

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования

«Южно-Уральский государственный университет  
(национальный исследовательский университет)»  
Высшая школа электроники и компьютерных наук  
Кафедра «Автоматика и управление»

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ

Заведующий кафедрой

д.т.н., профессор

\_\_\_\_\_ / Л.С. Казаринов

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2020 г.

Автоматизированная система управления тепловыми режимами работы  
доменной печи

Пояснительная записка  
к выпускной квалификационной работе  
ЮУрГУ – 270304.2020.401 ПЗ ВКР

Руководитель проекта

к.т.н., доцент каф.АиУ

\_\_\_\_\_ / Барбасова Т.А.

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2020 г.

Автор работы

Студент гр. КЭ-418

\_\_\_\_\_ / Самолетова П.А.

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2020 г.

Нормоконтролер

к.т.н., доцент каф.АиУ

\_\_\_\_\_ / Барбасова Т.А.

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2020 г.


Челябинск

2020

## АННОТАЦИЯ

Самолетова П.А. Автоматизированная система управления тепловыми режимами работы доменной печи – Челябинск: ЮУрГУ, ВШ ЭКН; 2020, 79 с., 16 ил., библиогр. список – 25 наим., 3 листа чертежей ф. А3., 1 листа чертежей ф. А4., 2 прил.

Выпускная квалификационная работа посвящена разработке автоматизированной системы управления тепловыми режимами работы доменной печи. Разработана экспертная система, позволяющая оптимизировать технологические параметры, участвующие в определении режимов работы доменной печи, с целью снижения удельного расхода кокса и повышения производительности.

					<b>270304.2020.401 ПЗ</b>			
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ документа</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>				
Разраб.		Самолетова П.А			<i>Автоматизированная система управления тепловыми режимами работы доменной печи</i>	<i>Лит.</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>
Пров.		Барбасова Т.А.					3	79
Н.Контр.		Барбасова Т.А				<i>ЮУрГУ (НИУ) Кафедра АиУ</i>		
Утверд.		Казаринов Л.С.						

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	7
1 ДОМЕННОЕ ПРОИЗВОДСТВО .....	8
1.1 Принципы работы доменной печи.....	8
1.2 Доменная печь как управляемая технологическая система.....	12
1.3 Принципы построения современной автоматизированной информационной системы доменной плавки.....	17
1.3.1 Архитектура АИСТОУ .....	19
1.4 Влияние технологических параметров на эффективность доменной плавки .....	20
1.4.1 Показатели качества шихты .....	22
1.4.2 Параметры дутья .....	22
1.4.3 Состав чугуна.....	22
2 КОНЦЕПЦИЯ ПОСТРОЕНИЯ УРОВНЯ ОПТИМАЛЬНОГО ТЕХНИКО- ЭКОНОМИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ АГЛО-КОКСО-ДОМЕННЫМ ПРОИЗВОДСТВОМ .....	24
3.1 Анализ режимов работы доменной печи .....	27
3.1.1 Анализ режимов работы доменной печи по содержанию в коксе фракции +80 мм.....	27
3.1.2 Анализ режимов работы доменной печи по влажности дутья .....	31
3 РАЗРАБОТКА ЭКСПЕРТНОЙ СИСТЕМЫ .....	36
3.1 Оптимизация технологических параметров .....	36
3.1.1 Изменение прочности на истирание (M10) .....	39
3.1.2 Изменение доли агломерата в железорудном сырье .....	39
3.1.3 Удельный расход природного газа .....	40
3.1.4 Изменение удельного расхода кокса.....	41
3.1.5 Изменение производства чугуна.....	43
3.1.6 Изменение стоимости угольной шихты.....	45

					270304.2020.401 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		4

3.1.7	Изменение стоимости железорудного сырья .....	46
3.1.8	Изменение содержания кислорода в дутье .....	47
3.1.9	Изменение удельного расхода природного газа .....	48
3.1.10	Расход холодного дутья .....	48
3.1.11	Изменение расхода холодного дутья .....	49
3.1.12	Изменение удельного расхода кокса по прочности на истирание ..	49
3.1.13	Изменение удельного расхода кокса по содержанию в коксе фракции +80 мм.....	50
3.1.14	Изменение удельного расхода кокса содержанию золы .....	51
3.1.15	Изменение удельного расхода кокса по доле агломерата в железорудном сырье .....	52
3.1.16	Изменение удельного расхода кокса по содержанию фракции 5-0 в агломерате.....	53
3.1.17	Изменение удельного расхода кокса по содержанию Fe в агломерате.....	54
3.1.18	Изменение удельного расхода кокса по пару на увлажнение .....	55
3.1.19	Изменение удельного расхода кокса по ПГ/О2 .....	56
3.1.20	Изменение производства чугуна по прочности на истирание.....	57
3.1.21	Изменение производства чугуна по содержанию в коксе фракции +80 мм.....	58
3.1.22	Изменение производства чугуна по содержанию золы.....	59
3.1.23	Изменение производства чугуна по доле агломерата в железорудном сырье .....	60
3.1.24	Изменение производства чугуна по содержанию фракции 5-0 в агломерате.....	61
3.1.25	Изменение производства чугуна по содержанию Fe в агломерате .	62
3.1.26	Изменение производства чугуна по пару на увлажнение .....	63
3.1.27	Изменение производства чугуна по ПГ/О2 .....	64

4 РЕАЛИЗАЦИЯ ЭКСПЕРТНОЙ СИСТЕМЫ .....	66
4.1 Оптимизация по изменению прочности на истирание.....	67
4.2 Оптимизация по изменению доли агломерата .....	70
4.3 Оптимизация по изменению ПГ/О2 .....	74
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	76
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК .....	77
ПРИЛОЖЕНИЯ	
ПРИЛОЖЕНИЕ А .....	80
ПРИЛОЖЕНИЕ Б .....	86
ПРИЛОЖЕНИЕ В.....	91

## ВВЕДЕНИЕ

Доменный процесс является наиболее консервативным из всех процессов черной металлургии. В этом легко убедиться с помощью простого перечисления существовавших параллельно с доменным и последовательно сменявших друг друга процессов передела чугуна в железо и сталь: кричный, пудлинговый, тигельный, бессемеровский и томасовский, сименс-мартеновский, и современных процессов передела – кислородно-конвертерный и электроплавка стали в дуговых печах [1].

Современная доменная плавка – продукт многолетней эволюции ее технологии. Некоторые из этих технологий вошли составными частями в современную технологию, обозначив своеобразные вехи в развитии доменного производства. Производство каменноугольного кокса, заменившего древесный уголь, нагрев дутья, окускование рудной мелочи и концентратов обогащения руд, производство офлюсованного агломерата и окатышей, искусственное повышение давления газов в печах, вдувание в горн печей дополнительных топлив при обогащении дутья кислородом. Выше перечисленное является кратким перечнем главных этапов длительного эволюционного пути развития доменных технологий.

Большинство металлургических комбинатов старается повысить объем производства и усилить конкурентоспособность продукции. Для достижения этой цели необходимо улучшить процесс выплавки в доменных печах чугуна.

Одним из важнейших показателей является качество кокса, так как от его расхода зависит технико-экономические показатели и эффективность производства чугуна.

					270304.2020.401 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		7

# 1 ДОМЕННОЕ ПРОИЗВОДСТВО

## 1.1 Принципы работы доменной печи

Доменная печь предназначена для выплавки железа из железной руды. На заключительной стадии процесса плавки железо соединяется с углеродом и превращается в чугун – сплав железа и углерода, содержащий от 2,14 до 6,67% углерода.

Современная домна – это сооружение высотой с 30-этажный дом. Она оборудована сложнейшими агрегатами и приборами. Наиболее эффективной является выплавка чугуна из концентрированных окатышей и/или агломерата с более высоким содержанием железа. Загрузка в печь вводится слоями порционно, с периодической загрузкой кокса с учетом теплового баланса печи. Так же послойно в домну загружают флюсы – известь и другие вещества. Данные материалы способствуют проведению необходимых физико-химических реакций с целью получения шлака и чугуна с необходимыми свойствами. Кокс, агломерат и/или окатыши, а также флюсы являются шихтой при производстве чугуна в доменной печи.

Основными элементами конструкции доменной печи являются: колошник, шахта и горн (рисунок 1). Внешняя конструкция домны – это прочный стальной кожух, выложенный изнутри огнеупорным кирпичом. Кожух доменной печи водоохлаждаемый.

Загрузка шихты в современную доменную печь производится при помощи лоткового устройства, обеспечивающее низкие потери теплового баланса и высокие показатели экологичности в сравнении с конусным грузочным устройством. Шихта поступает из бункера – склада, куда предварительно доставляются агломерат и/или окатыши, кокс и флюсы. В бункере при помощи автоматизированных вагонов-весов происходит смешение шихты. Шихта из

										Лист
										8
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	270304.2020.401 ПЗ					

бункера в загрузочное устройство подается либо транспортерами, либо вагонами-скипами, это зависит от года конструкции домны [1].

Под действием собственного веса шихта опускается и газы, образующиеся при сгорании кокса, производят нагрев шихты. Основная часть доменного процесса происходит в горне. В кожухе домны имеются технологические отверстия, в которые вставлены фурмы – специальные приборы, назначение которых – подача в печь сжатого и предварительно нагретого в кауперах воздуха. В фурмах имеются смотровые окошки, через которые доменщики могут следить за процессом плавки. Конструкция фурм водоохлаждаемая, с целью исключения перегрева и последующей деформации. Подача в домну горячего воздуха улучшает тепловой баланс и позволяет снизить расход кокса и повысить производительность. Кроме кокса в качестве источника тепла возможно так же применение мазута или природного газа.

В горне температура достигает 2000 °С. При такой температуре руда полностью расплавляется. При окислении кокса образуется углекислый газ, при высокой температуре превращающийся в оксид углерода (CO). Оксид углерода (CO), вступая в химическую реакцию с оксидом железа, восстанавливает железо. Помимо железа в домне происходит восстановление кремния и марганца. Сера, попадающая в доменную печь в основном вместе с коксом, частично соединяется с кислородом и водородом и переходит в газообразное состояние, однако большая часть серы остается в шихте в виде FeS и CaS. При этом FeS растворяется в чугуна, для его удаления добавляют шлаки, содержащие повышенное количество CaO [1].

Стекая вниз через слой раскаленного кокса, железо насыщается углеродом и превращается в чугун. Жидкий чугун скапливается на дне горна, а более легкий шлак собирается на поверхности.

После того как в горне скопится достаточное количество чугуна, его выпускают через летки – специальные отверстия в нижней части горна. В первую очередь через верхнюю лентку выпускают шлак, затем через нижнюю – чугун. Из

					270304.2020.401 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		9



леток чугуна сливают в канавы, откуда его потом сливают в установленные на железнодорожных платформах чугуновозные ковши или передвижные миксеры.

Чугун, предназначенный для производства отливок (литейный чугун), направляется в разливочную машину. Там он застывает в виде брусков – чушек. Чугун, который впоследствии будет переработан в сталь (передельный чугун), перевозится в сталеплавильный цех, где переплавляется в сталь.

Чугун стал одним из основных конструкционных материалов современности. Он широко применяется как литейный сплав, заменяя иногда более дорогостоящие сплавы из цветных металлов. По прочности некоторые чугуны не уступают углеродистой стали. Во второй половине XX в. стал изготавливаться легированный чугун с добавками других металлов: алюминия, никеля, вольфрама, хрома и др. Добавки придают чугуну особые свойства: износостойкость, жаропрочность, коррозионностойкость [2].

Основные виды чугуна различаются по форме включений графита. Наиболее применяемой разновидностью чугуна является серый чугун. В нем есть включения графита пластинчатой формы. Серый чугун применяется для деталей, испытывающих высокие нагрузки.

В белом чугуне избыточный углерод, не находящийся в твердом растворе железа, присутствует в виде карбида железа – FeC. Он применяется для деталей простой формы, работающих на износ. Для повышения износостойкости белый чугун легируют хромом, вольфрамом и молибденом.

В половинчатом чугуне часть углерода содержится в виде графита, часть – в виде карбидов. Он применяется для деталей, работающих в условиях сильного трения (например, тормозные колодки), или для деталей, требующих повышенной износостойкости.

Ковкий чугун изготавливают из белого чугуна, подвергая его отжигу, в результате чего цементит распадается, а образующийся графит приобретает форму хлопьев. Его используют в основном, в автомобиле- и тракторостроении.

					270304.2020.401 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		10

Высокопрочный чугун обладает хорошими литейными свойствами, применяется для замены стальных деталей (коленчатые валы двигателей). В высокопрочном чугуне графит имеет шаровидную или вермикулярную форму. Высокопрочный чугун с вермикулярным графитом применяется в дизелестроении [2].

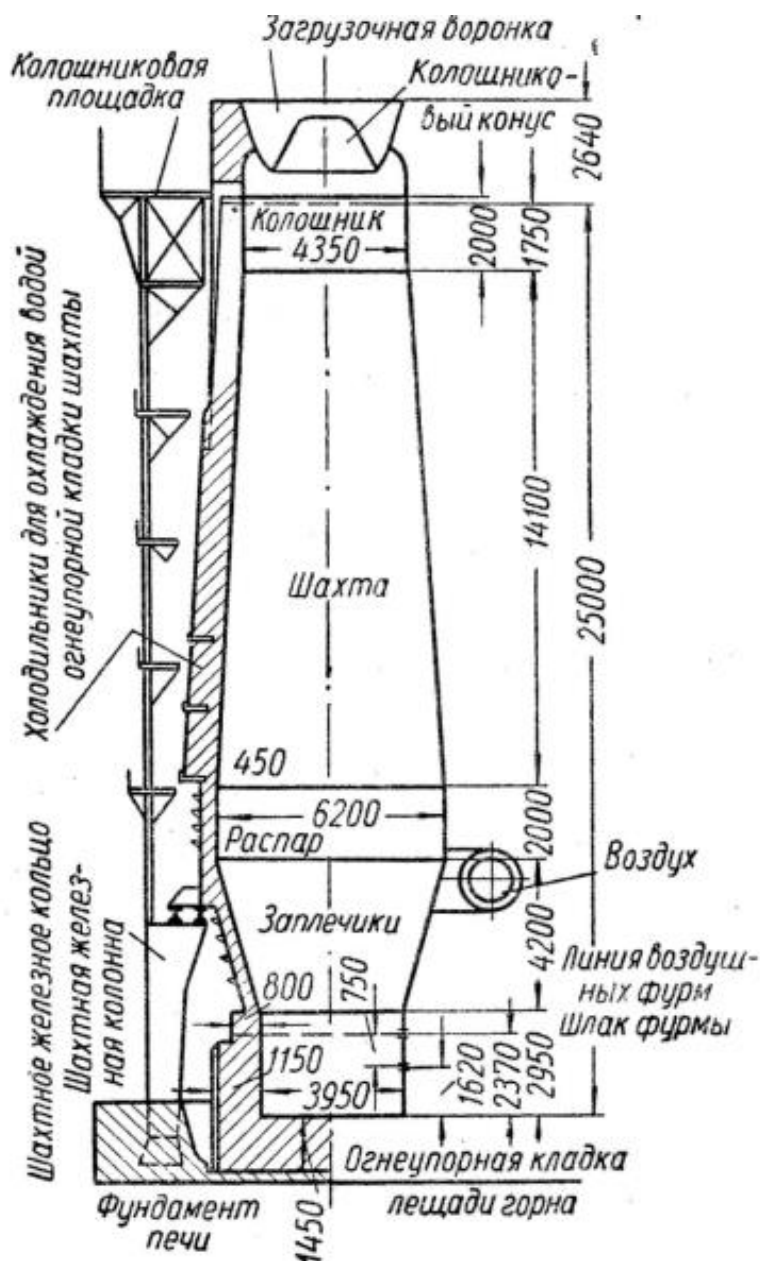


Рисунок 1 – Схема доменной печи в разрезе

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

270304.2020.401 ПЗ

Лист

11

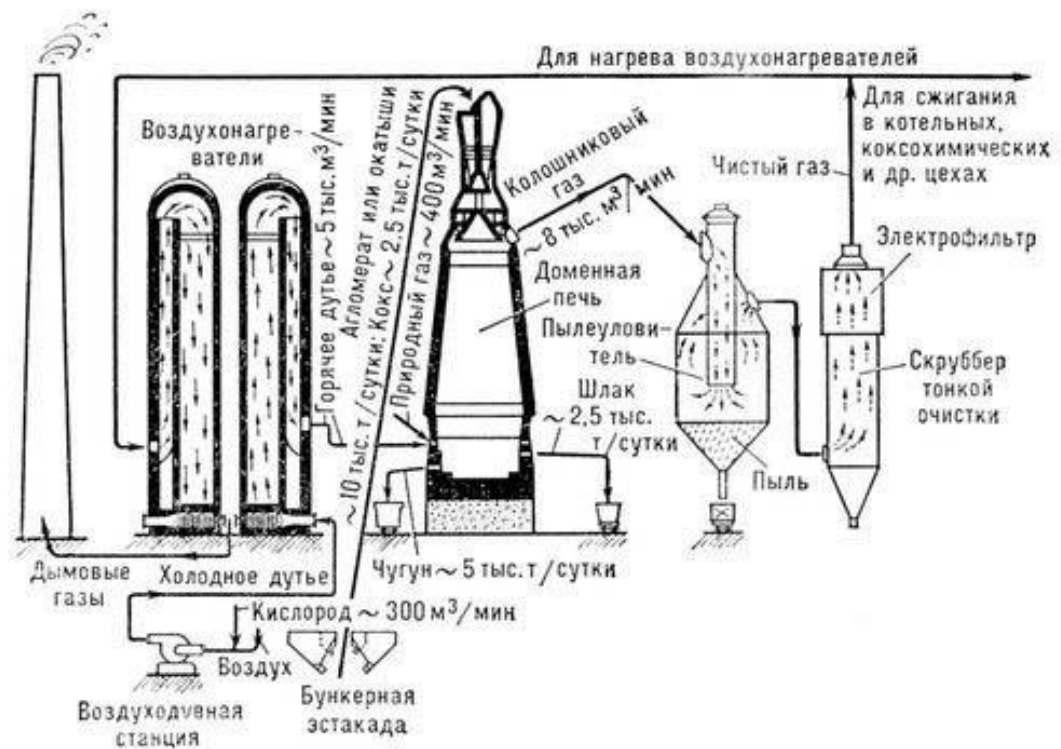


Рисунок 2 – Схема доменного процесса

## 1.2 Доменная печь как управляемая технологическая система

В качестве шихтовых материалов в доменной печи используют кокс, окатыши, агломерат, металлодобавки, известняк, которые загружаются через колошник печи. Загруженные материалы опускаются сверху вниз, газы, образующиеся в горне, поднимаются снизу-вверх. Высокотемпературная, восстановительная атмосфера создается в печи в результате подачи высоко нагретого, обогащенного кислородом дутья и инжестируемого топлива, через фурмы в нижнюю часть печи. В горне печи происходит горение кокса и инжестируемого топлива до оксида углерода и водорода. В процессе плавки происходит восстановление различных элементов, в первую очередь оксидов железа, а кислород оксидов переходит в газ в виде  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$ . В результате доменного процесса получают продукты плавки, а именно, чугун, шлак, колошниковый газ и колошниковую пыль [3].

Современная доменная печь объемом 5000 м<sup>3</sup> способна изготавливать 12 тыс. тонн чугуна в сутки, 4 тыс. тонн шлака и 20 млн. м<sup>3</sup> колошникового газа. Чтобы получить вышесказанный объем чугуна, необходимо подать в печь 23 тыс. железорудного сырья, кокса, 14 млн. м<sup>3</sup> горячего дутья, и 1,5 млн. м<sup>3</sup> природного газа. Лучшие доменные печи, имеющие современные системы автоматизации, расходуют 400 – 410 кг кокса на тонну чугуна при минимально теоретически допустимом около 300 кг кокса на тонну чугуна и удельной производительностью по чугуну 2,5 – 2,7 тонн на м<sup>3</sup> в сутки. Крупные доменные цеха имеют в своем арсенале до 10 печей. При таких масштабах просто необходимо наличие безошибочных и научно-обоснованных методов управления доменным процессом.

Доменная плавка относится к числу непрерывных металлургических процессов, в основу которых заложен принцип организованного противотока, что обеспечивает высокую экономичность всех процессов (тепловых и массообменных). Тепловой коэффициент полезного действия доменной печи достигает 90 – 95 %, что является значительно выше этого же показателей других типов металлургических печей. Чтобы добиться такого эффекта необходимо организовать хороший контакт газов с шихтовыми материалами, иначе говоря необходимо достичь рациональное распределение газового потока, что по сути является сложной задачей. Доменное производство является самым энергоемким, на которое уходит примерно половина топлива, используемого черной металлургией, а энергетические затраты на выплавку чугуна остаются еще высокими и превосходят теоретические значения. Большая часть энергетических затрат расходуется на дорогостоящий и дефицитный кокс. Основные мероприятия направлены на экономию кокса и на совершенствование технологии плавки. В настоящее время уровень технологии доменной плавки определяется именно расходом кокса. Особенность доменного процесса заключается в том, что топливо в нем выполняет разные функции: источник тепла, химический реагент восстановитель; кокс используется и на нижней части печи как насадка для

					270304.2020.401 ПЗ	Лист
						13
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

фильтрации расплава. Основная часть кокса, примерно 80%, сгорает у фурм, остальной кокс потребляется в процессах науглероживания и прямого восстановления чугуна. Эти разные функции кокса в доменном процессе необходимо учитывать и оценивать при управлении современной доменной плавкой [3,7].

