

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»

РАБОТА ПРОВЕРЕНА

Рецензент, инженер

ООО НПП «Политех-Автоматика»

\_\_\_\_\_/ Е.С. Лукичева

«\_\_» \_\_\_\_\_ 2019 г.

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ

Заведующий кафедрой

д.т.н., профессор

\_\_\_\_\_/ Л.С. Казаринов

«\_\_» \_\_\_\_\_ 2019 г.

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ  
ЭФФЕКТИВНОСТЬЮ ДОМЕННОГО ПРОЦЕССА

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА  
К ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЕ  
ЮУрГУ – 150404.2019.221 ПЗ ВКР

Руководитель работы

к.т.н, доцент

\_\_\_\_\_/ Т.А. Барбасова

«\_\_» \_\_\_\_\_ 2019 г.

Автор работы

студент группы КЭ-227

\_\_\_\_\_/ Е.В. Загоскина

«\_\_» \_\_\_\_\_ 2019 г.

Нормоконтролер

к.т.н, доцент

\_\_\_\_\_/ Т.А. Барбасова

«\_\_» \_\_\_\_\_ 2019 г.

Челябинск 2019

## АННОТАЦИЯ

Загоскина Е.В., Интеллектуальная система управления эффективностью доменного процесса. – Челябинск: ЮУрГУ (НИУ), ВШЭиКН; 2019, 84 с., 45 ил., 9 табл., библиогр. список – 80 наим., 6 прил.

В работе предложен подход управления доменной плавкой для повышения эффективности доменного процесса. Подход основан на моделировании работы доменной печи и оперативной стабилизации параметров на основе полученных математических моделей.

В работе перелagается использовать методы машинного обучения для идентификации модели влияния управляемых параметров на производительность и расход кокса. Полученные модели были использованы в оптимизации в качестве целевых функций. Оптимизационная задача была поделена на две составляющие: оптимизация по критерию максимума производительности чугуна и минимума расхода кокса. На основе результатов полученных при решении оптимизационной задачи был проведен расчет экономического эффекта. Для того чтобы мастер самостоятельно мог выполнять необходимые расчеты, в данной работе так же была предложена концепция экспертной системы.

|                  |             |                    |                |             |  |                                    |             |               |  |  |
|------------------|-------------|--------------------|----------------|-------------|--|------------------------------------|-------------|---------------|--|--|
|                  |             |                    |                |             | <i>ЮУрГУ – 150404.2019.221 ПЗ ВКР</i>  |                                    |             |               |  |  |
| <i>Изм.</i>      | <i>Лист</i> | <i>№ документа</i> | <i>Подпись</i> | <i>Дата</i> |  |                                    |             |               |  |  |
| <i>Разраб.</i>   |             | <i>Загоскина</i>   |                |             | <i>Интеллектуальная система управления эффективностью доменного процесса</i> | <i>Лит.</i>                        | <i>Лист</i> | <i>Листов</i> |  |  |
| <i>Провер.</i>   |             | <i>Барбасова</i>   |                |             |  |                                    | 5           | 84            |  |  |
| <i>Н. Контр.</i> |             | <i>Барбасова</i>   |                |             |  | <i>ЮУрГУ (НИУ)<br/>Кафедра АиУ</i> |             |               |  |  |
| <i>Утверд.</i>   |             | <i>Казаринов</i>   |                |             |  |                                    |             |               |  |  |
|                  |             |                    |                |             |  |                                    |             |               |  |  |

