной работы Бауман Е.В. на тему: «Управление эффективностью доменного процесса на основе кластерных моделей и комитетного подхода к принятию решений».

Комиссия отмечает, что основные результаты диссертационной работы были получены Бауман Е.В. в рамках выполнения работ реализации проекта «Разработка и внедрение интегрированной системы оптимального планирования и модельно-упреждающего управления агло-коксо-доменным производством «Оптимальный чугун».

Комиссия утвердила следующие выводы и результаты работы:

1. В рамках выполнения работ предложен метод управления эффективностью доменного процесса на основе кластерных моделей и комитетного подхода к принятию решений, предназначенный для построения экспертной системы, реализующей поддержку принятия решений по управлению технологическими процессами на основе анализа ограничений роста эффективности.

2. Разработан алгоритм помесечного планирования доменного производства на основе комитетного подхода к принятию эффективных решений в противоречивых условиях в многорежимной постановке. Данный алгоритм внедрен в практику управления ПАО «ММК» в рамках модуля 5 системы «Оптимальный чугун», который осуществляет расчет оптимального производства и переменной составляющей себестоимости чугуна для целей объемного планирования предприятия.

3. Разработан алгоритм определения эффективных областей значений параметров доменного процесса на основе кластерного анализа и комитетного подхода к согласованию взвешенных по значимости технических условий. Данный алгоритм внедрен в практику управления ПАО «ММК» в рамках модуля 4 системы «Оптимальный чугун», который применяется для расчета факторных коэффициентов влияния на производство чугуна и удельный расход кокса показателей качества кокса, структуры и качества ЖРС, режимных параметров ДП.

4. Технико-экономический эффект от внедрения результатов диссертационной работы Бауман Е.В. в рамках проекта «Оптимальный чугун» состоит в повышении точности управления технологическими режимами работы доменных печей и составляет около 45 млн. руб. в год.

Настоящий акт составлен для предоставления в диссертационный совет Д 212.298.03 при ФГАОУ ВО «ЮрГУ(НИУ)» в целях подтверждения практической значимости и внедрения результатов диссертационного исследования.

Начальник доменного цеха ПАО «ММК», к.т.н.

Павлов А.В.

Начальник Центра искусственного интеллекта
ООО «ММК-Информсервис», к.т.н., Ph.D.

Муравьев Д.С.

Старший менеджер управления экономики

Гареев И.С.

Старший менеджер
ООО «ММК-Информсервис», к.т.н.

Краснобаев А.В.