Автоматизированный технологический комплекс доменной печи как объект управления характеризуется следующими основными признаками:

- большое количество контролируемых переменных;
- отсутствие возможности непосредственного контроля отдельных параметров (малая прозрачностью процесса выплавки чугуна);
- недостаточная точность и представительность результатов контроля параметров, определяющих ход доменной плавки;
- существенное запаздывание информации о составе продуктов плавки;
- наличие случайных помех различной природы и характера, снижающих качество информации.

При анализе работу доменной печи следует принимать как управляемую технологическую систему. Данную систему можно представить упрощенно, как на рисунке 3.

Выделяются три группы переменных:

- режимные;
- средние;
- внешние и внутренние.

Режимные – это параметры, показывающие средние значения контролируемых входных воздействий при состоянии установившегося технологического процесса.

Средние – это количественные и качественные показатели технологического процесса.

Внешние – это возмущения, приложенные на вход и выход, а внутренние – это возмущения, приложенные к состоянию процесса.

Показателями (целевая функция, Ц) технологической эффективности работы печи, технологического персонала и информационной системы являются удельный расход кокса, производительность печи, выход кондиционного чугуна по содержанию серы в чугуне, температура жидких продуктов плавки в соответствии с требованиями последующего сталеплавильного производства. При этом имеются ограничения (О) на технологию доменной плавки, иначе говоря снижение вероятности попадания процесса в критические области (аварийный режим).

Основная задача управления доменным процессом – стабилизация теплового состояния печи. Основные причины колебаний теплового состояния – это нестабильность качества шихты, колебания температуры дутья и его состава, неравномерность в распределении газов и материалов в печи. Обеспечение стабилизации теплового режима требует постоянного баланса основных параметров режима плавки [3].

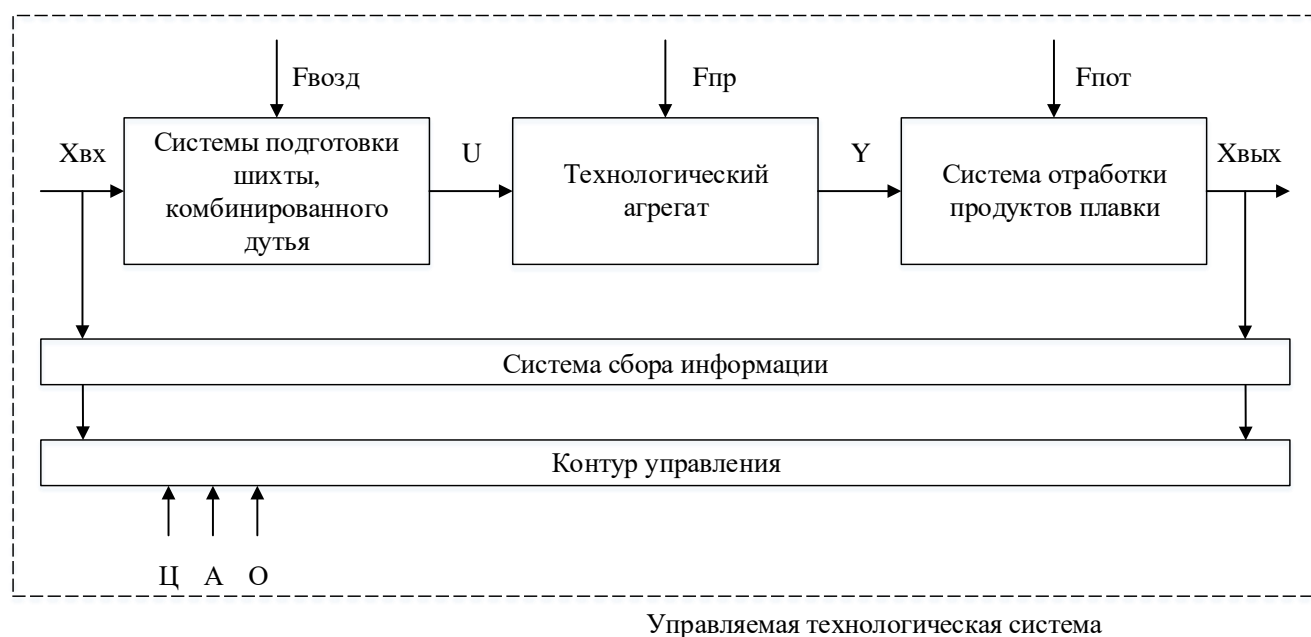


Рисунок 3 – Доменная печь как управляемая технологическая система

Пояснения к рисунку 3:

- Хвх, Хвых – показатели работы доменной печи;
- U – входные и управляющие воздействия;
- Y – выходные показатели;
- Fпр – неконтролируемые изменения характеристик внутри процесса;
- Fвозд – неконтролируемые изменения входных и управляющих воздействий;
- Fпот – потери чугуна со шлаком;
- Ц – целевая функция;
- А – алгоритм управления;
- О – ограничения.

Переходные процессы, полученные с действием возмущений, приводят к изменению теплового состояния и изменению состава конечного продукта. При этом объект управления доменная печь имеет большую инерционностью по большинству каналам воздействий (постоянная времени 2 – 6 часа), а запаздывание 6 – 8 часов. Так, после изменения состава шихты, переходный процесс идет в течении 15 – 17 часов. Эти факты сильно усложняют процесс управления. Компенсация колебаний химического состава чугуна достигается за счет изменения количества кокса или изменения температуры дутья. Значения управляющих воздействий определяется статическими и динамическими характеристиками процесса. Эти характеристики нелинейные и меняются при изменениях условий плавки, что требует соответствующую изменения управляющих воздействий.

Современная доменная печь это организованная управляемая интерактивная система. Состояние этой системы определяется законами физических процессов, происходящих в доменной печи, от технологий, зависящей от сырьевой базы и оборудования, которое включает системы подготовки шихты, дутья, отработки продуктов плавки, и способом управления.

					270304.2020.401 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		16

В связи с чем приходится анализировать не только процесс выплавки чугуна, но и функциональную систему с системами сбора информации с обратной связью. Под системой управления понимаются технические средства контроля и управления и участвующие технологи в управлении (лица которые принимающие решения) [3].

Конечная цель – создание системы управления доменным производством, которая обеспечивает стабильную работу доменного цеха, а также обеспечивает минимальную себестоимость продукта и учитывает различные технологические и экономические ограничения.

### 1.3 Принципы построения современной автоматизированной информационной системы доменной плавки

В настоящее время все доменные печи в той или иной мере оборудованы автоматизированной системой управления технологическим процессом (АСУ ТП), функциональные возможности которых варьируются от чисто информационных до прямого управления процессом.

Для создания таких систем используют 4 уровня автоматизированной системы:

- первый уровень (нижний): датчики, преобразователи, аппаратура ручного управления;
- второй уровень (уровень локального управления): ручное дистанционное управление и дублирующее цифровое;
- третий уровень (уровень цифрового локального управления): программно-логические регуляторы и совокупность микроЭВМ; позволяет действовать в полуавтоматическом режиме, оператор только дополнительно изменяет задания;
- четвертый уровень (верхний): непосредственно сбор, контроль и хранение информации с помощью управляющей вычислительной машины.



Автоматизация печей обычно содержит три функциональных уровня:

- нижний уровень: средства для автоматической диагностики и контроля входных, технологических и выходных параметров доменной печи;
- средний уровень: локальные системы регулирования, диагностики и стабилизации основных параметров;
- верхний уровень: подсистемы управления шихтовкой и дутьем и управления доменным процессом.

АСУ ТП доменного производства представляют собой сложные системы, различающиеся по структуре, назначению, целям и технологическим особенностям реализации. Развитие и совершенствование информационных функций АСУ ТП привело к созданию автоматизированных информационных систем технического обслуживания и управления (АИСТОУ). По решаемым задачам АСУ ТП доменной печи можно отнести к данному классу, ведь помимо традиционных функций к плавке относятся следующие приведенные задачи [3]:

- поиск аварийных ситуаций и необходимая сигнализация;
- диагностика оборудования, архивация данных о состоянии оборудования, архивация технологической информации, запись журнала событий;
- обеспечение доступа персонала к информации, создание суточных и различных документов.

АИСТОУ используют технологии открытых систем реального времени. Используют стандартные сетевые средства связи; программная совместимость с распространенными компьютерными платформами; значительные ресурсы для хранения данных.

### 1.3.1 Архитектура АИСТОУ

Автоматизированные информационные системы технического обслуживания и управления (АИСТОУ) включают в себя:

- распределенная подсистема контроля, сигнализации и локального управления;
- агрегатная подсистема;
- диспетчерская подсистема технологического персонала доменной печи;
- диспетчерская подсистема доменного цеха;
- инженерная подсистема;
- подсистема координации и управления информационной системой.

Распределенная подсистема контроля, сигнализации и локального управления (РСКУ) является нижнем уровнем АИСТОУ.

Ее функции:

- сбор данных от датчиков;
- предварительная обработка собранных данных;
- выработка и реализация ряда управляющих сигналов на основании анализа данных, получаемых от датчиков;
- наличие ручного управления;
- предоставление собираемых данных на диспетчерский уровень.

РСКУ формируется из датчиков, преобразователей, исполнительных механизмов, реагирующих органов и связанных с ними контроллеров. Этот уровень должен работать в реальном времени, т.к. все выше перечисленные средства должны обеспечивать возможность построения локальных контуров управления. Время реакции систем не должно превышать нескольких сотых секунд. Большие размеры доменной печи, значительные температуры, загазованность, перепады температуры окружающей среды, вибрации и прочее, предъявляют особые требования надежности средств данного уровня. Кроме того,

необходимо обеспечить возможность работы контроллеров в автономном режиме. Надежность оборудования проверяется наработкой на отказ свыше 5 лет (дольше 50000 часов) в непрерывном режиме работы.

#### 1.4 Влияние технологических параметров на эффективность доменной плавки

Под нормативной оценкой влияния параметров доменной плавки на расход кокса и производительность доменной печи понимается определение величин изменений расхода кокса и производительности при изменении отдельных параметров плавки и их совокупности. Наличие такой оценки необходимо для выполнения оперативного анализа технологии, результативность которого зависит от полноты и качества используемой информации [4].

Использование в течение многих лет для этих целей известного перечня технологических факторов и установленного эмпирически влияния каждого из них на расход кокса и производительность показало неоднозначность во многих случаях этого влияния и необходимость создания системной методики. Разработка такой методики начата в ИЧМ по заданию Минчермета СССР в начале 80-х годов прошлого века. После ряда обсуждений на предприятиях и в институтах отрасли методика была рассмотрена на Всесоюзных совещаниях доменщиков, после чего утверждена в качестве отраслевого директивного документа.

Методика предназначена для использования при анализе изменений удельного расхода кокса и производительности доменных печей под влиянием изменений технологических параметров доменной плавки. Такой анализ выполняется при сопоставлении периодов работы доменных печей с различными значениями технологических параметров доменной плавки, определяющими величины удельного расхода кокса и производительности (пофакторный анализ). В основе этого анализа лежат количественные соотношения между

изменившимися параметрами (факторами) и удельным расходом кокса (производительностью доменных печей), которые определяются эмпирически либо аналитически.

Чтобы понять, влияние действующих факторов на результаты доменной плавки, необходимо провести эксперименты и произвести расчеты по математическим моделям.

Снижение удельного расхода кокса и повышение производительности печи происходят за счет:

- снижения потребностей в тепле;
- введения дополнительных восстановителей и повышения их концентрации;
- введения дополнительного тепла или топлива в высокотемпературную зону;
- улучшения использования в печи тепловой и химической энергии газа;
- уменьшения взаимосопротивления шихты и газов их движению в противотоке.

Для положительного эффекта от некоторых мероприятий требуется одновременно использовать другие. Например, для снижения расхода кокса увеличением расхода природного газа необходимо повышать содержание кислорода в дутье или его температуру, снизив влажность дутья. Для реализации преимуществ повышенного давления газов на колошнике необходимо изменением режима загрузки повышать равномерность распределения шихтовых материалов по сечению и увеличивать интенсивность подачи дутья [5].

На результаты доменной плавки влияют качество шихты, параметры дутья, состав и свойства продуктов плавки, режим загрузки и выпуска и др.

					270304.2020.401 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		21

#### 1.4.1 Показатели качества шихты

На результат доменной плавки влияют многие показатели качества шихты.

Перечислим основные:

- содержание железа;
- прочность, гранулометрический состав и содержание мелочи;
- основность (отношение основных оксидов к кислотным);
- кремниевый модуль (отношение  $\text{SiO}_2 / \text{Al}_2\text{O}_3$ );
- содержание вредных и полезных примесей;
- колеблемость состава и свойств.

Основными направлениями снижения удельного расхода кокса и повышения производительности печей в современных условиях служат снижение содержания мелочи в компонентах шихты и повышение в них содержания железа.

#### 1.4.2 Параметры дутья

Основные характеристики дутьевого режима доменной плавки:

- расход, температура, давление и влажность дутья;
- расход топливных добавок (коксового газа, природного газа, жидкого топлива и др.);
- содержание кислорода в дутье.

Основным направлением улучшения результатов доменной плавки в современных условиях служит увеличение температуры дутья, расхода природного газа и концентрации кислорода в дутье.

#### 1.4.3 Состав чугуна

Выплавляемый в доменных печах металл представляет собой в основном передельный чугун. Доля его в целом по металлургической отрасли России составляет около 95%, доля литейного чугуна близка к 5%, а ферросплавов – к 0,5%.

					270304.2020.401 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		22

Состав чугуна влияет на результаты плавки как непосредственно, так и через изменение количества шлака и сырого флюса. Непосредственное влияние включает изменение потребностей в тепле и углерода на восстановление примесей, температурного режима процесса, содержания углерода в чугуне, взаимосопротивления шихты и газов.

					270304.2020.401 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		23

## 2 КОНЦЕПЦИЯ ПОСТРОЕНИЯ УРОВНЯ ОПТИМАЛЬНОГО ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ АГЛО-КОКСО-ДОМЕННЫМ ПРОИЗВОДСТВОМ

Представим структуру задачи оптимального технико-экономического управления агло-коксо-доменным производством (рисунок 4). Допустим наша работа введется с двумя доменными печами.

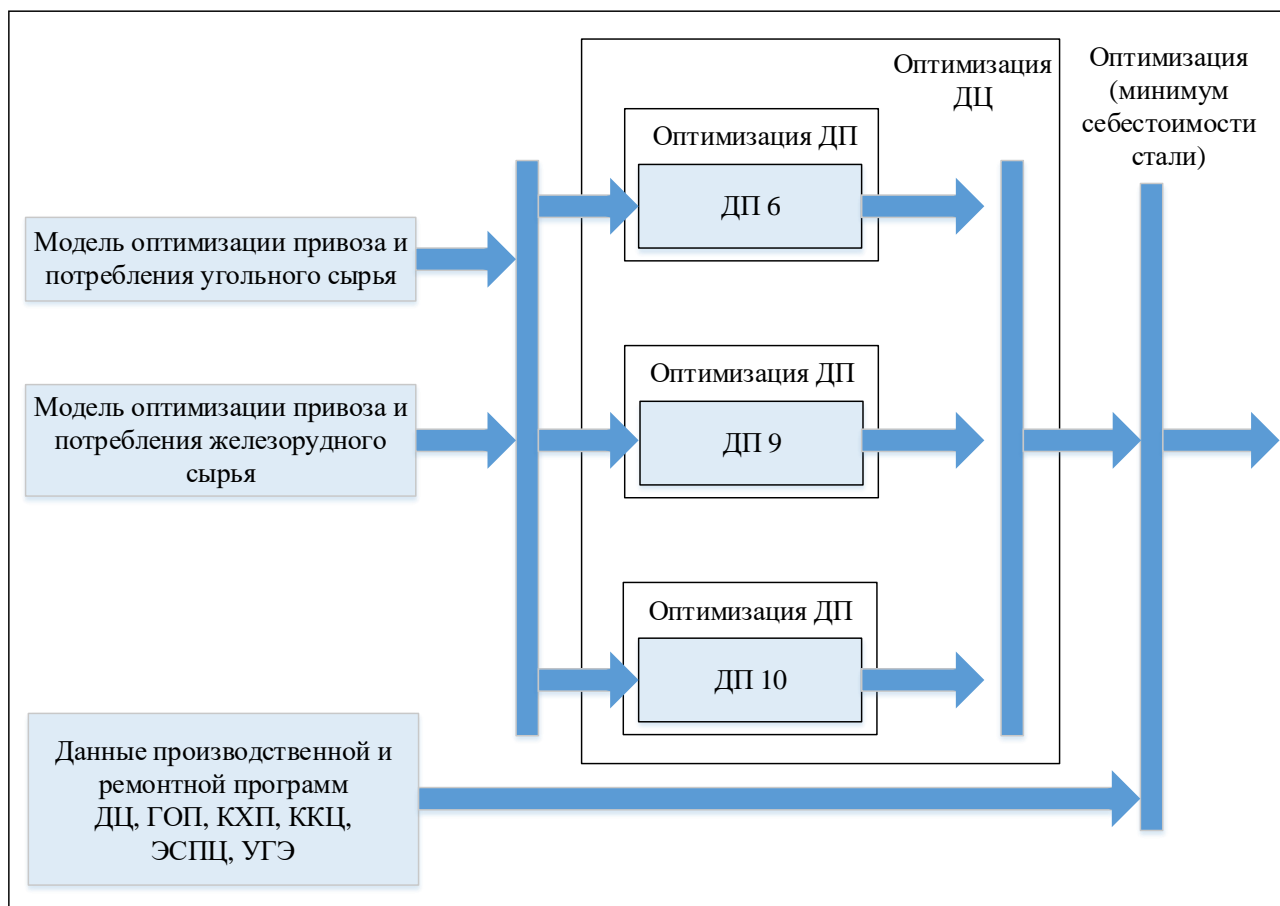


Рисунок 4 – Структура задачи оптимального технико-экономического управления агло-коксо-доменного производства

Входные параметры:

- структура, качество и стоимость закупаемого железорудного сырья;
- структура, качество и стоимость угольного сырья;
- стоимость лома;
- параметры горячего дутья;
- данные производственной и ремонтной программ доменного цеха (ДЦ), горно-обогажительного производства (ГОП), коксохимического производства (КХП), кислородно-конвертерного цеха (ККЦ), электросталеплавильного цеха (ЭСПЦ), управления главного энергетика (УГЭ).

Выходные параметры:

- показатели качества кокса;
- состав железорудного сырья;
- параметры горячего дутья;
- технологические ограничения.

Критериями оптимального технико-экономического управления агло-коксо-доменным производством должны являться:

- а) минимум себестоимости производства чугуна;
- б) минимум себестоимости производства стали в ККЦ и ЭСПЦ.

Основными задачами разработки технико-экономического уровня считаются:

1. Анализ и подготовка статистических данных.
2. Описание существующих технологических ограничений.
3. Разработка алгоритма решения оптимизационной задачи повышения эффективности производства чугуна в доменном цехе.
4. Разработка алгоритма решения оптимизационных задач оптимального технико-экономического управления агло-коксо-доменным производством по критерию минимума себестоимости производства чугуна.

						270304.2020.401 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата			25



5. Разработка алгоритма решения оптимизационных задач оптимального технико-экономического управления агло-коксо-доменным производством по критерию минимума себестоимости производства стали.

6. Реализация оптимизационной модели в среде программирования R.

В работе проведен анализ режимов работы доменной печи в зависимости от содержания технологических параметров работы.

Рассматривались агрегированные по пятидневкам статистические данные работы доменной печи, с учетом простоев (были исключены сутки до и трое после простоя). Разбиение на режимы работы проводилось с учетом представленных в таблице 1 технологических параметров.

Таблица 1 – Технологические параметры, участвующие в определении рабочих режимов доменной печи

1	Производительность чугуна, т/сут
2	Удельный расход кокса, кг/т
3	Расход холодного дутья, м <sup>3</sup> /ч
4	Температура горячего дутья, С <sup>0</sup>
5	Расход пара на увлажнение, т/час
6	Расход природного газа, м <sup>3</sup> /ч
7	Температура природного газа, С <sup>0</sup>
8	Содержание О <sub>2</sub> в дутье, %
9	Перепад давлений общий, ат.
10	Давление колошникового газа, ат.
11	Содержание в чугуне Mn, %
12	Содержание в чугуне Si, %
13	Содержание в шлаке Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , %
14	Содержание в шлаке FeO, %
15	Истираемость кокса по показателю M10, %

Окончание таблицы 1

16	Дробимость M25, %
17	Содержание золы, %
18	Содержания в коксе фракции +80 мм, %
19	Содержание С в коксе, %
20	Реакционная прочность (CRI), %
21	Горячая прочность (CSR), %
22	Содержание Fe в агломерате, %
23	Основность агломерата, д.е.
24	Содержание Zn в агломерате, %
25	Содержание фракции 5-0 в агломерате, %
26	Доля агломерата рудной шихты
27	Доля Михайловских окатышей в шихте
28	Доля Соколовских окатышей в шихте
29	Содержание Ti в чугуне, %

### 3.1 Анализ режимов работы доменной печи

#### 3.1.1 Анализ режимов работы доменной печи по содержанию в коксе фракции +80 мм

Для примера проведем анализ режима работы доменной печи по содержанию в коксе фракции +80 мм.