## ОГЛАВЛЕНИЕ

|   |  |
|---|--|
| 1 ОПИСАНИЕ ИССЛЕДУЕМОГО ОБЪЕКТА.....                    | 5                                      |
| 1.1 Развитие доменного производства.....                | 5                                      |
| 1.2 Схема доменной печи.....                            | 9                                      |
| 1.3 Процесс доменной плавки.....                        | 11                                     |
| 2 УПРАВЛЕНИЕ ДОМЕННЫМ ПРОЦЕССОМ.....                    | 14                                     |
| 3 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ И ЕЕ АКТУАЛЬНОСТЬ....  | 17                                     |
| 4 ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ОПИСАНИЯ ДАННЫХ.....           | 18                                     |
| 4.1 Анализ и обработка исходных данных.....             | 18                                     |
| 4.2 Построение модели.....                              | 27                                     |
| 5 ОПТИМИЗАЦИЯ.....                                      | 32                                     |
| 5.1 Описание оптимизационной задачи.....                | 32                                     |
| 5.2 Результаты оптимизации.....                         | 33                                     |
| 6 ЭКОНОМИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ НА ПОЛУЧЕННЫХ ДАННЫХ.....        | 35                                     |
| 7 ЭКСПЕРТНАЯ СИСТЕМА.....                               | 37                                     |
| 7.1 Оптимизация на статистических данных за неделю..... | 37                                     |
| 7.2 Оптимизация на статистических данных за месяц.....  | 44                                     |
| 8 ОПИСАНИЕ СОЗДАНИЯ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ.....       | 49                                     |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....   | 57                                     |
| БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....                           | 58                                     |
| ПРИЛОЖЕНИЕ А.....                                       | <b>Ошибка! Закладка не определена.</b> |
| ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....                                       | <b>Ошибка! Закладка не определена.</b> |
| ПРИЛОЖЕНИЕ В.....                                       | <b>Ошибка! Закладка не определена.</b> |
| ПРИЛОЖЕНИЕ Г.....                                       | <b>Ошибка! Закладка не определена.</b> |
| ПРИЛОЖЕНИЕ Д.....                                       | <b>Ошибка! Закладка не определена.</b> |
| ПРИЛОЖЕНИЕ Е.....                                       | <b>Ошибка! Закладка не определена.</b> |

|      |      |             |         |      |                                |      |
|------|------|-------------|---------|------|--------------------------------|------|
|      |      |             |         |      | ЮУрГУ – 150404.2019.221 ПЗ ВКР | Лист |
| Изм. | Лист | № документа | Подпись | Дата |                                | 3    |

## ВВЕДЕНИЕ

В современной цивилизации основным конструкционным материалом является железо. Производство железа имеет трехтысячелетнюю историю, начиная с плавки металла на кострах в глиняных горшках до сегодняшних промышленных гигантов. Высокая потребность общества в конструкционных материалах привела к развитию металлургии и созданию технологии доменного производства. На сегодняшний момент развитие доменного производства в большей мере происходит по пути интенсификации уже существующих производств. Это означает что металлургические предприятия стремятся увеличивать производительность за счет использования более эффективных средств производства, тем самым усовершенствуя организацию труда и технологические процессы. Стремясь максимально эффективно использовать производственный потенциал, специалисты по оптимизации и управлению воплощают последние достижения научно-технического прогресса.

Основная задача стоящая перед металлургами удовлетворить возрастающую потребность общества в железных материалах при сокращении ресурсной базы. Решение этой задачи определяет логику развития доменного производства. Применение современных методов управления производственным процессом выплавки чугуна позволяет максимально автоматизировать доменный процесс.

Эффективным решением для автоматизации доменного процесса является создание интеллектуальной системы управления эффективностью доменной плавки, основанной на математических зависимостях, описывающих технологический процесс.

|             |             |                    |                |             |                                       |             |
|-------------|-------------|--------------------|----------------|-------------|---------------------------------------|-------------|
|             |             |                    |                |             | <i>ЮУрГУ – 150404.2019.221 ПЗ ВКР</i> | <i>Лист</i> |
|             |             |                    |                |             |                                       | 4           |
| <i>Изм.</i> | <i>Лист</i> | <i>№ документа</i> | <i>Подпись</i> | <i>Дата</i> |                                       |             |

# 1 ОПИСАНИЕ ИССЛЕДУЕМОГО ОБЪЕКТА

## 1.1 Развитие доменного производства

Начало становления доменного производства обычно относят к середине XIV века. Но этому предшествовало получение железа сыродутным способом, причем люди освоили такой метод за три тысячелетия до того, как доменное производство приобрело современный облик.

Существуют археологические находки, которые доказывают существование методов выработки металла в древних цивилизациях. Например, В Сербии найден медный топор V тыс. лет до н.э, относящийся к культуре Винча, в древнем городе Аркаим – металлические наконечники стрел и формы для отливки металла, датируемые III – II тыс. до н. э, и др. В культурах древних времен встречаются серебро, медь, олово, метеоритное железо. Получение железа из руды и выплавка металла было намного сложнее. Такая технология появилась в 1200 году до н.э. у народа Хетты. Железо добывали сыродутным способом, что можно считать предысторией современного доменного производства. До этого о железе были упоминания только как о металле, «упавшем с неба». Сыродутным способом железо добывали вплоть до XIV века. Схема сыродутного процесса изображена на Рисунок 1. Горн представлял из себя небольшое углубление квадратной или прямоугольной формы (шириной и длиной около 70-80 см, глубиной около 40-50 см) и включал в себя стенку А, за которой помещался кожаный мех Н, поставляющий воздух в горн через наклонную фурму В. С – древесный уголь, Е – отсеянная от мелочи руда, засыпалась со стороны Д, противоположной фурме. После того как засыпь была отработана (5-6 часов) горн освобождали от шлаков и отчищали. Готовым продуктом такого процесса являлись крицы, комки пористого восстановленного железа с примесью большого количества шлаков.