В таблице 2 приведены коэффициенты влияния содержания в коксе фракции +80 мм на производительность и удельный расход кокса. Рассчитанные коэффициенты представлены в таблице в условных единицах измерения, а также в процентном соотношении. Зная среднее значение процентных соотношений по изменениям производительности и удельного расхода кокса, можно сравнить полученные нами значения с известными и ранее выведенными коэффициентами Товаровского И. Г [4]. В таблице данное значение помечено звездочкой (\*).

Диапазоны изменения технологических параметров работы доменной печи, в которых применимы коэффициент влияния содержания в коксе фракции +80 мм на удельный расход кокса и производительность приведены в таблице А.1.

Средние значения технологических параметров для режимов работы доменной печи в зависимости от содержания в коксе фракции +80 мм приведены в таблице А.2.

В результате проделанной работы получены режимы работы доменной печи в зависимости от содержания в коксе фракции +80 мм. Найдены коэффициенты влияния содержания в коксе фракции +80 мм на производительность и удельный расход кокса.

Графическое представление режимов работы доменной печи в зависимости от содержания в коксе фракции +80 мм на производительность и удельный расход кокса представлено на рисунках 5 и 6. Диапазоны применимости коэффициентов влияния производительности и удельного расхода кокса в зависимости от содержания в коксе фракции +80 мм, а также их средние значения, использующие для построения графиков приведены в таблице 3.

Таблица 2 – Коэффициенты влияния технологических параметров для режимов работы доменной печи

Режим работы	Изменение производительности т/сут при увеличении содержания в коксе фракции +80 мм на 1%	Изменение удельного расхода кокса кг/т при увеличении содержания в коксе фракции +80 мм на 1%	Изменение производительности % при увеличении содержания в коксе фракции +80 мм на 1%	Изменение удельного расхода кокса % при увеличении содержания в коксе фракции +80 мм на 1%
1	-8,33	0,84	-0,17	0,19
2	-7,92	1,01	-0,16	0,22
3	-7,94	0,86	-0,16	0,19
4	-11,16	0,72	-0,21	0,17

Окончание таблицы 2

Режим работы	Изменение производительности т/сут при увеличении содержания в коксе фракции +80 мм на 1%	Изменение удельного расхода кокса кг/т при увеличении содержания в коксе фракции +80 мм на 1%	Изменение производительности % при увеличении содержания в коксе фракции +80 мм на 1%	Изменение удельного расхода кокса % при увеличении содержания в коксе фракции +80 мм на 1%
5	-11,22	0,86	-0,22	0,20
6	-10,61	0,82	-0,21	0,20
7	-9,47	0,82	-0,18	0,20
<b>Среднее</b>	<b>-9,52</b>	<b>0,85</b>	<b>-0,19</b>	<b>0,20</b>
*			<b>-0,20</b>	<b>0,20</b>

Таблица 3 – Диапазоны применимости коэффициентов влияния технологических параметров и их средние значения для режимов работы доменной печи

Режим работы доменной печи	Диапазоны применимости коэффициентов влияния технологических параметров для режимов работы доменной печи		Средние значения технологических параметров для режимов работы доменной печи в зависимости от содержания в коксе фракции +80 мм	
	Производительность чугуна, т/сут	Удельный расход кокса, кг/т	Производительность чугуна, т/сут	Удельный расход кокса, кг/т
1	4742 – 5313	401 – 477	4977	437
2	4815 – 5313	425 – 485	5012	449
3	4774 – 5325	410 – 476,9	5100	443
4	4944 – 5436	413 – 460	5243	432

Окончание таблицы 3

Режим работы доменной печи	Диапазоны применимости коэффициентов влияния технологических параметров для режимов работы доменной печи		Средние значения технологических параметров для режимов работы доменной печи в зависимости от содержания в коксе фракции +80 мм	
	Производительность чугуна, т/сут	Удельный расход кокса, кг/т	Производительность чугуна, т/сут	Удельный расход кокса, кг/т
5	4673 – 5418	407 – 472	5142	441
6	4633 – 5459	394 – 431	5140	409
7	4750 – 5482	389 – 444	5261	414

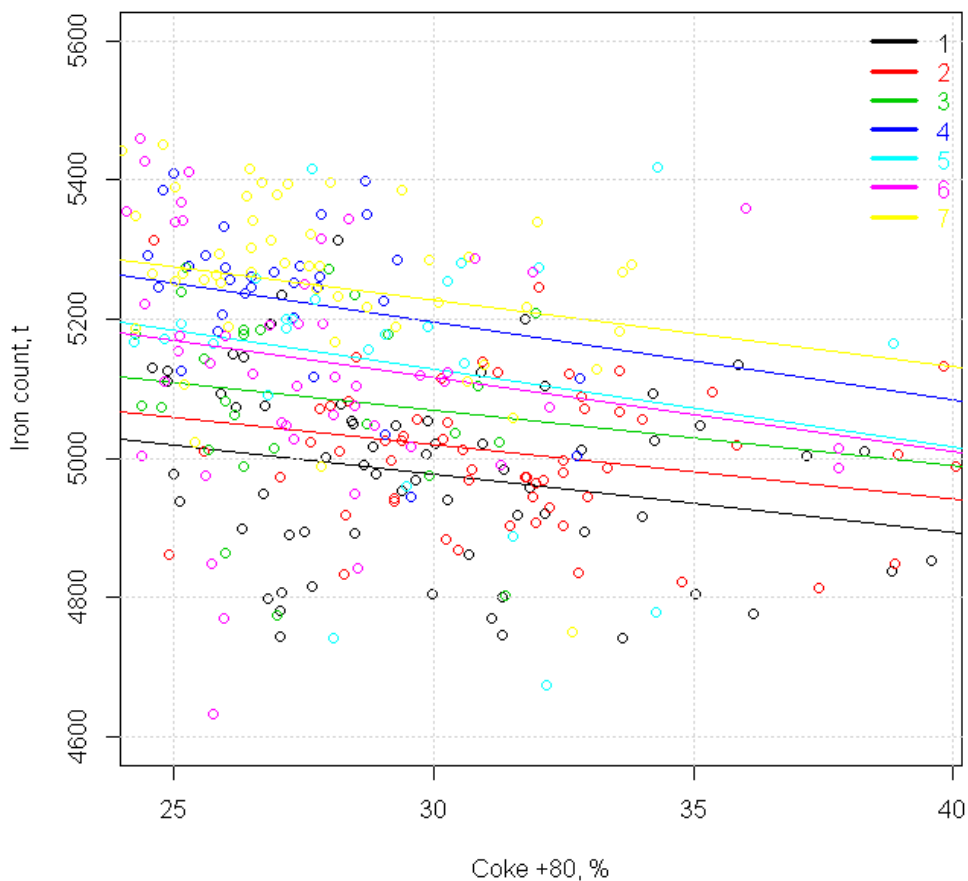


Рисунок 5 – Графическое представление режимов работы доменной печи в зависимости от содержания в коксе фракции +80 мм на производительность

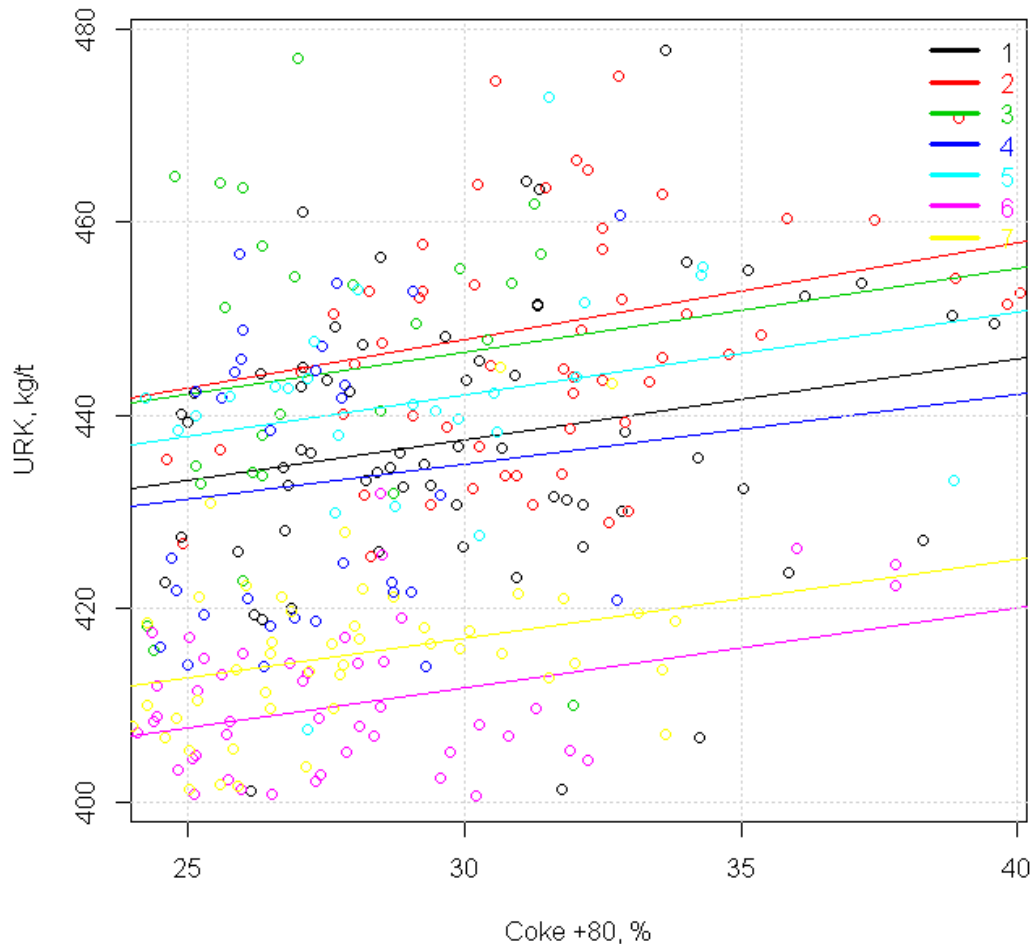


Рисунок 6 – Графическое представление режимов работы доменной печи в зависимости от содержания в коксе фракции +80 мм на удельный расход кокса

### 3.1.2 Анализ режимов работы доменной печи по влажности дутья

Для примера проведем анализ режима работы доменной печи по влажности дутья.

В таблице 4 приведены коэффициенты влияния влажности дутья на производительность и удельный расход кокса. Рассчитанные коэффициенты представлены в таблице в условных единицах измерения, а также в процентном соотношении. Зная среднее значение процентных соотношений по изменениям производительности и удельного расхода кокса, можно сравнить полученные нами значения с известными и ранее выведенными коэффициентами Товаровского И. Г [4]. В таблице данное значение помечено звездочкой (\*).

Диапазоны изменения технологических параметров работы доменной печи, в которых применимы коэффициент влияния влажности дутья на удельный расход кокса и производительность представлены в таблице Б.1.

Средние значения технологических параметров для режимов работы доменной печи в зависимости от влажности дутья приведены в таблице Б.2.

В результате проделанной работы получены режимы работы доменной печи в зависимости от влажности дутья. Найдены коэффициенты влияния влажности дутья на производительность и удельный расход кокса.

Графическое представление режимов работы доменной печи в зависимости от влажности дутья на производительность и удельный расход кокса представлено на рисунках 7 и 8. Диапазоны применимости коэффициентов влияния производительности и удельного расхода кокса в зависимости от влажности дутья, а также их средние значения, использующие для построения графиков приведены в таблице 5.

Таблица 4 – Коэффициенты влияния технологических параметров для режимов работы доменной печи

Режим работы	Изменение производительности т/сут при увеличении влажности дутья на 1 г/м <sup>3</sup>	Изменение удельного расхода кокса кг/т при увеличении влажности дутья на 1 г/м <sup>3</sup>	Изменение производительности % при увеличении влажности дутья на 1 г/м <sup>3</sup>	Изменение удельного расхода кокса % при увеличении влажности дутья на 1 г/м <sup>3</sup>
1	-3,25	0,6	-0,06	0,14
2	-3,06	0,64	-0,06	0,14
3	-3,61	0,55	-0,07	0,12
4	-3,28	0,63	-0,06	0,14
5	-3,32	0,57	-0,06	0,13
6	-4,15	0,6	-0,08	0,14
<b>Среднее</b>	<b>-3,45</b>	<b>0,60</b>	<b>-0,07</b>	<b>0,14</b>
*			<b>-0,07</b>	<b>0,15</b>

Таблица 5 – Диапазоны применимости коэффициентов влияния технологических параметров и их средние значения для режимов работы доменной печи

Режим работы доменной печи	Диапазоны применимости коэффициентов влияния технологических параметров для режимов работы доменной печи		Средние значения технологических параметров для режимов работы доменной печи в зависимости от содержания в коксе фракции +80 мм	
	Производительность чугуна, т/сут	Удельный расход кокса, кг/т	Производительность чугуна, т/сут	Удельный расход кокса, кг/т
1	4656,01 – 5443,01	421,76 – 454,99	5224,26	437,16
2	4802,54 – 5325,81	415,73 – 477,88	5064,73	452,15
3	4730,08 – 5472,5	401,05 – 466,35	5195,92	441,53
4	4607,46 – 5403,47	412,88 – 453,23	5105,35	434,84
5	4942,74 – 5544,02	389,95 – 444,93	5231,22	424,76
6	4760,09 – 5459,01	404,72 – 469,11	5163,18	427,80



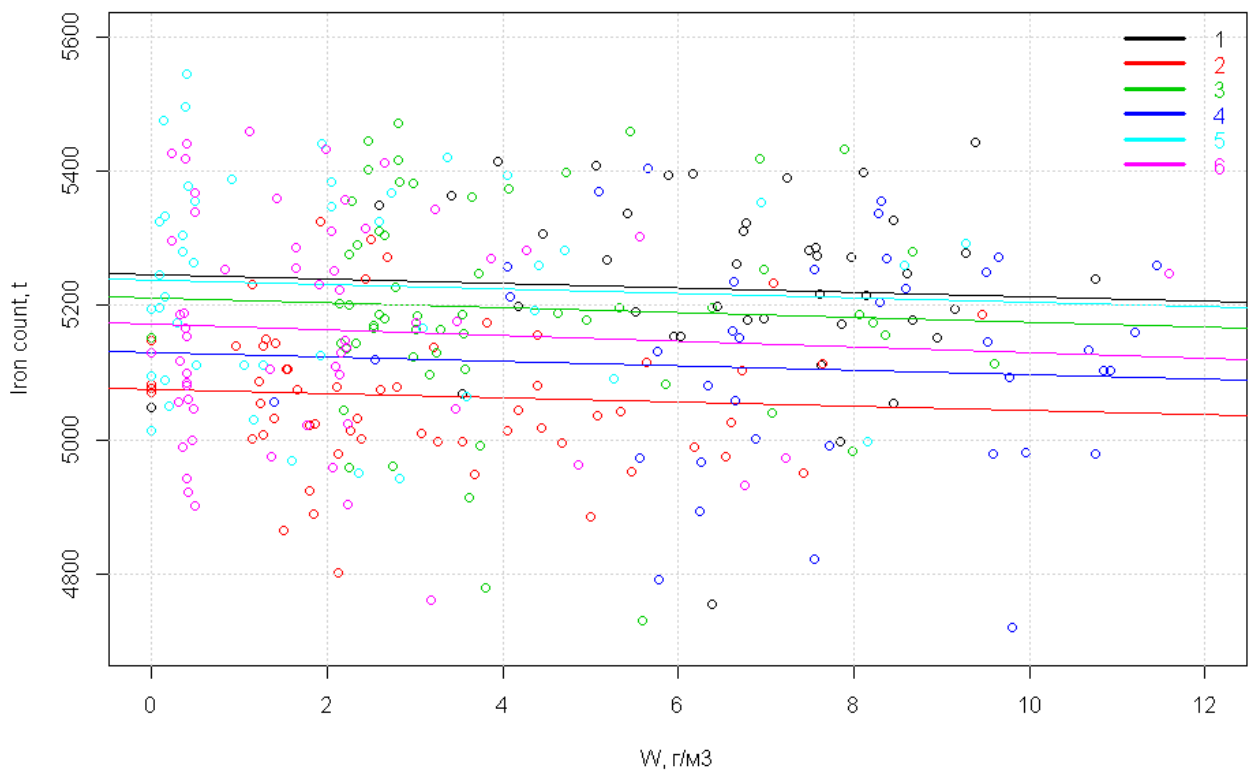


Рисунок 7 – Графическое представление режимов работы доменной печи в зависимости от влажности дутья на производительность

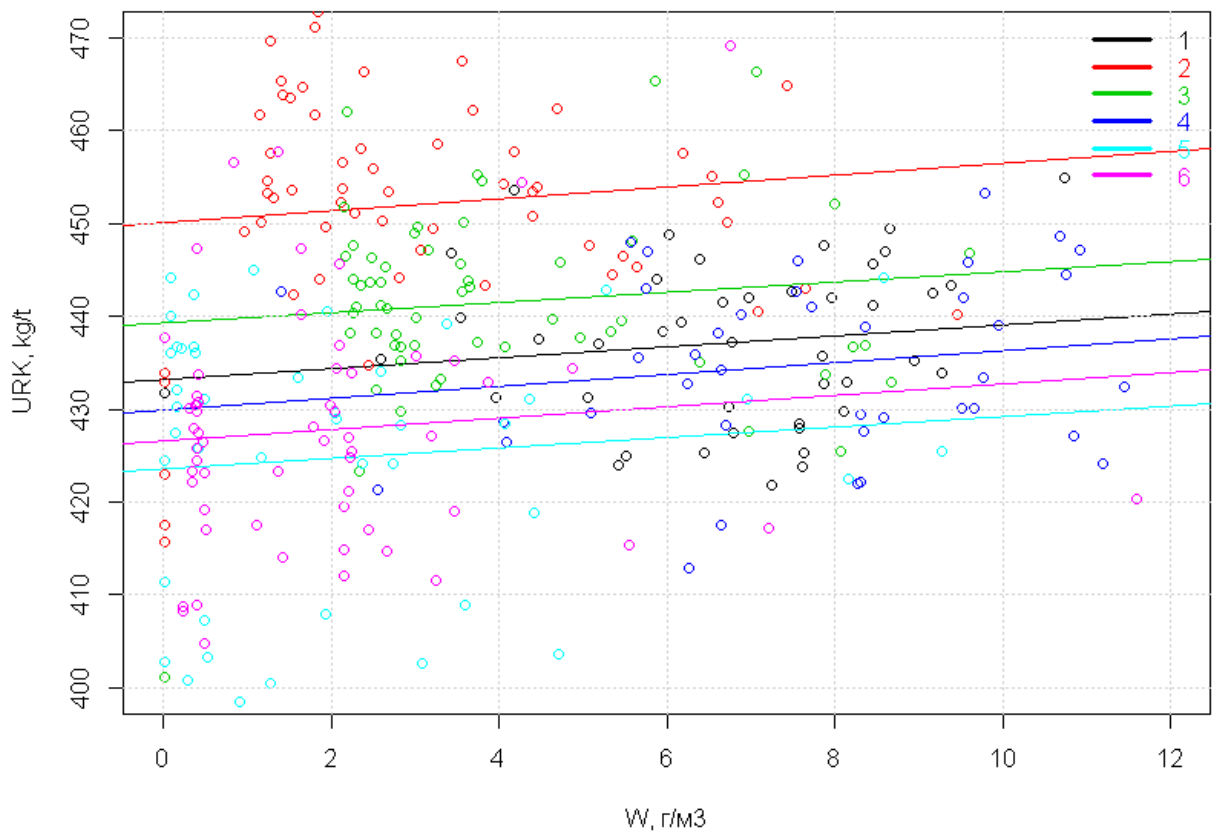


Рисунок 8 – Графическое представление режимов работы доменной печи в зависимости от влажности дутья на удельный расход кокса

## 3 РАЗРАБОТКА ЭКСПЕРТНОЙ СИСТЕМЫ

### 3.1 Оптимизация технологических параметров

Ранее в таблице 1 были приведены технологические параметры, участвующие в определении рабочих режимов доменной печи. Все параметры можно поделить на две группы: известные, получаемые от предприятия, и расчетные, вычисляемые по формулам. При вычислениях необходимо знать все коэффициенты влияния технологических параметров для режима работы доменной печи.

Данные коэффициенты находятся путем кластерного анализа (или кластеризация). Задачей кластерного анализа является разбиение множества объектов на группы, называемые кластеры. Внутри каждой из групп должны быть «похожие» объекты, а объекты разных групп должны быть как можно более отличны друг от друга [6].

Кластерный анализ состоит из следующих этапов:

- отбор выборки объектов для кластеризации;
- определение множества переменных, по которым будут оцениваться объекты в выборке;
- вычисление значений меры сходства между объектами;
- применение метода кластерного анализа для создания групп сходных объектов (кластеров);
- представление результатов анализа.

После завершения кластерного анализа и получения результатов возможна корректировка выбранной метрики до получения оптимального результата.

По всем известным входным технологическим параметрам (прочность на истирание (M10), содержание в коксе фракции +80 мм, содержание золы и т.д.) производится кластерный анализ. Кластерный анализ представляет собой зависимость изменений производительности и изменений удельного расхода

кокса от входных параметров. В результате анализа получаем коэффициенты влияния каждого технологического параметра. При помощи известных коэффициентов произведем необходимые технико-экономические расчеты.

Входные параметры обновляются через определенный период времени, обрабатываются и в дальнейшем участвуют в вычислениях. Наиболее подходящей средой программирования является язык программирования R. R – язык программирования для статической обработки данных и работы с графикой, а также свободная программная среда вычислений с открытым исходным кодом в рамках проекта GNU.

Для хранения всех данных по печи и цеху существует таблица. В ней хранятся значения параметров, позволяющие произвести все необходимые расчеты, а также минимальные и максимальные значения величин для оптимизации. Значения параметров делятся на две группы, первая (табл.) – это значения, меняющиеся при запуске или обновлении таблицы в связи с изменением периода, вторая (изм.) – это значения, которые мы можем изменить с помощью слайдеров. До оптимизации значения измененных переменных приравнены к табличным значениям.

Все расчетные факторы зависят от одного или нескольких параметров, которые нам известны и обновляются после определенного периода (неделя).

Перечислим эти параметры:

- прочность на истирание (M10), %;
- содержание в коксе фракции +80 мм, %;
- содержание золы, %;
- доля агломерата в ЖРС, д.е.;
- содержание фракции 5-0 в агломерате, %;
- содержание Fe в агломерате, %;
- содержание кислорода в дутье, %;
- пар на увлажнение, г/м<sup>3</sup>;
- расход холодного дутья, м<sup>3</sup>/ч.

Представим расчет каждого технологического параметра. Покажем формулу, по которой происходит вычисление, и дадим описание, как записан параметр в программе.

Список технологических параметров представлен в листинге 1.

### Листинг 1 – Список технологических параметров

```

table = data.frame(
  name=c("Прочность на истирание (M10), %", #1
        "Изменение прочности на истирание (M10), %", #2
        "Кокс +80, %", #3
        "Зола в коксе, %", #4
        "Доля агломерата в ЖРС, д.е.", #5
        "Изменение доли агломерата в ЖРС, д.е.", #6
        "Фракция 5-0, %", #7
        "Fe агло., %", #8
        "Содержание кислорода в дутье, %", #9
        "Пар на увлажнение, г/м3", #10
        "Удельный расход природного газа, м3/т", #11
        "Изменение УРК, кг/т", #12
        "Изменение производительности, т/сут", #13
        "Изменение стоимости угольной шихты, руб/т", #14
        "Изменение стоимости ЖРС, руб/т", #15
        "Изменение себестоимости чугуна, руб/т", #16
        "Изменение себестоимости стали, руб/т", #17
        "Изменение содержания кислорода в дутье, %", #18
        "Изменение удельного расхода природного газа, м3/т", #19
        "Расход холодного дутья, тыс. м3/ч", #20
        "Изменение расхода холодного дутья, тыс. м3/ч", #21
        "Изменение УРК по M10", #22
        "Изменение УРК по кокс +80", #23
        "Изменение УРК по золе в коксе", #24
        "Изменение УРК по Д.Агло.", #25
        "Изменение УРК по фракции 5-0", #26
        "Изменение УРК по Fe агло.", #27
        "Изменение УРК по пару на увлажнение", #28
        "Изменение УРК по ПГ/O2", #29
        "Изменение производства чугуна по M10", #30
        "Изменение производства чугуна по кокс +80", #31
        "Изменение производства чугуна по золе в коксе", #32
        "Изменение производства чугуна по Д.Агло.", #33
        "Изменение производства чугуна по фракции 5-0", #34
        "Изменение производства чугуна по Fe агло.", #35
        "Изменение производства чугуна по пару на увлажнение", #36
        "Изменение производства чугуна по ПГ/O2" #37
  ),

```

### 3.1.1 Изменение прочности на истирание (M10)

Значение прочности на истирание (M10) является входным технологическим параметром, обновляемый каждый определенный период времени. Вычисляется как разность между известным табличным значением прочности на истирание (M10) и ее измененным значением:

$$\Delta M10 = M10_{\text{табл}} - M10_{\text{изм.}} \quad (1)$$

Код программы приведен в листинге 2. Изменение прочности на истирание (M10) – переменная ID\_DELTA\_M10.

#### Листинг 2 – Вычисление изменений прочности на истирание (M10)

```
ID_DELTA_M10 = 2  
table[ID_DELTA_M10, 'ДП'] = -round2(Table_sliders['M10',  
    'value_bf'] - Table_sliders['M10', 'simul_bf'],2)  
table[ID_DELTA_M10, 'ДЦ'] = -round2(Table_sliders['M10',  
    'value_bf_shop'] - Table_sliders['M10', 'simul_bf_shop'],2)
```

### 3.1.2 Изменение доли агломерата в железорудном сырье

Значение доли агломерат является входным технологическим параметром, обновляемый каждый определенный период времени. Вычисляется как разность между известным табличным значением доли агломерата в железорудном сырье и ее измененным значением:

$$\Delta DA = DA_{\text{табл}} - DA_{\text{изм.}} \quad (2)$$

Код программы приведен в листинге 3. Изменение доли агломерата в железорудном сырье – переменная ID\_DELTA\_DA.

### Листинг 3 – Вычисление изменений доли агломерата в железорудном сырье

```
ID_DELTA_DA = 6
table[ID_DELTA_DA, 'ДП'] = -round2(Table_sliders['Д.Агл.',
'value_bf'] - Table_sliders['Д.Агл.', 'simul_bf'], 2)
table[ID_DELTA_DA, 'ДЦ'] = -round2(Table_sliders['Д.Агл.',
'value_bf_shop'] - Table_sliders['Д.Агл.', 'simul_bf_shop'], 3)
```

#### 3.1.3 Удельный расход природного газа

Удельный расход природного газа вычисляется как частность между природным газом (PG) и производством чугуна (Iron\_mean). Природный газ измеряется в м<sup>3</sup>/ч, а производство чугуна – т/сут, для вычисления необходимо значение природного газа умножить на 24:

$$PG_{уд} = \frac{PG \cdot 24}{Iron\_mean}, \quad (3)$$

где значение производства чугуна (Iron\_mean) печи известно.

Подставив известное значение, получим:

$$PG_{уд} = \frac{PG \cdot 24}{3703,353}$$

Код программы для вычисления удельного расхода природного газа приведен в листинге 4.

#### Листинг 4 – Вычисление удельного расхода природного газа

```
table[11, 'ДП'] = round(Table_sliders[9, 'simul_bf'] * 24 /
    Iron_mean[1])
table[11, 'ДЦ'] = round(Table_sliders[9, 'simul_bf_shop'] * 24 /
    mean(Iron_mean))
```

### 3.1.4 Изменение удельного расхода кокса

Значение изменений удельного расхода кокса зависит от многих технологических параметров. Общее изменение удельного расхода кокса вычисляется как разность между измененным значением и табличным. Табличным значением считается сумма всех известных технологических параметров, умноженных на коэффициент влияния.

$$\Delta URK = URK_{\text{изм}} - URK_{\text{табл.}} \quad (4)$$

При вычислениях используются коэффициенты влияния технологических параметров на определенный фактор (листинг 5).

Вычисление изменений удельного расхода кокса по одному из технологических параметров представлено в п. 3.1.12 – 3.1.19.

#### Листинг 5 – Расчет изменения удельного расхода кокса

```
URK_value = sum(  
    bf_models_M10_URK[[1]]$coefficients[1] +  
    bf_models_M10_URK[[1]]$coefficients[2] *  
        Table_sliders['M10', 'value_bf'],  
    bf_models_aglo_URK[[1]]$coefficients[1] +  
    bf_models_aglo_URK[[1]]$coefficients[2] *  
        Table_sliders['Д.Агл.', 'value_bf'],  
    bf_models_ash_URK[[1]]$coefficients[1] +  
    bf_models_ash_URK[[1]]$coefficients[2] *  
        Table_sliders['Зола в коксе', 'value_bf'],  
    bf_models_coke80_URK[[1]]$coefficients[1] +  
    bf_models_coke80_URK[[1]]$coefficients[2] *  
        Table_sliders['Кокс +80', 'value_bf'],  
    bf_models_p0_5_URK[[1]]$coefficients[1] +  
    bf_models_p0_5_URK[[1]]$coefficients[2] *  
        Table_sliders['Фракция 5-0', 'value_bf'],  
    bf_models_Fe_URK[[1]]$coefficients[1] +  
    bf_models_Fe_URK[[1]]$coefficients[2] *  
        Table_sliders['Fe агло.', 'value_bf'],  
    bf_models_W_URK[[1]]$coefficients[1] +  
    bf_models_W_URK[[1]]$coefficients[2] *  
        Table_sliders['Влажность', 'value_bf'],  
    bf_models_PG_O2_URK[[1]]$coefficients[1] +  
    bf_models_PG_O2_URK[[1]]$coefficients[2] *  
        (Table_sliders['ПГ', 'value_bf'] /
```



## Окончание листинга 5

```

        (Table_sliders['O2', 'value_bf'] * 0.01 *
        Table_sliders['RHD', 'value_bf'])) +
bf_models_PG_O2_URK[[1]]$coefficients[3] *
        (Table_sliders['ПГ', 'value_bf'] /
        (Table_sliders['O2', 'value_bf'] * 0.01 *
        Table_sliders['RHD', 'value_bf'])) ^ 2,
na.rm = T
)

URK_simul = sum(
bf_models_M10_URK[[i]]$coefficients[1] +
bf_models_M10_URK[[i]]$coefficients[2] *
        Table_sliders['M10', 'simul_bf'],
bf_models_aglo_URK[[i]]$coefficients[1] +
bf_models_aglo_URK[[i]]$coefficients[2] *
        Table_sliders['Д.Арл.', 'simul_bf'],
bf_models_ash_URK[[i]]$coefficients[1] +
bf_models_ash_URK[[i]]$coefficients[2] *
        Table_sliders['Зола в коксе', 'simul_bf'],
bf_models_coke80_URK[[i]]$coefficients[1] +
bf_models_coke80_URK[[i]]$coefficients[2] *
        Table_sliders['Кокс +80', 'simul_bf'],
bf_models_p0_5_URK[[i]]$coefficients[1] +
bf_models_p0_5_URK[[i]]$coefficients[2] *
        Table_sliders['Фракция 5-0', 'simul_bf'],
bf_models_Fe_URK[[i]]$coefficients[1] +
bf_models_Fe_URK[[i]]$coefficients[2] *
        Table_sliders['Fe арло.', 'simul_bf'],
bf_models_W_URK[[i]]$coefficients[1] +
bf_models_W_URK[[i]]$coefficients[2] *
        Table_sliders['Влажность', 'simul_bf'],
bf_models_PG_O2_URK[[i]]$coefficients[1] +
bf_models_PG_O2_URK[[i]]$coefficients[2] *
        (Table_sliders['ПГ', 'simul_bf'] /
        (Table_sliders['O2', 'simul_bf'] * 0.01 *
        Table_sliders['RHD', 'simul_bf'])) +
bf_models_PG_O2_URK[[i]]$coefficients[3] *
        (Table_sliders['ПГ', 'simul_bf'] /
        (Table_sliders['O2', 'simul_bf'] * 0.01 *
        Table_sliders['RHD', 'simul_bf'])) ^ 2,
na.rm = T
)

Table_sliders['URK', 'simul_bf'] = URK_simul - URK_value

```

### 3.1.5 Изменение производства чугуна

Значение изменений производства чугуна зависит от многих технологических параметров. Общее изменение производства чугуна вычисляется как разность между измененным значением и табличным. Табличным значением считается сумма всех известных технологических параметров, умноженных на коэффициент влияния.

$$\Delta \text{IRON} = \text{IRON}_{\text{изм}} - \text{IRON}_{\text{табл}} \quad (5)$$

При вычислениях используются коэффициенты влияния технологических параметров на определенный фактор (листинг 6).

Вычисление изменений производства чугуна по одному из технологических параметров представлено в п. 3.1.20 – 3.1.27.

#### Листинг 6 – Расчет изменения производства чугуна

```
Iron_value = sum(  
  bf_models_M10_Iron[[1]]$coefficients[1] +  
  bf_models_M10_Iron[[1]]$coefficients[2] *  
    Table_sliders['M10', 'value_bf'],  
  bf_models_aglo_Iron[[1]]$coefficients[1] +  
  bf_models_aglo_Iron[[1]]$coefficients[2] *  
    Table_sliders['Д.Агл.', 'value_bf'],  
  bf_models_ash_Iron[[1]]$coefficients[1] +  
  bf_models_ash_Iron[[1]]$coefficients[2] *  
    Table_sliders['Зола в коксе', 'value_bf'],  
  bf_models_coke80_Iron[[1]]$coefficients[1] +  
  bf_models_coke80_Iron[[1]]$coefficients[2] *  
    Table_sliders['Кокс +80', 'value_bf'],  
  bf_models_p0_5_Iron[[1]]$coefficients[1] +  
  bf_models_p0_5_Iron[[1]]$coefficients[2] *  
    Table_sliders['Фракция 5-0', 'value_bf'],  
  bf_models_Fe_Iron[[1]]$coefficients[1] +  
  bf_models_Fe_Iron[[1]]$coefficients[2] *  
    Table_sliders['Fe агло.', 'value_bf'],  
  bf_models_W_Iron[[1]]$coefficients[1] +  
  bf_models_W_Iron[[1]]$coefficients[2] *  
    Table_sliders['Влажность', 'value_bf'],  
  bf_models_PG_O2_Iron[[1]]$coefficients[1] +  
  bf_models_PG_O2_Iron[[1]]$coefficients[2] *  
)
```

## Окончание листинга 6

```

        (Table_sliders['ПГ', 'value_bf'] /
        (Table_sliders['O2', 'value_bf'] * 0.01 *
        Table_sliders['RHD', 'value_bf'])) +
bf_models_PG_O2_Iron[[1]]$coefficients[3] *
        (Table_sliders['ПГ', 'value_bf'] /
        (Table_sliders['O2', 'value_bf'] * 0.01 *
        Table_sliders['RHD', 'value_bf'])) ^ 2,
na.rm = T
)

Iron_simul = sum(
  bf_models_M10_Iron[[i]]$coefficients[1] +
  bf_models_M10_Iron[[i]]$coefficients[2] *
    Table_sliders['M10', 'simul_bf'],
  bf_models_aglo_Iron[[i]]$coefficients[1] +
  bf_models_aglo_Iron[[i]]$coefficients[2] *
    Table_sliders['Д.Агл.', 'simul_bf'],
  bf_models_ash_Iron[[i]]$coefficients[1] +
  bf_models_ash_Iron[[i]]$coefficients[2] *
    Table_sliders['Зола в коксе', 'simul_bf'],
  bf_models_coke80_Iron[[i]]$coefficients[1] +
  bf_models_coke80_Iron[[i]]$coefficients[2] *
    Table_sliders['Кокс +80', 'simul_bf'],
  bf_models_p0_5_Iron[[i]]$coefficients[1] +
  bf_models_p0_5_Iron[[i]]$coefficients[2] *
    Table_sliders['Фракция 5-0', 'simul_bf'],
  bf_models_W_Iron[[i]]$coefficients[1] +
  bf_models_W_Iron[[i]]$coefficients[2] *
    Table_sliders['Влажность', 'simul_bf'],
  bf_models_Fe_Iron[[i]]$coefficients[1] +
  bf_models_Fe_Iron[[i]]$coefficients[2] *
    Table_sliders['Fe агло.', 'simul_bf'],
  bf_models_PG_O2_Iron[[i]]$coefficients[1] +
  bf_models_PG_O2_Iron[[i]]$coefficients[2] *
    (Table_sliders['ПГ', 'simul_bf'] /
    (Table_sliders['O2', 'simul_bf'] * 0.01 *
    Table_sliders['RHD', 'simul_bf'])) +
  bf_models_PG_O2_Iron[[i]]$coefficients[3] *
    (Table_sliders['ПГ', 'simul_bf'] /
    (Table_sliders['O2', 'simul_bf'] * 0.01 *
    Table_sliders['RHD', 'simul_bf'])) ^ 2,
na.rm = T
)

Table_sliders['Iron', 'simul_bf'] = Iron_simul - Iron_value

```

### 3.1.6 Изменение стоимости угольной шихты

Стоимость угольной шихты вычисляется по формуле:

$$COST\_COKE = \left( \left( Const + A \cdot e^{B \cdot \left( \frac{M10 - M10_{min}}{M10_{max} - M10_{min}} \right)} \right) - 0,03 \right) \cdot (cost_{coke_{max}} - cost_{coke_{min}}) + cost_{coke_{min}}, \quad (6)$$

где  $A, B, Const$  – известные коэффициенты, хранящиеся в таблице;

$M10_{min}$  – минимальное значение прочности на истирание;

$M10_{max}$  – максимальное значение прочности на истирание;

$cost\_coke_{min}$  – минимальная цена угольной шихты;

$cost\_coke_{max}$  – максимальное цена угольной шихты.

Подставим известные нам значения и получим:

$$\begin{aligned} COST\_COKE &= \left( \left( -0,03383004 + 1,04079697 \cdot e^{-3,57300930 \cdot \left( \frac{M10 - 7,59}{7,878757 - 7,59} \right)} \right) - 0,03 \right) \cdot (6208,43 - 6033,67) + 6033,67 = \\ &= \left( \left( -0,03383004 + 1,04079697 \cdot e^{-3,57300930 \cdot \left( \frac{M10 - 7,59}{0,288757} \right)} \right) - 0,03 \right) \cdot \\ &\quad \cdot 174,76 + 6033,67. \end{aligned}$$

Изменение стоимости угольной шихты вычисляется как разность между измененным и табличным значениями стоимости угольной шихты.

$$\Delta COST\_COKE = COST\_COKE_{изм} - COST\_COKE_{табл.}$$

Код программы приведен в листинге 7. Изменение стоимости угольной шихты – переменная ID\_COST\_COKE.

### Листинг 7 – Изменение стоимости угольной шихты

```
cost_coke_value = as.numeric((
    coef(cost_models_coke)['Const'] +
    coef(cost_models_coke)['A'] *
    exp(coef(cost_models_coke)['B'] *
        (Table_sliders['M10', 'value_bf_shop'] -
         min(M10)) / (max(M10) - min(M10))
    )
) - 0.03) * (max(cost_coke) - min(cost_coke)) +
min(cost_coke)

cost_coke_simul = as.numeric((
    coef(cost_models_coke)['Const'] +
    coef(cost_models_coke)['A'] *
    exp(coef(cost_models_coke)['B'] *
        (Table_sliders['M10', 'simul_bf_shop'] -
         min(M10)) / (max(M10) - min(M10))
    )
) - 0.03) * (max(cost_coke) - min(cost_coke)) +
min(cost_coke)

Table_sliders['cost_coke', 'simul_bf_shop'] = round2(cost_coke_simul
- cost_coke_value, 1)
```

#### 3.1.7 Изменение стоимости железорудного сырья

Стоимость железорудного сырья вычисляется по формуле:

$$COST_{GRS} = A + B \cdot DA + C \cdot DA^2, \quad (7)$$

где  $A, B, C$  – известные коэффициенты, хранящиеся в таблице;

$DA$  – значение доли агломерата в железорудного сырья.

Подставим известные нам значения и получим:

$$COST_{GRS} = 10188,722 + 3788,075 \cdot DA + (-6175,569) \cdot DA^2.$$

Изменение стоимости железорудного сырья вычисляется как разность между измененным и табличным значениями стоимости угольной шихты.

$$\Delta COST_{GRS} = COST_{GRS}_{изм} - COST_{GRS}_{табл.}$$

Код программы приведен в листинге 8. Изменение стоимости железорудного сырья – переменная ID\_COST\_GRS.

#### Листинг 8 – Изменение стоимости железорудного сырья

```
cost_grs_value =
    cost_models_grs$coefficients[1] +
    cost_models_grs$coefficients[2] *
        Table_sliders['Д.Агл.', 'value_bf_shop'] +
    cost_models_grs$coefficients[3] *
        (Table_sliders['Д.Агл.', 'value_bf_shop'] ^ 2)

cost_grs_simul =
    cost_models_grs$coefficients[1] +
    cost_models_grs$coefficients[2] *
        Table_sliders['Д.Агл.', 'simul_bf_shop'] +
    cost_models_grs$coefficients[3] *
        (Table_sliders['Д.Агл.', 'simul_bf_shop'] ^ 2)

Table_sliders['cost_grs', 'simul_bf_shop'] = round2(cost_grs_simul -
    cost_grs_value, 1)
```

#### 3.1.8 Изменение содержания кислорода в дутье

Значение содержания кислорода в дутье является входным технологическим параметром, обновляемый каждый определенный период времени. Вычисляется как разность между табличным и измененным значениями содержания кислорода в дутье:

$$\Delta O_2 = O_{2\text{табл}} - O_{2\text{изм}} \quad (8)$$

Код программы приведен в листинге 9. Изменение содержания кислорода в дутье – переменная ID\_DELTA\_O2.

#### Листинг 9 – Изменение содержания кислорода в дутье

```
ID_DELTA_O2 = 18
table[ID_DELTA_O2, 'ДП'] = -round2(Table_sliders['O2',
    'value_bf'] - Table_sliders['O2', 'simul_bf'], 2)
table[ID_DELTA_O2, 'ДЦ'] = -round2(Table_sliders['O2',
    'value_bf_shop'] - Table_sliders['O2', 'simul_bf_shop'], 2)
```

### 3.1.9 Изменение удельного расхода природного газа

Расчет удельного расхода природного газа описано в п. 3.1.3. Изменение данного параметра вычисляется по формуле:

$$\Delta PG_{уд} = PG_{уд_{табл}} - PG_{уд_{изм}}. \quad (9)$$

Код программы приведен в листинге 10. Изменение удельного расхода природного газа – переменная ID\_DELTA\_PG.

#### Листинг 10 – Изменение удельного расхода природного газа

```
ID_DELTA_PG = 19
table[ID_DELTA_PG, 'ДП'] = -round(Table_sliders[9, 'value_bf'] * 24 /
    Iron_mean[1]) + round(Table_sliders[9, 'simul_bf'] * 24 /
    Iron_mean[1])
table[ID_DELTA_PG, 'ДЦ'] = -round2(
    round(Table_sliders[9, 'value_bf_shop'] * 24 /
    mean(Iron_mean)) - round(Table_sliders[9,
    'simul_bf_shop'] * 24 / mean(Iron_mean)) ,2)
```

### 3.1.10 Расход холодного дутья

Данное значения является входным параметром, но это достаточно большое число, поэтому разделим его на тысячу и сделаем при выводе в таблице приставку тысяча.

Код программы приведен в листинге 11. Расход холодного дутья – переменная ID\_RHD.

#### Листинг 11 – Расход холодного дутья

```
ID_RHD = 20
table[ID_RHD, 'ДП'] = round2(Table_sliders['RHD',
    'simul_bf']/1000,0)
table[ID_RHD, 'ДЦ'] = round2(sum(table[ID_RHD, 'ДП1'] ,
    table[ID_RHD, 'ДП2'],
    table[ID_RHD, 'ДП3']
    ),0)
```

### 3.1.11 Изменение расхода холодного дутья

Значение расхода холодного дутья является входным технологическим параметром, обновляемый каждый определенный период времени. Вычисляется как разность между табличным и измененным значениями расхода холодного дутья:

$$\Delta RHD = RHD_{\text{табл}} - RHD_{\text{изм}}. \quad (10)$$

Код программы приведен в листинге 12. Изменение расхода холодного дутья – переменная ID\_DELTA\_RHD.

#### Листинг 12 – Изменение расхода холодного дутья

```
ID_DELTA_RHD = 21
table[ID_DELTA_RHD, 'ДП'] = -round2((Table_sliders['RHD',
    'value_bf'] - Table_sliders['RHD', 'simul_bf'])/1000,0)
table[ID_DELTA_RHD, 'ДЦ'] = -round2(sum(table[ID_DELTA_RHD, 'ДП1'],
    table[ID_DELTA_RHD, 'ДП2'],
    table[ID_DELTA_RHD, 'ДП3']
),0)
```

### 3.1.12 Изменение удельного расхода кокса по прочности на истирание

Значение изменений удельного расхода кокса по прочности на истирание (M10) вычисляется по формуле:

$$\Delta URK_{M10} = (A + B \cdot M10_{\text{изм}}) - (A + B \cdot M10_{\text{табл}}), \quad (11)$$

где А, В – коэффициенты влияния технологического параметра на режим работы доменной печи.

Коэффициенты влияния технологического параметра найдены путем кластерного анализа.



Преобразовав формулу и подставив коэффициент, получим:

$$\Delta URK_{M10} = B \cdot (M10_{изм} - M10_{табл}),$$

$$\Delta URK_{M10} = 7,136525 \cdot (M10_{изм} - M10_{табл}).$$

Код программы приведен в листинге 13. Изменение удельного расхода кокса по прочности на истирание (M10) – переменная ID\_M10\_URK.

Листинг 13 – Изменение удельного расхода кокса по прочности на истирание (M10)

```
ID_M10_URK = 22
table[ID_M10_URK, 'ДП'] = round2((
    (bf_models_M10_URK[[1]]$coefficients[1] +
    bf_models_M10_URK[[1]]$coefficients[2] *
    Table_sliders['M10', 'simul_bf']) -
    (bf_models_M10_URK[[1]]$coefficients[1] +
    bf_models_M10_URK[[1]]$coefficients[2] *
    Table_sliders['M10', 'value_bf'])), 2)
```

3.1.13 Изменение удельного расхода кокса по содержанию в коксе фракции +80 мм

Значение изменений удельного расхода кокса по содержанию в коксе фракции +80 мм вычисляется по формуле:

$$\Delta URK_{coke80} = (A + B \cdot coke80_{изм}) - (A + B \cdot coke80_{табл}), \quad (12)$$

где A, B – коэффициенты влияния технологического параметра на режим работы доменной печи.

Коэффициенты влияния технологического параметра найдены путем кластерного анализа.

Преобразовав формулу и подставив коэффициент, получим:

$$\Delta URK_{\text{coke80}} = B \cdot (\text{coke80}_{\text{изм}} - \text{coke80}_{\text{табл}}),$$

$$\Delta URK_{\text{coke80}} = 0,687987 \cdot (\text{coke80}_{\text{изм}} - \text{coke80}_{\text{табл}}).$$

Код программы приведен в листинге 14. Изменение удельного расхода кокса по содержанию в коксе фракции +80 мм – переменная ID\_coke80\_URK.

Листинг 14 – Изменение удельного расхода кокса по содержанию в коксе фракции +80 мм

```
ID_coke80_URK = 23
table[ID_coke80_URK, 'ДП'] = round2((
    (bf_models_coke80_URK[[1]]$coefficients[1] +
    bf_models_coke80_URK[[1]]$coefficients[2] *
    Table_sliders['Кокс +80', 'simul_bf']) -
    (bf_models_coke80_URK[[1]]$coefficients[1] +
    bf_models_coke80_URK[[1]]$coefficients[2] *
    Table_sliders['Кокс +80', 'value_bf'])), 2)
```

### 3.1.14 Изменение удельного расхода кокса содержанию золы

Значение изменений удельного расхода кокса по содержанию золы вычисляется по формуле:

$$\Delta URK_{\text{ash}} = (A + B \cdot \text{ash}_{\text{изм}}) - (A + B \cdot \text{ash}_{\text{табл}}), \quad (13)$$

где А, В – коэффициенты влияния технологического параметра на режим работы доменной печи.

Коэффициенты влияния технологического параметра найдены путем кластерного анализа.

Преобразовав формулу и подставив коэффициент, получим:

$$\Delta URK_{\text{ash}} = B \cdot (\text{ash}_{\text{изм}} - \text{ash}_{\text{табл}}),$$

$$\Delta URK_{ash} = 5,267663 \cdot (ash_{изм} - ash_{табл}).$$

Код программы приведен в листинге 15. Изменение удельного расхода кокса по содержанию золы – переменная ID\_ash\_URK.

Листинг 15 – Изменение удельного расхода кокса по содержанию золы

```
ID_ash_URK = 24
table[ID_ash_URK, 'ДП'] = round2((
    (bf_models_ash_URK[[1]]$coefficients[1] +
    bf_models_ash_URK[[1]]$coefficients[2] *
    Table_sliders['Зола в коксе', 'simul_bf']) -
    (bf_models_ash_URK[[1]]$coefficients[1] +
    bf_models_ash_URK[[1]]$coefficients[2] *
    Table_sliders['Зола в коксе', 'value_bf'])), 2)
```

3.1.15 Изменение удельного расхода кокса по доле агломерата в железорудном сырье

Значение изменений удельного расхода кокса по доле агломерата в железорудном сырье вычисляется по формуле:

$$\Delta URK_{aglo} = (A + B \cdot aglo_{изм}) - (A + B \cdot aglo_{табл}), \quad (14)$$

где А, В – коэффициенты влияния технологического параметра на режим работы доменной печи.

Коэффициенты влияния технологического параметра найдены путем кластерного анализа.

Преобразовав формулу и подставив коэффициент, получим:

$$\Delta URK_{aglo} = B \cdot (aglo_{изм} - aglo_{табл}),$$

$$\Delta URK_{aglo} = 43,02139 \cdot (aglo_{изм} - aglo_{табл}).$$

Код программы приведен в листинге 16. Изменение удельного расхода кокса по доле агломерата в железорудном сырье – переменная ID\_aglo\_URK.

Листинг 16 – Изменение удельного расхода кокса по доле агломерата в железорудном сырье

```
ID_aglo_URK = 25
table[ID_aglo_URK, 'ДП'] = round2((
    (bf_models_aglo_URK[[1]]$coefficients[1] +
    bf_models_aglo_URK[[1]]$coefficients[2] *
    Table_sliders['Д.Агл.', 'simul_bf']) -
    (bf_models_aglo_URK[[1]]$coefficients[1] +
    bf_models_aglo_URK[[1]]$coefficients[2] *
    Table_sliders['Д.Агл.', 'value_bf'])), 2)
```

3.1.16 Изменение удельного расхода кокса по содержанию фракции 5-0 в агломерате

Значение изменений удельного расхода кокса по содержанию фракции 5-0 в агломерате вычисляется по формуле:

$$\Delta URK_{p0\_5} = (A + B \cdot p0_{5_{изм}}) - (A + B \cdot p0_{5_{табл}}), \quad (15)$$

где А, В – коэффициенты влияния технологического параметра на режим работы доменной печи.

Коэффициенты влияния технологического параметра найдены путем кластерного анализа.

Преобразовав формулу и подставив коэффициент, получим:

$$\Delta URK_{p0\_5} = B \cdot (p0_{5_{изм}} - p0_{5_{табл}}),$$

$$\Delta URK_{p0\_5} = 3,413385 \cdot (p0_{5_{изм}} - p0_{5_{табл}}).$$

Код программы приведен в листинге 17. Изменение удельного расхода кокса по содержанию фракции 5-0 в агломерате – переменная ID\_p0\_5\_URK.

Листинг 17 – Изменение удельного расхода кокса по содержанию фракции 5-0 в агломерате

```
ID_p0_5_URK = 26
table[ID_p0_5_URK, 'ДП'] = round2((
    (bf_models_p0_5_URK[[1]]$coefficients[1] +
    bf_models_p0_5_URK[[1]]$coefficients[2] *
    Table_sliders['Фракция 5-0', 'simul_bf']) -
    (bf_models_p0_5_URK[[1]]$coefficients[1] +
    bf_models_p0_5_URK[[1]]$coefficients[2] *
    Table_sliders['Фракция 5-0', 'value_bf'])), 2)
```

### 3.1.17 Изменение удельного расхода кокса по содержанию Fe в агломерате

Значение изменений удельного расхода кокса по содержанию Fe в агломерате вычисляется по формуле:

$$\Delta URK_{Fe} = (A + B \cdot Fe_{изм}) - (A + B \cdot Fe_{табл}), \quad (16)$$

где A, B – коэффициенты влияния технологического параметра на режим работы доменной печи.

Коэффициенты влияния технологического параметра найдены путем кластерного анализа.

Преобразовав формулу и подставив коэффициент, получим:

$$\Delta URK_{Fe} = B \cdot (Fe_{изм} - Fe_{табл}),$$

$$\Delta URK_{Fe} = -4,247946 \cdot (Fe_{изм} - Fe_{табл}).$$

Код программы приведен в листинге 18. Изменение удельного расхода кокса по содержанию Fe в агломерате – переменная ID\_Fe\_URK.

## Листинг 18 – Изменение удельного расхода кокса по содержанию Fe в агломерате

```
ID_Fe_URK = 27
table[ID_Fe_URK, 'ДП'] = round2((
    (bf_models_Fe_URK[[1]]$coefficients[1] +
    bf_models_Fe_URK[[1]]$coefficients[2] *
    Table_sliders['Fe агло.', 'simul_bf']) -
    (bf_models_Fe_URK[[1]]$coefficients[1] +
    bf_models_Fe_URK[[1]]$coefficients[2] *
    Table_sliders['Fe агло.', 'value_bf'])),2)
```

### 3.1.18 Изменение удельного расхода кокса по пару на увлажнение

Значение изменений удельного расхода кокса по пару на увлажнение вычисляется по формуле:

$$\Delta URK_W = (A + B \cdot W_{изм}) - (A + B \cdot W_{табл}), \quad (17)$$

где А, В – коэффициенты влияния технологического параметра на режим работы доменной печи.

Коэффициенты влияния технологического параметра найдены путем кластерного анализа.

Преобразовав формулу и подставив коэффициент, получим:

$$\Delta URK_W = B \cdot (W_{изм} - W_{табл}),$$

$$\Delta URK_W = 0,7142957 \cdot (W_{изм} - W_{табл}).$$

Код программы приведен в листинге 19. Изменение удельного расхода кокса по пару на увлажнение – переменная ID\_W\_URK.

## Листинг 19 – Изменение удельного расхода кокса по пару на увлажнение

```
ID_W_URK = 28
table[ID_W_URK, 'ДП'] = round2((
    (bf_models_W_URK[[1]]$coefficients[1] +
    bf_models_W_URK[[1]]$coefficients[2] *
    Table_sliders['Влажность', 'simul_bf']) -
    (bf_models_W_URK[[1]]$coefficients[1] +
    bf_models_W_URK[[1]]$coefficients[2] *
    Table_sliders['Влажность', 'value_bf'])), 2)
```

### 3.1.19 Изменение удельного расхода кокса по ПГ/О2

Для вычисления изменения удельного расхода кокса по ПГ/О2 (отношение технологического природного газа к технологическому кислороду) необходимо знать значение трех величин: расход природного газа (PG), содержание кислорода в дутье (O<sub>2</sub>) и расход холодного дутья (RHD). Вычисление происходит по формуле:

$$\Delta URK_{PG_{O2}} = \left( (A + B \cdot \left( \frac{PG_{изм}}{O_{2изм} \cdot 0,01 \cdot RHD_{изм}} \right) + C \cdot \left( \frac{PG_{изм}}{O_{2изм} \cdot 0,01 \cdot RHD_{изм}} \right)^2) - \right. \\ \left. - (A + B \cdot \left( \frac{PG_{табл}}{O_{2табл} \cdot 0,01 \cdot RHD_{табл}} \right) + C \cdot \left( \frac{PG_{табл}}{O_{2табл} \cdot 0,01 \cdot RHD_{табл}} \right)^2) \right), \quad (18)$$

где А, В, С – коэффициенты влияния технологического параметра на режим работы доменной печи.

Коэффициенты влияния технологического параметра найдены путем кластерного анализа.

Преобразовав формулу и подставив коэффициенты, получим:

$$\Delta URK_{PG_{O2}} = B \cdot \left( \frac{PG_{изм}}{O_{2изм} \cdot 0,01 \cdot RHD_{изм}} - \frac{PG_{табл}}{O_{2табл} \cdot 0,01 \cdot RHD_{табл}} \right) + \\ + C \cdot \left( \left( \frac{PG_{изм}}{O_{2изм} \cdot 0,01 \cdot RHD_{изм}} \right)^2 - \left( \frac{PG_{табл}}{O_{2табл} \cdot 0,01 \cdot RHD_{табл}} \right)^2 \right),$$

$$\Delta URK\_PG\_O2 = -757,7333 \cdot \left( \frac{PG_{изм}}{O_{2изм} \cdot 0,01 \cdot RHD_{изм}} - \frac{PG_{табл}}{O_{2табл} \cdot 0,01 \cdot RHD_{табл}} \right) +$$

$$+ 587,7708 \cdot \left( \left( \frac{PG_{изм}}{O_{2изм} \cdot 0,01 \cdot RHD_{изм}} \right)^2 - \left( \frac{PG_{табл}}{O_{2табл} \cdot 0,01 \cdot RHD_{табл}} \right)^2 \right).$$

Код программы приведен в листинге 20. Изменение удельного расхода кокса по ПГ/O2 – переменная ID\_PG\_O2\_URK.

### Листинг 20 – Изменение удельного расхода кокса по ПГ/O2

```
ID_PG_O2_URK = 29
table[ID_PG_O2_URK, 'ДП'] = round2((
    (bf_models_PG_O2_URK[[1]]$coefficients[1] +
    bf_models_PG_O2_URK[[1]]$coefficients[2] *
    (Table_sliders['ПГ', 'simul_bf'] /
    (Table_sliders['O2', 'simul_bf'] * 0.01 *
    Table_sliders['RHD', 'simul_bf'])) +
    bf_models_PG_O2_URK[[1]]$coefficients[3] *
    (Table_sliders['ПГ', 'simul_bf'] /
    (Table_sliders['O2', 'simul_bf'] * 0.01 *
    Table_sliders['RHD', 'simul_bf'])) ^ 2) -
    (bf_models_PG_O2_URK[[1]]$coefficients[1] +
    bf_models_PG_O2_URK[[1]]$coefficients[2] *
    (Table_sliders['ПГ', 'value_bf'] /
    (Table_sliders['O2', 'value_bf'] * 0.01 *
    Table_sliders['RHD', 'value_bf'])) +
    bf_models_PG_O2_URK[[1]]$coefficients[3] *
    (Table_sliders['ПГ', 'value_bf'] /
    (Table_sliders['O2', 'value_bf'] * 0.01 *
    Table_sliders['RHD', 'value_bf'])) ^ 2)), 2)
```

### 3.1.20 Изменение производства чугуна по прочности на истирание

Значение изменений производства чугуна по прочности на истирание (M10) вычисляется по формуле:

$$\Delta IRON\_M10 = (A + B \cdot M10_{изм}) - (A + B \cdot M10_{табл}), \quad (19)$$

где А, В – коэффициенты влияния технологического параметра на режим работы доменной печи.



Коэффициенты влияния технологического параметра найдены путем кластерного анализа.

Преобразовав формулу и подставив коэффициент, получим:

$$\Delta \text{IRON\_M10} = B \cdot (\text{M10}_{\text{изм}} - \text{M10}_{\text{табл}}),$$

$$\Delta \text{IRON\_M10} = -87,01153 \cdot (\text{M10}_{\text{изм}} - \text{M10}_{\text{табл}}).$$

Код программы приведен в листинге 21. Изменение производства чугуна по прочности на истирание (M10) – переменная ID\_M10\_IRON.

Листинг 21 – Изменение производства чугуна по прочности на истирание (M10)

```
ID_M10_IRON = 30
table[ID_M10_IRON, 'ДП'] = round2((
    (bf_models_M10_Iron[[1]]$coefficients[1] +
    bf_models_M10_Iron[[1]]$coefficients[2] *
    Table_sliders['M10', 'simul_bf']) -
    (bf_models_M10_Iron[[1]]$coefficients[1] +
    bf_models_M10_Iron[[1]]$coefficients[2] *
    Table_sliders['M10', 'value_bf'])), 2)
```

3.1.21 Изменение производства чугуна по содержанию в коксе фракции +80 мм

Значение изменений производства чугуна по содержанию в коксе фракции +80 мм вычисляется по формуле:

$$\Delta \text{IRON\_coke80} = (A + B \cdot \text{coke80}_{\text{изм}}) - (A + B \cdot \text{coke80}_{\text{табл}}), \quad (20)$$

где A, B – коэффициенты влияния технологического параметра на режим работы доменной печи.

Коэффициенты влияния технологического параметра найдены путем кластерного анализа.

Преобразовав формулу и подставив коэффициент, получим:

$$\Delta \text{IRON\_coke80} = B \cdot (\text{coke80}_{\text{изм}} - \text{coke80}_{\text{табл}}),$$

$$\Delta \text{IRON\_coke80} = -6,28265 \cdot (\text{coke80}_{\text{изм}} - \text{coke80}_{\text{табл}}).$$

Код программы приведен в листинге 22. Изменение производства чугуна по содержанию в коксе фракции +80 мм – переменная ID\_coke80\_IRON.

Листинг 22 – Изменение производства чугуна по содержанию в коксе фракции +80 мм

```
ID_coke80_IRON = 31
table[ID_coke80_IRON, 'ДП'] = round2((
    (bf_models_coke80_Iron[[1]]$coefficients[1] +
    bf_models_coke80_Iron[[1]]$coefficients[2] *
    Table_sliders['Кокс +80', 'simul_bf']) -
    (bf_models_coke80_Iron[[1]]$coefficients[1] +
    bf_models_coke80_Iron[[1]]$coefficients[2] *
    Table_sliders['Кокс +80', 'value_bf'])), 2)
```

### 3.1.22 Изменение производства чугуна по содержанию золы

Значение изменений производства чугуна по содержанию золы вычисляется по формуле:

$$\Delta \text{IRON\_ash} = (A + B \cdot \text{ash}_{\text{изм}}) - (A + B \cdot \text{ash}_{\text{табл}}), \quad (21)$$

где A, B – коэффициенты влияния технологического параметра на режим работы доменной печи.

Коэффициенты влияния технологического параметра найдены путем кластерного анализа.

Преобразовав формулу и подставив коэффициент, получим:

$$\Delta \text{IRON}_{\text{ash}} = B \cdot (\text{ash}_{\text{изм}} - \text{ash}_{\text{табл}}),$$

$$\Delta \text{IRON}_{\text{ash}} = -33,06112 \cdot (\text{ash}_{\text{изм}} - \text{ash}_{\text{табл}}).$$

Код программы приведен в листинге 23. Изменение производства чугуна по содержанию золы – переменная ID\_ash\_IRON.

Листинг 23 – Изменение производства чугуна по содержанию золы

```
ID_ash_IRON = 32
table[ID_ash_IRON, 'ДП6'] = round2((
    (bf_models_ash_Iron[[1]]$coefficients[1] +
    bf_models_ash_Iron[[1]]$coefficients[2] *
    Table_sliders['Зола в коксе', 'simul_bf']) -
    (bf_models_ash_Iron[[1]]$coefficients[1] +
    bf_models_ash_Iron[[1]]$coefficients[2] *
    Table_sliders['Зола в коксе', 'value_bf'])), 2)
```

3.1.23 Изменение производства чугуна по доле агломерата в железорудном сырье

Значение изменений производства чугуна по доле агломерата в железорудном сырье вычисляется по формуле:

$$\Delta \text{IRON}_{\text{aglo}} = (A + B \cdot \text{aglo}_{\text{изм}}) - (A + B \cdot \text{aglo}_{\text{табл}}), \quad (22)$$

где A, B – коэффициенты влияния технологического параметра на режим работы доменной печи.

Коэффициенты влияния технологического параметра найдены путем кластерного анализа.

Преобразовав формулу и подставив коэффициент, получим:

$$\Delta\text{IRON\_aglo} = B \cdot (\text{aglo}_{\text{изм}} - \text{aglo}_{\text{табл}}),$$

$$\Delta\text{IRON\_aglo} = -601,3932 \cdot (\text{aglo}_{\text{изм}} - \text{aglo}_{\text{табл}}).$$

Код программы приведен в листинге 24. Изменение производства чугуна по доле агломерата в железорудном сырье – переменная ID\_aglo\_IRON.

Листинг 24 – Изменение производства чугуна по доле агломерата в железорудном сырье

```
ID_aglo_IRON = 33
table[ID_aglo_IRON, 'ДП'] = round2((
    (bf_models_aglo_Iron[[1]]$coefficients[1] +
    bf_models_aglo_Iron[[1]]$coefficients[2] *
    Table_sliders['Д.Агл.', 'simul_bf']) -
    (bf_models_aglo_Iron[[1]]$coefficients[1] +
    bf_models_aglo_Iron[[1]]$coefficients[2] *
    Table_sliders['Д.Агл.', 'value_bf'])), 2)
```

3.1.24 Изменение производства чугуна по содержанию фракции 5-0 в агломерате

Значение изменений производства чугуна по содержанию фракции 5-0 в агломерате вычисляется по формуле:

$$\Delta\text{IRON\_p0\_5} = (A + B \cdot p0_{5\text{изм}}) - (A + B \cdot p0_{5\text{табл}}), \quad (23)$$

где A, B – коэффициенты влияния технологического параметра на режим работы доменной печи.

Коэффициенты влияния технологического параметра найдены путем кластерного анализа.

Преобразовав формулу и подставив коэффициент, получим:

$$\Delta\text{IRON}_{p0\_5} = B \cdot (p0\_5_{\text{изм}} - p0\_5_{\text{табл}}),$$

$$\Delta\text{IRON}_{p0\_5} = -20,05612 \cdot (p0\_5_{\text{изм}} - p0\_5_{\text{табл}}).$$

Код программы приведен в листинге 25. Изменение производства чугуна по содержанию фракции 5-0 в агломерате – переменная ID\_p0\_5\_IRON.

Листинг 25 – Изменение производства чугуна по содержанию фракции 5-0 в агломерате

```
ID_p0_5_IRON = 34
table[ID_p0_5_IRON, 'ДП'] = round2((
    (bf_models_p0_5_Iron[[1]]$coefficients[1] +
    bf_models_p0_5_Iron[[1]]$coefficients[2] *
    Table_sliders['Фракция 5-0', 'simul_bf']) -
    (bf_models_p0_5_Iron[[1]]$coefficients[1] +
    bf_models_p0_5_Iron[[1]]$coefficients[2] *
    Table_sliders['Фракция 5-0', 'value_bf'])), 2)
```

### 3.1.25 Изменение производства чугуна по содержанию Fe в агломерате

Значение изменений производства чугуна по содержанию Fe в агломерате вычисляется по формуле:

$$\Delta\text{IRON}_{\text{Fe}} = (A + B \cdot \text{Fe}_{\text{изм}}) - (A + B \cdot \text{Fe}_{\text{табл}}), \quad (24)$$

где A, B – коэффициенты влияния технологического параметра на режим работы доменной печи.

Коэффициенты влияния технологического параметра найдены путем кластерного анализа.

Преобразовав формулу и подставив коэффициент, получим:

$$\Delta\text{IRON\_Fe} = B \cdot (\text{Fe}_{\text{изм}} - \text{Fe}_{\text{табл}}),$$

$$\Delta\text{IRON\_Fe} = 66,27249 \cdot (\text{Fe}_{\text{изм}} - \text{Fe}_{\text{табл}}).$$

Код программы приведен в листинге 26. Изменение производства чугуна по содержанию Fe в агломерате – переменная ID\_Fe\_IRON.

Листинг 26 – Изменение производства чугуна по содержанию Fe в агломерате

```
ID_Fe_IRON = 35
table[ID_Fe_IRON, 'ДП'] = round2((
    (bf_models_Fe_Iron[[1]]$coefficients[1] +
    bf_models_Fe_Iron[[1]]$coefficients[2] *
    Table_sliders['Fe агло.', 'simul_bf']) -
    (bf_models_Fe_Iron[[1]]$coefficients[1] +
    bf_models_Fe_Iron[[1]]$coefficients[2] *
    Table_sliders['Fe агло.', 'value_bf'])),2)
```

### 3.1.26 Изменение производства чугуна по пару на увлажнение

Значение изменений производства чугуна по пару на увлажнение вычисляется по формуле:

$$\Delta\text{IRON\_W} = (A + B \cdot W_{\text{изм}}) - (A + B \cdot W_{\text{табл}}), \quad (25)$$

где A, B – коэффициенты влияния технологического параметра на режим работы доменной печи.

Коэффициенты влияния технологического параметра найдены путем кластерного анализа.

Преобразовав формулу и подставив коэффициент, получим:

$$\Delta\text{IRON\_W} = B \cdot (W_{\text{изм}} - W_{\text{табл}}),$$

$$\Delta \text{IRON\_W} = -2,553829 \cdot (W_{\text{изм}} - W_{\text{табл}}).$$

Код программы приведен в листинге 27. Изменение производства чугуна по пару на увлажнение – переменная ID\_W\_IRON.

### Листинг 27 – Изменение производства чугуна по пару на увлажнение

```
ID_W_IRON = 36
table[ID_W_IRON, 'дп'] = round2((
    (bf_models_W_Iron[[1]]$coefficients[1] +
    bf_models_W_Iron[[1]]$coefficients[2] *
    Table_sliders['Влажность', 'simul_bf']) -
    (bf_models_W_Iron[[1]]$coefficients[1] +
    bf_models_W_Iron[[1]]$coefficients[2] *
    Table_sliders['Влажность', 'value_bf'])), 2)
```

### 3.1.27 Изменение производства чугуна по ПГ/O2

Для вычисления изменения производства чугуна по ПГ/O2 (отношение технологического природного газа к технологическому кислороду) необходимо знать значение трех величин: расход природного газа (PG), содержание кислорода в дутье (O2) и расход холодного дутья (RHD). Вычисление происходит по формуле:

$$\begin{aligned} \Delta \text{IRON\_PG\_O2} = & \left( (A+B \cdot \left( \frac{\text{PG}_{\text{изм}}}{\text{O}_{2\text{изм}} \cdot 0,01 \cdot \text{RHD}_{\text{изм}}} \right) + C \cdot \left( \frac{\text{PG}_{\text{изм}}}{\text{O}_{2\text{изм}} \cdot 0,01 \cdot \text{RHD}_{\text{изм}}} \right)^2) - \right. \\ & \left. (A+B \cdot \left( \frac{\text{PG}_{\text{табл}}}{\text{O}_{2\text{табл}} \cdot 0,01 \cdot \text{RHD}_{\text{табл}}} \right) + C \cdot \left( \frac{\text{PG}_{\text{табл}}}{\text{O}_{2\text{табл}} \cdot 0,01 \cdot \text{RHD}_{\text{табл}}} \right)^2) \right), \end{aligned} \quad (26)$$

где A, B, C – коэффициенты влияния технологического параметра на режим работы доменной печи.

Коэффициенты влияния технологического параметра найдены путем кластерного анализа.

Преобразовав формулу и подставив коэффициенты, получим:

$$\Delta \text{IRON\_PG\_O2} = B \cdot \left( \frac{\text{PG}_{\text{изм}}}{\text{O}_{2\text{изм}} \cdot 0,01 \cdot \text{RHD}_{\text{изм}}} - \frac{\text{PG}_{\text{табл}}}{\text{O}_{2\text{табл}} \cdot 0,01 \cdot \text{RHD}_{\text{табл}}} \right) + \\ + C \cdot \left( \left( \frac{\text{PG}_{\text{изм}}}{\text{O}_{2\text{изм}} \cdot 0,01 \cdot \text{RHD}_{\text{изм}}} \right)^2 - \left( \frac{\text{PG}_{\text{табл}}}{\text{O}_{2\text{табл}} \cdot 0,01 \cdot \text{RHD}_{\text{табл}}} \right)^2 \right),$$

$$\Delta \text{IRON\_PG\_O2} = 14082,31 \cdot \left( \frac{\text{PG}_{\text{изм}}}{\text{O}_{2\text{изм}} \cdot 0,01 \cdot \text{RHD}_{\text{изм}}} - \frac{\text{PG}_{\text{табл}}}{\text{O}_{2\text{табл}} \cdot 0,01 \cdot \text{RHD}_{\text{табл}}} \right) + \\ + (-18791,81) \cdot \left( \left( \frac{\text{PG}_{\text{изм}}}{\text{O}_{2\text{изм}} \cdot 0,01 \cdot \text{RHD}_{\text{изм}}} \right)^2 - \left( \frac{\text{PG}_{\text{табл}}}{\text{O}_{2\text{табл}} \cdot 0,01 \cdot \text{RHD}_{\text{табл}}} \right)^2 \right).$$

Код программы приведен в листинге 28. Изменение производства чугуна по ПГ/О2 – переменная ID\_PG\_O2\_IRON.

### Листинг 28 – Изменение производства чугуна по ПГ/О2

```
ID_PG_O2_IRON = 37
table[ID_PG_O2_IRON, 'ДП'] = round2((
    (bf_models_PG_O2_Iron[[1]]$coefficients[1] +
    bf_models_PG_O2_Iron[[1]]$coefficients[2] *
        (Table_sliders['ПГ', 'simul_bf'] /
        (Table_sliders['O2', 'simul_bf'] * 0.01 *
        Table_sliders['RHD', 'simul_bf'])) +
    bf_models_PG_O2_Iron[[1]]$coefficients[3] *
        (Table_sliders['ПГ', 'simul_bf'] /
        (Table_sliders['O2', 'simul_bf'] * 0.01 *
        Table_sliders['RHD', 'simul_bf'])) ^ 2) -
    bf_models_PG_O2_Iron[[1]]$coefficients[1] +
    bf_models_PG_O2_Iron[[1]]$coefficients[2] *
        (Table_sliders['ПГ', 'value_bf'] /
        (Table_sliders['O2', 'value_bf'] * 0.01 *
        Table_sliders['RHD', 'value_bf'])) +
    bf_models_PG_O2_Iron[[1]]$coefficients[3] *
        (Table_sliders['ПГ', 'value_bf'] /
        (Table_sliders['O2', 'value_bf'] * 0.01 *
        Table_sliders['RHD', 'value_bf'])) ^ 2)), 2)
```

Благодаря данному коду программы мы можем узнать значения изменений расхода кокса и производства чугуна, и в дальнейшем решить, что необходимо нам сделать, какие значения технологических параметров стоит увеличить, а какие уменьшить. Данная система является советчиком мастера.



## 4 РЕАЛИЗАЦИЯ ЭКСПЕРТНОЙ СИСТЕМЫ

Продemonстрируем работу созданной экспертной системы, задачей которой является выдача рекомендаций мастеру-технологу на основании оптимального ведения технологического процесса путем корректировки входных параметров.

Внесем в систему входные параметры и произведем оптимизацию по ним, достигая наилучших технико-экономических показателей. Входные технологические параметры приведены на рисунке 9.

Факторы	ДП6	ДП9	ДП10	Проч	ДЦ
1 Прочность на истирание (M10), %	7.83	7.66	8.33	7.83	7.8
2 Изменение прочности на истирание (M10), %	0	0	0		0
3 Кокс +80, %	27.9	25.8	38.9	23.2	26.1
4 Зола в коксе, %					
5 Доля агломерата в ЖРС, д.е.	0.66	0.78	0.77	0.78	0.76
6 Изменение доли агломерата в ЖРС, д.е.	0	0	0		0
7 Фракция 5-0, %	8.08	8.08	8.08	8.08	8.08
8 Fe агло., %	54.9	55	54.9	54.9	54.9
9 Содержание кислорода в дутье, %	29.8	26.9	30.5	29.7	29.4
10 Пар на увлажнение, г/м3					
11 Удельный расход природного газа, м3/т	111	116	129		107
12 Изменение УРК, кг/т	0	0	0	0	0
13 Изменение производительности, т/сут	0	0	0	0	0

Рисунок 9 – Входные технологические параметры

#### 4.1 Оптимизация по изменению прочности на истирание

1. Произведем оптимизацию по критерию максимума производительности от изменения прочности на истирание (M10). Достигнуть максимального значения производительности можно при уменьшении значения прочности на истирание (M10).

Уменьшим значение прочности на истирание (M10) на 0,12 %, получим следующие значения производительности по доменным печам:

– для доменной печи №6 значение производительности увеличится на 10,4 т/сут при показателе  $M10 = 7,71 \%$ ;

– для доменной печи №9 значение производительности увеличится на 22,4 т/сут при показателе  $M10 = 7,54 \%$ ;

– для доменной печи №10 значение производительности увеличится на 13,7 т/сут при показателе  $M10 = 8,21 \%$ ;

– для доменного цеха значение производительности увеличится на 10,4 т/сут при показателе  $M10 = 7,68 \%$ .

Результаты оптимизации приведены на рисунке 10.

					270304.2020.401 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		67

Факторы	ДП6	ДП9	ДП10	Проч	ДЦ
1 Прочность на истирание (M10), %	7.71	7.54	8.21	7.19	7.68
2 Изменение прочности на истирание (M10), %	-0.12	-0.12	-0.12		-0.12
3 Доля агломерата в ЖРС, д.е.	0.66	0.78	0.77	0.78	0.76
4 Изменение доли агломерата в ЖРС, д.е.	0	0	0		0
5 Изменение УРК, кг/т	-0.9	-1.1	-1.6	0	-1.2
6 Изменение производительности, т/сут	10.4	22.4	13.7	0	46.5
7 Изменение стоимости угольной шихты, руб/т					166
8 Изменение стоимости ЖРС, руб/т					0
9 Изменение себестоимости чугуна, руб/т					105.76
10 Изменение себестоимости стали, руб/т					51.25

Рисунок 10 – Оптимизация по критерию максимума производительности от изменения прочности на истирание (M10)

2. Произведем оптимизацию по критерию минимума себестоимости чугуна от изменения прочности на истирание (M10). Достигнуть данного результата можно при увеличении значения прочности на истирание (M10).

При увеличении значения прочности на истирание (M10) на 0,06 % по всем печам, получим изменение себестоимости чугуна равное 4,13 руб/т.

Результат оптимизации приведен на рисунке 11.

Факторы	ДП6	ДП9	ДП10	Проч	ДЦ
1 Прочность на истирание (M10), %	7.89	7.72	8.39	7.89	7.86
2 Изменение прочности на истирание (M10), %	0.06	0.06	0.06		0.06
3 Доля агломерата в ЖРС, д.е.	0.66	0.78	0.77	0.78	0.76
4 Изменение доли агломерата в ЖРС, д.е.	0	0	0		0
5 Изменение УРК, кг/т	0.43	0.53	0.78	0	0.58
6 Изменение производительности, т/сут	-5.2	-11	-6.8	0	-23
7 Изменение стоимости угольной шихты, руб/т					-14
8 Изменение стоимости ЖРС, руб/т					0
9 Изменение себестоимости чугуна, руб/т					-4.13
10 Изменение себестоимости стали, руб/т					-2.17

Рисунок 11 – Оптимизацию по критерию минимума себестоимости чугуна от изменения прочности на истирание (M10)

3. Произведем оптимизацию по критерию минимума себестоимости стали от изменения прочности на истирание (M10). Достигнуть данного результата можно при увеличении значения прочности на истирание (M10).

При увеличении значения прочности на истирание (M10) на 0,07 % по всем печам, получим изменение себестоимости стали равное 2,14 руб/т.

Результат оптимизации приведен на рисунке 12.

Факторы	ДП6	ДП9	ДП10	Проч	ДЦ
1 Прочность на истирание (M10), %	7.9	7.73	8.4	7.9	7.87
2 Изменение прочности на истирание (M10), %	0.07	0.07	0.07		0.07
3 Доля агломерата в ЖРС, д.е.	0.66	0.78	0.77	0.78	0.76
4 Изменение доли агломерата в ЖРС, д.е.	0	0	0		0
5 Изменение УРК, кг/т	0.5	0.62	0.91	0	0.68
6 Изменение производительности, т/сут	-6.1	-13	-8	0	-27
7 Изменение стоимости угольной шихты, руб/т					-15
8 Изменение стоимости ЖРС, руб/т					0
9 Изменение себестоимости чугуна, руб/т					-3.99
10 Изменение себестоимости стали, руб/т					-2.14

Рисунок 12 – Оптимизацию по критерию минимума себестоимости стали от изменения прочности на истирание (M10)

#### 4.2 Оптимизация по изменению доли агломерата

1. Произведем оптимизацию по критерию максимума производительности от изменения доли агломерата в железорудном сырье. Достигнуть максимального значения производительности можно при уменьшении значения доли агломерата.

Уменьшим значение доли агломерата в железорудном сырье по каждой печи, получим следующие значения производительности:

– для доменной печи №6 значение производительности увеличится на 24,9 т/сут при уменьшении значения доли агломерата на 0,04 д.е.;

– для доменной печи №9 значение производительности увеличится на 119 т/сут при уменьшении значения доли агломерата на 0,16 д.е.;

– для доменной печи №10 значение производительности увеличится на 165 т/сут при уменьшении значения доли агломерата на 0,16 д.е.;

– для доменного цеха значение производительности увеличится на 309 т/сут при уменьшении значения доли агломерата на 0,05 д.е..

Результаты оптимизации приведены на рисунке 13.

Факторы	ДП6	ДП9	ДП10	Проч	ДЦ
1 Прочность на истирание (M10), %	7.83	7.66	8.33	7.83	7.8
2 Изменение прочности на истирание (M10), %	0	0	0		0
3 Доля агломерата в ЖРС, д.е.	0.62	0.62	0.61	0.78	0.71
4 Изменение доли агломерата в ЖРС, д.е.	-0.04	-0.16	-0.16		-0.05
5 Изменение УРК, кг/т	-1.7	-8.1	-8.3	0	-6
6 Изменение производительности, т/сут	24.9	119	165	0	309
7 Изменение стоимости угольной шихты, руб/т					0
8 Изменение стоимости ЖРС, руб/т					279
9 Изменение себестоимости чугуна, руб/т					97.82
10 Изменение себестоимости стали, руб/т					96.87

Рисунок 13 – Оптимизация по критерию максимума производительности от изменения доли агломерата в железорудном сырье

2. Произведем оптимизацию по критерию минимума себестоимости чугуна от изменения доли агломерата в железорудном сырье. Достигнуть данного результата можно при увеличении доли агломерата в печах с малым объемом и уменьшении в печах с большим объемом.

При увеличении значения доли агломерата в доменной печи №6 на 0,01 д.е., уменьшении значения в доменной печи №9 на 0,08 д.е. и уменьшении значения в доменной печи №10 на 0,09 д.е., получим изменение себестоимости чугуна равное 38,43 руб/т.

Результат оптимизации приведен на рисунке 14.

Факторы	ДП6	ДП9	ДП10	Проч	ДЦ
1 Прочность на истирание (M10), %	7.83	7.66	8.33	7.83	7.8
2 Изменение прочности на истирание (M10), %	0	0	0		0
3 Доля агломерата в ЖРС, д.е.	0.67	0.7	0.68	0.78	0.74
4 Изменение доли агломерата в ЖРС, д.е.	0.01	-0.08	-0.09		-0.02
5 Изменение УРК, кг/т	0.43	-4	-4.6	0	-2.7
6 Изменение производительности, т/сут	-6.2	59.5	92.9	0	146
7 Изменение стоимости угольной шихты, руб/т					0
8 Изменение стоимости ЖРС, руб/т					110
9 Изменение себестоимости чугуна, руб/т					38.43
10 Изменение себестоимости стали, руб/т					38.05

Рисунок 14 – Оптимизацию по критерию минимума себестоимости чугуна от изменения доли агломерата в железорудном сырье

3. Произведем оптимизацию по критерию минимума себестоимости стали от изменения доли агломерата в железорудном сырье. Достигнуть данного результата можно при увеличении доли агломерата в печах с малым объемом и уменьшении в печах с большим объемом.

При увеличении значения доли агломерата в доменной печи №6 на 0,01 д.е., уменьшении значения в доменной печи №9 на 0,08 д.е. и уменьшении значения в доменной печи №10 на 0,09 д.е., получим изменение себестоимости стали равное 38,05 руб/т.

Результат оптимизации приведен на рисунке 15.

Факторы	ДП6	ДП9	ДП10	Проч	ДЦ
1 Прочность на истирание (M10), %	7.83	7.66	8.33	7.83	7.8
2 Изменение прочности на истирание (M10), %	0	0	0		0
3 Доля агломерата в ЖРС, д.е.	0.67	0.7	0.68	0.78	0.74
4 Изменение доли агломерата в ЖРС, д.е.	0.01	-0.08	-0.09		-0.02
5 Изменение УРК, кг/т	0.43	-4	-4.6	0	-2.7
6 Изменение производительности, т/сут	-6.2	59.5	92.9	0	146
7 Изменение стоимости угольной шихты, руб/т					0
8 Изменение стоимости ЖРС, руб/т					110
9 Изменение себестоимости чугуна, руб/т					38.43
10 Изменение себестоимости стали, руб/т					38.05

Рисунок 15 – Оптимизацию по критерию минимума себестоимости стали от изменения доли агломерата в железорудном сырье



#### 4.3 Оптимизация по изменению ПГ/О2

Произведем оптимизацию по критерию максимума производительности от изменения ПГ/О2. Для этого необходимо провести оптимизацию по трем параметрам: расход природного газа, содержание кислорода в дутье и расход холодного дутья.

Содержание кислорода в дутье и расход холодного дутья оставим неизменными, а по удельному расходу природного газа проведем изменения.

Получим следующие значения производительности:

- для доменной печи №6 значение производительности увеличится на 1,68 т/сут при увеличении значения удельного расхода природного газа на 3 м<sup>3</sup>/т;
- для доменной печи №9 значение производительности увеличится на 53,6 т/сут при уменьшении значения удельного расхода природного газа на 9 м<sup>3</sup>/т;
- для доменной печи №10 значение производительности увеличится на 126 т/сут при уменьшении значения удельного расхода природного газа на 18 м<sup>3</sup>/т;
- для доменного цеха значение производительности увеличится на 181 т/сут при уменьшении значения удельного расхода природного газа на 3 м<sup>3</sup>/т;

Результаты оптимизации приведены на рисунке 16.

					270304.2020.401 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		74

	Факторы	ДП6	ДП9	ДП10	Проч	ДЦ
1	Содержание кислорода в дутье, %	29.8	26.9	30.5	29.7	29.4
2	Изменение содержания кислорода в дутье, %	0	0	0		0
3	Удельный расход природного газа, м3/т	114	107	111		104
4	Изменение удельного расхода природного газа, м3/т	3	-9	-18		-3
5	Расход холодного дутья, тыс. м3/ч	157	241	245		643
6	Изменение расхода холодного дутья, тыс. м3/ч	0	0	0		0
7	Изменение УРК, кг/т	-3.1	1.91	14.4	0	4.43
8	Изменение производительности, т/сут	1.68	53.6	126	0	181

Рисунок 16 – Оптимизация по критерию максимума производительности от изменения ПГ/О2

Данные расчетной оптимизации позволяют понять, каким образом, уменьшением или увеличением технологического параметра, можно повлиять на эффективность доменной плавки и получить желаемый результат.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Доменное производство представляет собой очень сложный процесс. Для поддержания непрерывной работы всего производства необходимо своевременно и четко согласовывать большое число различных аспектов производства. Благодаря оптимизации некоторых аспектов можно существенно повысить качество продукта, что позволит повысить его конкурентоспособность.

Оптимизация технологических параметров доменного производства позволяет понять, как тот или иной параметр влияет на расход кокса и производство чугуна.

Разработанная экспертная система, которая рассчитывает все изменения расхода кокса и производства чугуна от влияния технологических параметров, помогает узнать какое содержание того или иного параметра нужно увеличить или уменьшить для наилучшего результата.

					270304.2020.401 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		76

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1 Доменное производство. – <https://vuzlit.ru/2195181/>
- 2 Механическое оборудование доменных цехов. – <https://markmet.ru/kniga-po-metallurgii/mekhanicheskoe-oborudovanie-domennykh-tsekhov/>
- 3 Спирин, Н.А. Информационные системы в металлургии: конспект лекций (отдельные главы из учебника для вузов) / Н.А. Спирин, В.В. Лавров. – Екатеринбург.: Уральский государственный технический университет, 2004. – 495 с.
- 4 Товаровский, И.Г. Нормативная оценка влияния параметров доменной плавки на расход кокса и производительность / И.Г. Товаровский // Сталь. – 2014. – №5. – С. 4-11
- 5 Братковский, Е.В. Анализ эффективности работы доменной печи по производственным данным: Методические указания для выполнения домашнего задания / Е.В. Братковский, А.В. Заводяный, А.Н. Шаповалов. – Новотроицк.: НФ НИТУ «МИСиС», 2011. – 34 с.
- 6 Обзор алгоритмов кластеризации данных. – <https://habr.com/ru/post/101338/>
- 7 Андронов, В.Н. Современная доменная плавка: Учебное пособие. СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2001. – 100 с.
- 8 Вегман, Е.Ф. Металлургия чугуна: Учебник для вузов / Е.Ф.Вегман, Б.Н.Жеребин. – М.: Металлургия, 1989. – 512 с.
- 9 Рамм, А.Н. Современный доменный процесс / А.Н. Рамм. – М.: Металлургия, 1989. – 304 с.
- 10 Бабарыкин, Н.Н. Теория и технология доменного процесса: Учебное пособие / Н.Н. Бабарыкин. – Магнитогорск: ГОУ ВПО МГТУ, 2009. – 257 с.
- 11 Товаровский, И.Г. Доменная плавка в мощных печах / И.Г. Товаровский, Р.Д. Каменев, Г.Б. Рабинович. – Москва, 1968. – 118 с.

					270304.2020.401 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		77

12 Воронцов, К.В. Алгоритмы кластеризации и многомерного шкалирования: Курс лекций. МГУ, 2007. – 18 с.

13 Черняк С.С. Металловеды / С. С. Черняк. – Иркутск: Изд-во ИрГУ. – 2000. – 532 с.

14 Павленко, Н.И. История металлургии в России XVIII века. Заводы и заводовладельцы / Н.И. Павленко. – М.: Издательство АН СССР, 1962. — 566 с.

15 Паркон, В.Д. Требования европейских доменщиков к качеству кокса / В.Д. Паркон // Кокс и химия. – 2001. – № 4. – С. 24-26.

16 Большаков, В.И. Анализ комплексных показателей теплового режима и особенности их использования при регулировании теплового состояния доменной печи / В.И. Большаков, Н.А. Гладков, И.Г. Муравьева, Ю.С. Семенов, Е.И. Шумельчик, Е.А. Белошапка // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. – 2012. – №26. – С. 62-78.

17 Истомина, А.С. Разработка логико-динамической модели с целью повышения эффективности выплавки чугуна в доменной печи: диссертация на соискание ученой степени канд. техн. наук / А.С. Истомина. – Екатеринбург, 2017. – 181 с.

18 Казаринов Л.С. Анализ влияния параметров теплового состояния доменной печи на ее эффективность / Л.С. Казаринов, Х.М. Мохсен, Т.А. Барбасова // Известия высших учебных заведений северо-кавказский регион. – 2018. – №2. – С. 23-27.

19 Казаринов Л.С. Метод эффективного управления доменным процессом на основе кластерного анализа / Л.С. Казаринов, Т.А. Барбасова, Х.М. Мохсен // Вестник. – 2016. – №2. – С. 164-169.

20 Товаровский, И.Г. Курс познания процессов доменной плавки: Учебное пособие / И.Г. Товаровский. – М.: Изд-во Нобель Пресс, 2013. – 320 с.

21 Полтавец, В.В. Доменное производство / В.В. Полтавец. – М., 1981. – 349 с.

22 Жданов, В.С. Структурные характеристики углей различных бассейнов / В.С. Жданов // Кокс и химия. – 1992. – № 9. – С. 5-8.

23 Улахович, В.А. Выплавка чугуна в мощных доменных печах / В.А. Улахович. – М.: Metallurgy, 1991. – 172 с.

24 Гитис, Л.Х. Кластерный анализ в задачах классификации, оптимизации и прогнозирования / Л.Х. Гитис. – М.: Изд-во МГГУ, 2004. – 104 с.

25 Дюран, Б. Кластерный анализ / Б. Дюран, П. Оделл. – М.: Книга по Требованию, 2012. – 128 с.

					270304.2020.401 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		79

## ПРИЛОЖЕНИЯ

### ПРИЛОЖЕНИЕ А

Анализ режимов работы доменной печи по содержанию в коксе фракции +80 мм

Таблица А.1 – Диапазоны применимости коэффициентов влияния технологических параметров для режимов работы доменной печи

Режим работы ДП	Диапазоны применимости коэффициентов влияния технологических параметров для режимов работы ДП				
	Производительность чугуна, т/сут	Удельный расход кокса, кг/т	Расход холодного дутья, м <sup>3</sup> /ч	Температура горячего дутья, С <sup>0</sup>	Расход пара на увлажнение, т/час
1	4742 – 5313	401 – 477	216682 – 232631	1079,44 – 1126,01	0 – 1,99
2	4815 – 5313	425 – 485	217697 – 232261	1081,9 – 1126,3	0 – 1,67
3	4774 – 5325	410 – 476,9	219405 – 235137	1053,43 – 1154,09	0 – 2,36
4	4944 – 5436	413 – 460	217703 – 233264	1078,2 – 1154,33	0 – 2,01
5	4673 – 5418	407 – 472	221539 – 233500	864,93 – 1134,64	0 – 1,87
6	4633 – 5459	394 – 431	249509 – 281044	904,4 – 1009,53	0 – 2,07
7	4750 – 5482	389 – 444	259154 – 285501	951,7 – 1008,56	0 – 3,33

Продолжение таблицы А.1

Режим работы ДП	Диапазоны применимости коэффициентов влияния технологических параметров для режимов работы ДП				
	Расход природного газа, м <sup>3</sup> /ч	Температура природного газа, С <sup>0</sup>	Содержание О <sub>2</sub> в дутье, %	Перепад давлений общий, ат.	Давление колошникового газа, ат.
1	16549,76 – 20989,08	от -2,31 до 27,38	25,27 – 27,99	1,34 – 1,51	1,19 – 1,32
2	18158,22 – 21414,12	от 5,34 до 27,99	26,29 – 28,12	1,31 – 1,48	1,22 – 1,34
3	17819,44 – 20926,89	от -15,47 до 1,76	25,13 – 27,78	1,38 – 1,47	1,16 – 1,33
4	18581,41 – 21040,38	от -7,54 до 12,56	26,03 – 28,21	1,42 – 1,54	1,16 – 1,3
5	13907,05 – 20822,43	от -6,91 до 8,12	24,4 – 27,94	1,34 – 1,45	1,22 – 1,29
6	23999,05 – 29689,6	от -10,08 до 24,12	23,77 – 28,75	1,22 – 1,49	1,36 – 1,43
7	24000,08 – 29951,71	от -12,5 до 20,92	25,19 – 31,87	1,33 – 1,52	1,38 – 1,43

Продолжение таблицы А.1

Режим работы ДП	Диапазоны применимости коэффициентов влияния технологических параметров для режимов работы ДП				
	Содержание в чугуна Mn, %	Содержание в чугуна Si, %	Содержание в шлаке Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , %	Содержание в шлаке FeO, %	Истираемость кокса по показателю M10, %
1	0,23 – 0,3	0,53 – 0,95	10,4 – 12,42	0,21 – 0,32	8,72 – 9,73
2	0,25 – 0,32	0,56 – 0,83	11,38 – 13,3	0,2 – 0,33	8,92 – 9,78
3	0,24 – 0,32	0,56 – 0,98	10,79 – 12,97	0,19 – 0,26	8,58 – 9,42
4	0,23 – 0,29	0,57 – 1,11	10,67 – 12,64	0,21 – 0,32	8,78 – 9,95
5	0,2 – 0,31	0,53 – 1,23	10,34 – 12,23	0,2 – 0,3	8,25 – 9,1
6	0,17 – 0,42	0,53 – 0,79	9,43 – 11,22	0,22 – 0,34	7,67 – 8,82
7	0,17 – 0,54	0,51 – 0,96	9,22 – 11,36	0,21 – 0,32	7,70 – 8,67



Продолжение таблицы А.1

Режим работы ДП	Диапазоны применимости коэффициентов влияния технологических параметров для режимов работы ДП				
	Дробимость М25, %	Содержание золы, %	Содержания в коксе фракции +80 мм, %	Содержание С в коксе, %	Реакционная прочность (CRI), %
1	85,35 – 87,53	12,45 – 13,15	24,57 – 39,57	82,85 – 84,12	31,5 – 33,6
2	85,45 – 87,4	12,47 – 13,02	20,32 – 40,05	83,07 – 84,15	31,7 – 33,7
3	85,05 – 87,78	12,5 – 12,95	18,3 – 31,95	82,94 – 85,02	30,8 – 33,8
4	84,9 – 87,02	12,6 – 13,2	19,45 – 32,8	82,7 – 83,96	31,5 – 34
5	85,62 – 87,67	12,6 – 13,23	23,8 – 38,85	82,49 – 83,96	31,6 – 34,1
6	86,87 – 89,17	12,6 – 13,1	22,25 – 37,8	81,42 – 84,27	32,1 – 40,1
7	85,95 – 89	12,15 – 12,9	18,8 – 33,8	82,93 – 84,96	32,3 – 40,1

Продолжение таблицы А.1

Режим работы ДП	Диапазоны применимости коэффициентов влияния технологических параметров для режимов работы ДП			
	Горячая прочность (CSR), %	Содержание Fe в агломерате, %	Основность агломерата, д.е.	Содержание Zn в агломерате, %
1	47,4 – 51,5	54,2 – 55,52	1,59 – 1,75	0,02 – 0,05
2	46 – 50,9	53,24 – 55,38	1,59 – 1,86	0,02 – 0,05
3	46,9 – 52,7	54,71 – 56,08	1,51 – 1,86	0,03 – 0,05
4	46,5 – 51,3	53,88 – 55,4	1,68 – 2,13	0,02 – 0,04
5	46,3 – 51,2	54,51 – 55,76	1,59 – 1,81	0,02 – 0,05
6	33,3 – 50,2	53,76 – 56,1	1,63 – 2,02	0,03 – 0,05
7	33,3 – 50,2	49,29 – 55,48	1,72 – 2,23	0,03 – 0,05

Окончание таблицы А.1

Режим работы ДП	Диапазоны применимости коэффициентов влияния технологических параметров для режимов работы ДП			
	Содержание фракции 5-0 в агломерате, %	Доля агломерата рудной шихты	Доля Михайловских окатышей в шихте	Доля Соколовских окатышей в шихте
1	7 – 9,95	0,63 – 0,72	0,1 – 0,22	0,1 – 0,24
2	7,17 – 9,3	0,56 – 0,67	0,02 – 0,2	0,22 – 0,4
3	7,2 – 9,82	0,58 – 0,68	0 – 0,18	0,13 – 0,4
4	7,69 – 10,6	0,55 – 0,65	0 – 0,18	0,2 – 0,44
5	7,9 – 12,4	0,63 – 0,71	0,08 – 0,27	0,05 – 0,17
6	6,32 – 8,72	0,61 – 0,69	0,17 – 0,38	0 – 0,17
7	7 – 8,8	0,52 – 0,66	0,19 – 0,42	0 – 0,28

Таблица А.2 – Средние значения технологических параметров для режимов работы доменной печи в зависимости от содержания в коксе фракции +80 мм

Режим работы ДП	Производительность чугуна, т/сут	Удельный расход кокса, кг/т	Расход холодного дутья, м <sup>3</sup> /ч	Температура горячего дутья, С <sup>0</sup>	Расход пара на увлажнение, т/час
1	4977	437	223682	1116	0,65
2	5012	449	224490	1118	0,73
3	5100	443	225881	1116	0,84
4	5243	432	226121	1120	0,11
5	5142	441	229444	1105	0,80
6	5140	409	265146	995	0,55
7	5261	414	268853	986	0,76

Продолжение таблицы А.2

Режим работы ДП	Расход природного газа, м <sup>3</sup> /ч	Температура природного газа, С <sup>0</sup>	Содержание О <sub>2</sub> в дутье, %	Перепад давлений общий, ат.	Давление колошниково го газа, ат.
1	19641,83	18,29	26,83	1,43	1,27
2	19866,84	17,77	27,39	1,42	1,28
3	19714,43	-7,52	26,41	1,43	1,29
4	20620,91	2,39	27,29	1,47	1,24
5	18909,86	2,60	26,10	1,39	1,28
6	27389,82	5,58	26,66	1,38	1,41
7	28125,69	3,08	27,33	1,42	1,41

Продолжение таблицы А.2

Режим работы ДП	Содержание в чугуне Mn, %	Содержание в чугуне Si, %	Содержание в шлаке Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , %	Содержание в шлаке FeO, %	Истираемость кокса по показателю M10, %
1	0,26	0,72	11,37	0,26	9,24
2	0,28	0,69	12,19	0,25	9,35
3	0,29	0,71	12,06	0,22	8,85
4	0,26	0,71	11,43	0,26	9,36
5	0,24	0,78	11,35	0,24	8,63
6	0,22	0,67	10,28	0,26	8,39
7	0,25	0,71	10,04	0,26	8,18

Продолжение таблицы А.2

Режим работы ДП	Дробимость М25, %	Содержание золы, %	Содержания в коксе фракции +80 мм, %	Содержание С в коксе, %	Реакционная прочность (CRI), %
1	86,61	12,75	30,04	83,54	32,53
2	86,42	12,76	30,97	83,60	32,74
3	86,30	12,73	25,91	83,60	31,52
4	86,10	12,86	25,75	83,23	32,80
5	86,73	12,89	28,81	83,23	32,56
6	87,66	12,91	27,67	83,41	37,31
7	87,74	12,54	26,34	84,01	37,07

Продолжение таблицы А.2

Режим работы ДП	Горячая прочность (CSR), %	Содержание Fe в агломерате, %	Основность агломерата, д.е.	Содержание Zn в агломерате, %
1	49,42	55,09	1,69	0,04
2	48,96	54,55	1,71	0,04
3	51,36	55,30	1,62	0,03
4	48,88	54,49	1,81	0,03
5	49,35	55,14	1,73	0,03
6	41,78	54,54	1,78	0,04
7	40,50	54,36	1,89	0,04

Окончание таблицы А.2

Режим работы ДП	Содержание фракции 5-0 в агломерате, %	Доля агломерата рудной шихты	Доля Михайловских окатышей в шихте	Доля Соколовских окатышей в шихте
1	8,20	0,67	0,16	0,17
2	8,21	0,62	0,10	0,29
3	8,29	0,65	0,11	0,24
4	8,36	0,60	0,13	0,28
5	8,53	0,66	0,21	0,11
6	7,99	0,66	0,26	0,08
7	8,09	0,62	0,32	0,07

## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

### Анализ режимов работы доменной печи по влажности дутья

Таблица Б.1 – Диапазоны применимости коэффициентов влияния технологических параметров для режимов работы доменной печи

Режим работы ДП	Диапазоны применимости коэффициентов влияния технологических параметров для режимов работы ДП				
	Производительность чугуна, т/сут	Удельный расход кокса, кг/т	Расход холодного дутья, м <sup>3</sup> /ч	Температура горячего дутья, С <sup>0</sup>	Расход пара на увлажнение, т/час
1	4656,01 – 5443,01	421,76 – 454,99	216954,52 – 231483,91	1126,05 – 1154,72	0 – 2,45
2	4802,54 – 5325,81	415,73 – 477,88	219405,98 – 235137,48	1040,65 – 1125,68	0 – 2,15
3	4730,08 – 5472,5	401,05 – 466,35	216367,51 – 243721,53	1060,55 – 1153,69	0 – 2,23
4	4607,46 – 5403,47	412,88 – 453,23	221092,4 – 242430,31	1133,78 – 1188,4	0,32 – 2,69
5	4942,74 – 5544,02	389,95 – 444,93	218957,6 – 288589,94	864,93 – 1060,27	0 – 2,43
6	4760,09 – 5459,01	404,72 – 469,11	269663,52 – 286592,53	974,04 – 1004,54	0 – 3,26

Продолжение таблицы Б.1

Режим работы ДП	Диапазоны применимости коэффициентов влияния технологических параметров для режимов работы ДП				
	Расход природного газа, м <sup>3</sup> /ч	Температура природного газа, С <sup>0</sup>	Содержание О <sub>2</sub> в дутье, %	Перепад давлений общий, ат.	Давление колошникового газа, ат.
1	14312,12 – 20336,29	от -14,05 до 1,82	23,34 – 27,75	1,44 – 1,59	1,2 – 1,28
2	16639,61 – 20971,95	от -15,47 до 11,31	25,23 – 27,16	1,38 – 1,51	1,25 – 1,33
3	13907,05 – 21434,64	от -1,87 до 25,08	24,66 – 28,21	1,26 – 1,46	0,77 – 1,39
4	14463,57 – 21322,15	от 1,41 до 25,19	25,03 – 27,68	1,48 – 1,61	1,19 – 1,28
5	18897,75 – 29665	от -13,81 до 20,36	21,5 – 31,87	1,3 – 1,53	1,29 – 1,43
6	18522,47 – 29526,65	от -3,29 до 22,68	25,42 – 31,08	1,32 – 1,57	1,37 – 1,43

Продолжение таблицы Б.1

Режим работы ДП	Диапазоны применимости коэффициентов влияния технологических параметров для режимов работы ДП				
	Содержание в чугуна Mn, %	Содержание в чугуна Si, %	Содержание в шлаке Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , %	Содержание в шлаке FeO, %	Истираемость кокса по показателю M10, %
1	0,19 – 0,29	0,58 – 0,92	10,62 – 12,19	0,2 – 0,32	8,15 – 9,08
2	0,25 – 0,31	0,51 – 0,81	10,79 – 12,97	0,16 – 0,26	8,58 – 9,62
3	0,2 – 0,3	0,53 – 0,93	10,34 – 12	0,2 – 0,3	7,6 – 8,83
4	0,21 – 0,7	0,57 – 1,16	10,12 – 12,03	0,13 – 0,28	8,03 – 8,92
5	0,19 – 0,26	0,53 – 0,84	9,52 – 11,57	0,23 – 0,34	7,7 – 9,47
6	0,18 – 0,26	0,53 – 0,8	9,43 – 10,67	0,21 – 0,35	8,1 – 9,12

Продолжение таблицы Б.1

Режим работы ДП	Диапазоны применимости коэффициентов влияния технологических параметров для режимов работы ДП				
	Дробимость M25, %	Содержание золы, %	Содержания в коксе фракции +80 мм, %	Содержание С в коксе, %	Реакционная прочность (CRI), %
1	86,27 – 87,88	12,55 – 13	21,97 – 38,27	82,64 – 84,18	32,2 – 34,5
2	85,05 – 87,78	12,5 – 13,12	18,3 – 39	82,89 – 84,28	30,8 – 33,2
3	86,57 – 88,85	12,2 – 13,15	24,97 – 40,07	82,56 – 84,18	30,9 – 34,4
4	86,4 – 88,23	12,4 – 13,05	23 – 49,2	82,71 – 84,37	29,9 – 34,3
5	85,48 – 89	12,35 – 13,15	20,72 – 37,8	82,78 – 84,46	29,53 – 33,7
6	86,47 – 88,52	12,4 – 13,15	18,8 – 37,77	82,34 – 84,1	29,53 – 40,1

Продолжение таблицы Б.1

Режим работы ДП	Диапазоны применимости коэффициентов влияния технологических параметров для режимов работы ДП			
	Горячая прочность (CSR), %	Содержание Fe в агломерате, %	Основность агломерата, д.е.	Содержание Zn в агломерате, %
1	45,1 – 50,1	55,35 – 56,43	1,57 – 1,86	0,02 – 0,04
2	48,2 – 52,7	54,49 – 55,84	1,57 – 1,72	0,03 – 0,05
3	45,8 – 52,6	54,65 – 55,92	1,59 – 1,94	0,02 – 0,04
4	46,7 – 54,6	54,87 – 55,82	1,74 – 1,82	0,04 – 0,07
5	39,23 – 52,6	49,29 – 55,57	1,64 – 1,94	0,02 – 0,05
6	33,3 – 50	53,24 – 55,21	1,7 – 2,03	0,03 – 0,05

Окончание таблицы Б.1

Режим работы ДП	Диапазоны применимости коэффициентов влияния технологических параметров для режимов работы ДП			
	Содержание фракции 5-0 в агломерате, %	Доля агломерата рудной шихты	Доля Михайловских окатышей в шихте	Доля Соколовских окатышей в шихте
1	7,55 – 8,85	0,6 – 0,72	0,11 – 0,23	0,07 – 0,25
2	7,65 – 8,99	0,6 – 0,68	0 – 0,21	0,12 – 0,4
3	7,47 – 12,4	0,63 – 0,72	0,11 – 0,3	0,04 – 0,22
4	7,2 – 9,53	0,65 – 0,71	0,17 – 0,23	0,06 – 0,17
5	6,4 – 9,35	0,6 – 0,7	0,16 – 0,31	0,04 – 0,21
6	6,38 – 8,68	0,52 – 0,68	0,14 – 0,3	0,04 – 0,28

Таблица Б.2 – Средние значения технологических параметров для режимов работы доменной печи в зависимости от содержания в коксе фракции +80 мм

Режим работы ДП	Производительность чугуна, т/сут	Удельный расход кокса, кг/т	Расход холодного дутья, м <sup>3</sup> /ч	Температура горячего дутья, С <sup>0</sup>	Расход пара на увлажнение, т/час
1	5224,26	437,16	224192,97	1150,53	1,51
2	5064,73	452,15	225635,09	1115,43	0,70
3	5195,92	441,53	232348,55	1115,86	0,94
4	5105,35	434,84	232681,09	1153,42	1,78
5	5231,22	424,76	270184,07	996,52	0,57
6	5163,18	427,80	279862,03	998,47	0,55

Продолжение таблицы Б.2

Режим работы ДП	Расход природного газа, м <sup>3</sup> /ч	Температура природного газа, С <sup>0</sup>	Содержание О <sub>2</sub> в дутье, %	Перепад давлений общий, ат.	Давление колошниково-го газа, ат.
1	18560,97	-3,31	25,97	1,51	1,25
2	19432,09	-1,71	26,50	1,43	1,29
3	19985,72	11,79	26,67	1,40	1,21
4	19041,08	20,44	26,22	1,54	1,22
5	24179,49	1,03	27,47	1,43	1,40
6	25908,52	13,88	28,37	1,44	1,40

Продолжение таблицы Б.2

Режим работы ДП	Содержание в чугуне Mn, %	Содержание в чугуне Si, %	Содержание в шлаке Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , %	Содержание в шлаке FeO, %	Истираемость кокса по показателю M10, %
1	0,24	0,74	11,61	0,24	8,66
2	0,28	0,68	11,94	0,22	9,06
3	0,24	0,72	11,23	0,25	8,20
4	0,28	0,75	10,90	0,24	8,41
5	0,23	0,67	10,30	0,27	8,47
6	0,22	0,66	10,05	0,26	8,65



Продолжение таблицы Б.2

Режим работы ДП	Дробимость М25, %	Содержание золы, %	Содержания в коксе фракции +80 мм, %	Содержание С в коксе, %	Реакционная прочность (CRI), %
1	87,16	12,74	29,76	83,34	33,55
2	86,25	12,86	28,65	83,51	31,93
3	87,85	12,84	30,78	83,48	32,19
4	87,73	12,74	33,53	83,49	31,55
5	87,33	12,82	26,85	83,65	32,20
6	87,38	12,80	24,70	83,35	35,57

Продолжение таблицы Б.2

Режим работы ДП	Горячая прочность (CSR), %	Содержание Fe в агломерате, %	Основность агломерата, д.е.	Содержание Zn в агломерате, %
1	47,38	56,02	1,72	0,03
2	50,57	54,95	1,62	0,04
3	50,07	55,24	1,80	0,03
4	51,31	55,43	1,80	0,05
5	48,60	54,46	1,79	0,04
6	40,48	54,36	1,86	0,04

Окончание таблицы Б.2

Режим работы ДП	Содержание фракции 5-0 в агломерате, %	Доля агломерата рудной шихты	Доля Михайловских окатышей в шихте	Доля Соколовских окатышей в шихте
1	8,23	0,67	0,16	0,16
2	8,32	0,66	0,13	0,22
3	8,34	0,66	0,20	0,13
4	8,17	0,69	0,20	0,11
5	8,10	0,65	0,24	0,11
6	7,94	0,63	0,24	0,12

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Схема в чертежи

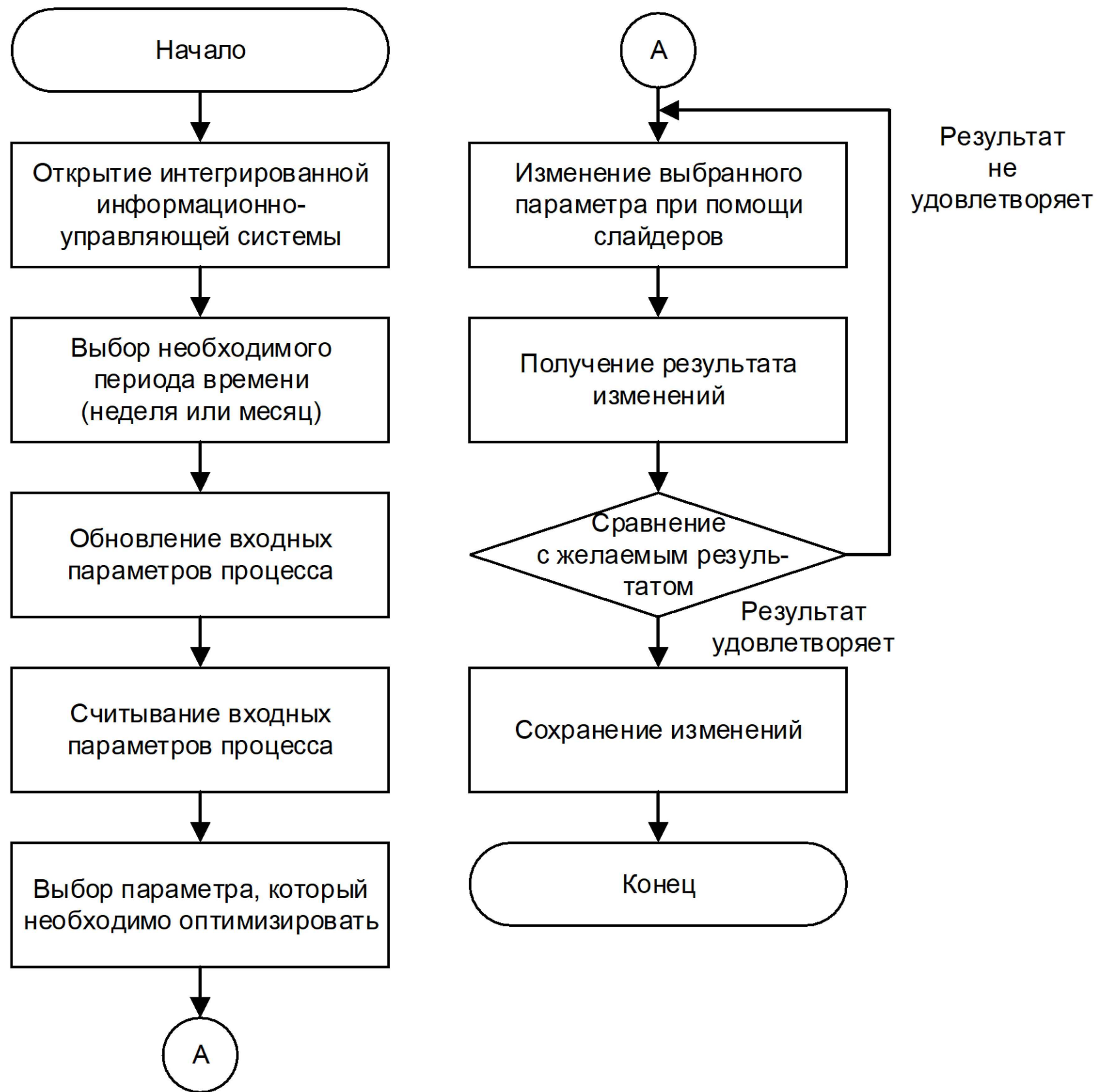
					270304.2020.401 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		91



Инв. N° подл.	Взам. инв. N°	Инв. N дубл.	Подп. и дата

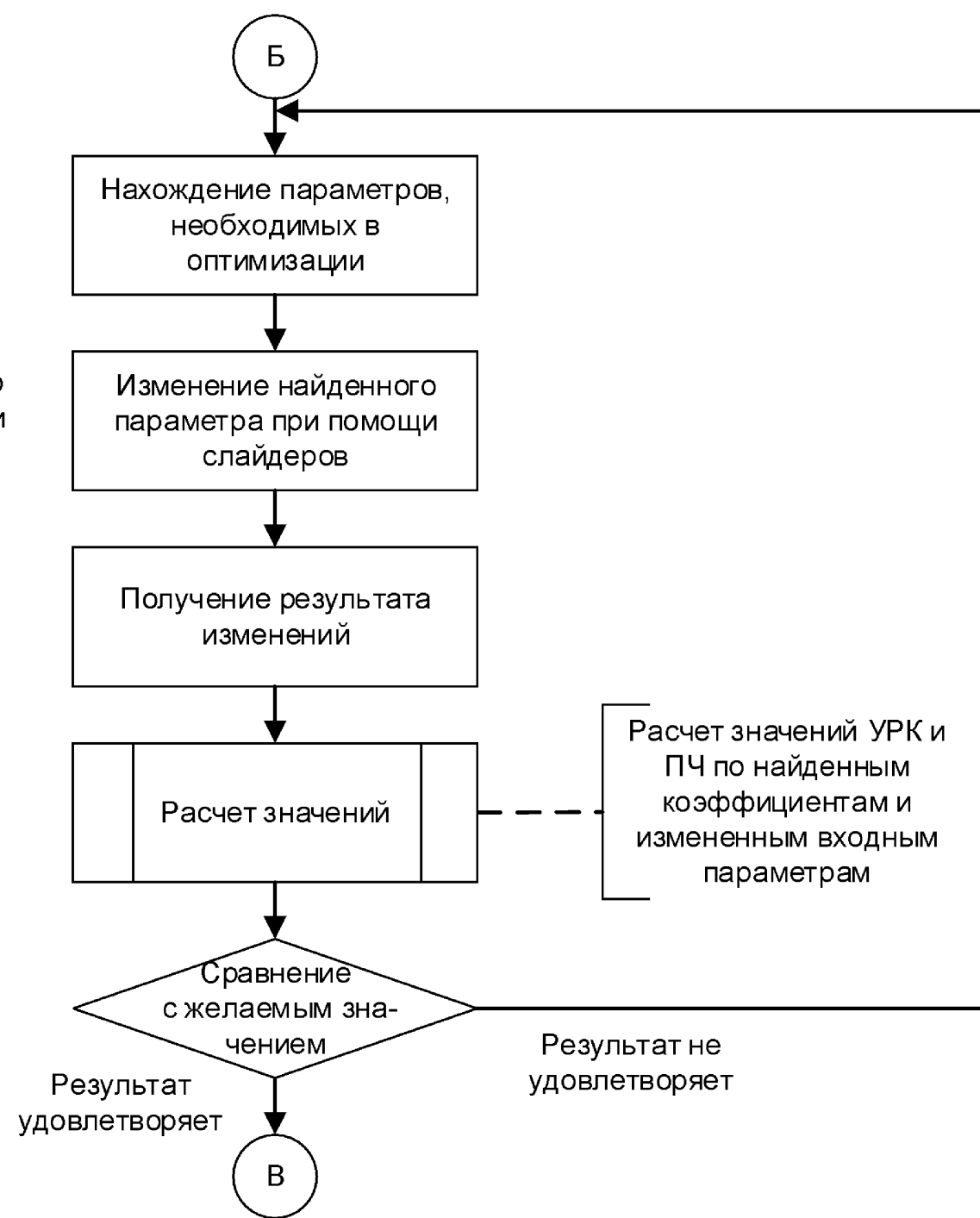
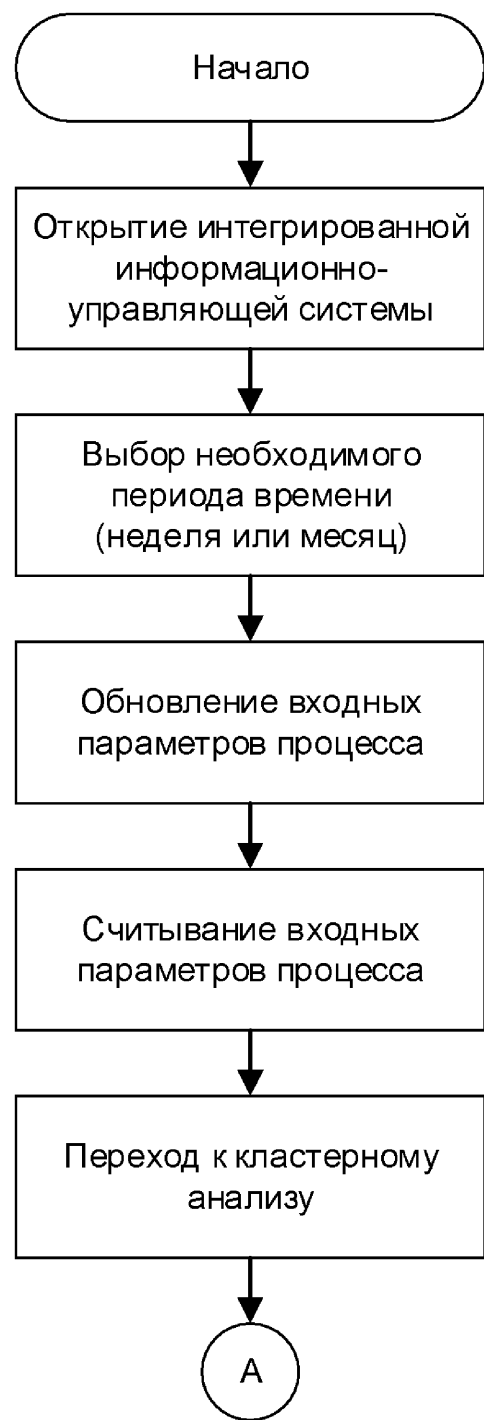
Изм	Лист	N докум.	Подпись	Дата
Разраб.	Самолетова			19.06
Пров.	Барбасова			
Н. контр.	Барбасова			
Утвердил	Казаринов			

270304.2020.401.01 Д22					
Автоматизированная система управления тепловыми режимами работы доменной печи			Лит.	Масса	Масштаб
Алгоритм оптимизации			Лист 1	Листов 1	
ЮУрГУ (НИУ) Кафедра АиУ					



Инд. N° подл.	Погр. и дата
Взам. инв. N°	Инд. N° дубл.
Погр. и дата	

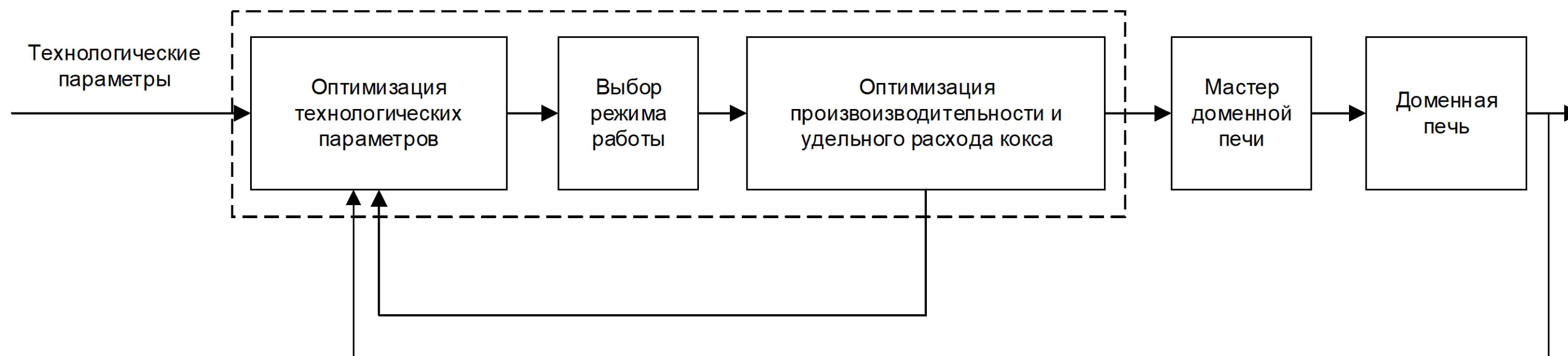
					270304.2020.401.02 Д22			
Изм	Лист	N докум.	Подпись	Дата	Автоматизированная система управления тепловыми режимами работы доменной печи	Лит.	Масса	Масштаб
Разраб.	Самолетова			19.06				
Пров.	Барбасова							
					Лист 1		Листов 1	
Н. контр.	Барбасова				Алгоритм расчета изменений входных технологических параметров			ЮУрГУ (НИУ) Кафедра АиУ
Утвердил	Казаринов							



Погр. и дата	
Инв. N дубл.	
Взам. инв. N*	
Погр. и дата	
Инв. N* подл.	

270304.2020.401.03 Д22				
Изм	Лист	N докум.	Подпись	Дата
				19.06
Разраб.	Самолетова			
Пров.	Барбасова			
Н.контр.	Барбасова			
Утвердил	Казаринов			
Автоматизированная система управления тепловыми режимами работы доменной печи				
Лит.    Масса    Масштаб				
Лист 1    Листов 1				
ЮрГУ (НИУ) Кафедра АиУ				

Экспертная система



Инв. N	подл.
Погр. и дата	
Взам. инв. N*	
Инв. N дубл.	
Погр. и дата	

					270304.2020.401.01 С2			
Изм	Лист	N докум.	Подпись	Дата	Автоматизированная система управления тепловыми режимами работы доменной печи	Лит.	Масса	Масштаб
Разраб.		Самолетова		19.06				
Пров.		Барбасова						
						Лист 1	Листов 1	
Н. контр.		Барбасова			Функциональная схема управления доменным процессом	ЮрГУ (НИУ) Кафедра АиУ		
Утвердил		Казаринов				Копировал Формат А3		

Номер	Формат	Обозначение	Наименование	Кол-во листов
			<u>Текстовые документы</u>	
1	A4	270304.2020.401 ПЗ	Пояснительная записка	68
2	A4	270304.2020.401 ТЗ	Техническое задание	3
			<u>Графические документы</u>	
3	A4	270304.2020.401.01 Д22	Алгоритм оптимизации	1
4	A3	270304.2020.401.02 Д22	Алгоритм расчета изменений входных технологических параметров	1
5	A3	270304.2020.401.03 Д22	Алгоритм расчета изменений удельного расхода кокса и производства чугуна	1
6	A3	270304.2020.401.01 С2	Функциональная схема управления доменным процессом	1

270304.2020.401

Изм.	Кол.уч.	Лист	Индок.	Подпись	Дата	Автоматизированная система управления тепловыми режимами работы доменной печи	Стадия	Лист	Листов
Разработал		Самолетова			19.06				1
Проверил		Барбасова							
Н.контр.		Барбасова					ЮУрГУ (НИУ) Кафедра АиУ		
Утвердил		Казаринов							

Копировал

Формат А4