|      |      |             |         |      |                                |      |
|------|------|-------------|---------|------|--------------------------------|------|
|      |      |             |         |      | ЮУрГУ – 150404.2019.221 ПЗ ВКР | Лист |
| Изм. | Лист | № документа | Подпись | Дата |                                | 5    |

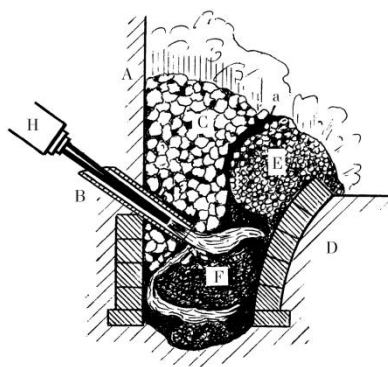


Рисунок 1 – Сыродутный каталонский горн

Такая методика давала угар 30% содержащегося в руде железа.

С ростом потребности людей в железе печи стали делать более экономичными, горн стал увеличиваться, появились небольшие шахтные печи (Швеция, Финляндия), Рисунок 2. С увеличением объемов печи, увеличивалась и производительность. Люди стали применять действие воды, так как рабочей силы уже не хватало для подачи воздуха в горн.

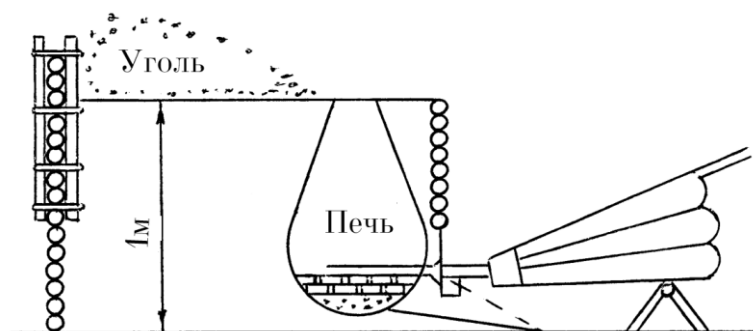


Рисунок 2 – Сыродутная шахтная печь

Выход железа из руды составлял около 40%.

Основные достижения в развитии сыродутного способа получения железа: переход от крицы к жидкому металлу, получение железа в виде чугуна, переход на непрерывный ход печи, теплотери сведены на минимум. Разработка метода получения ковкого металла из чугуна [2].

В период, предшествовавший переходу от сыродутного к доменному производству, производительность печи составляла 500 кг/сутки при высоте

|      |      |             |         |      |                                |      |
|------|------|-------------|---------|------|--------------------------------|------|
|      |      |             |         |      | ЮУрГУ – 150404.2019.221 ПЗ ВКР | Лист |
| Изм. | Лист | № документа | Подпись | Дата |                                | 6    |

печи 5 метров. В России они назывались домницы. Переход от домниц к доменным печам требовал усиления воздухоудувных устройств.

Первый в России металлургический завод с доменными печами был построен в 1637 г. недалеко от Тулы выходцем из Голландии Виниусом. Значительное развитие металлургия железа в России получила при Петре I, когда центр ее был перенесен на Урал с его многочисленными месторождениями богатых и чистых по фосфору железных руд и огромными лесными массивами. Первые уральские доменные печи были задуты в 1701 г. почти одновременно на Каменском и Невьянском заводах.

Так же необходимо отметить, что переломным этапом в доменном производстве стало применение кокса вместо древесного угля. Это произошло по причине резкого роста промышленности, которая требовала большие объемы металла, а лесные ресурсы тем временем начинали истощаться. Это было толчком к применению паровых воздушных машин, переходу на более основные шлаки, развитию производства прочного кокса. Следующим этапом было применение нагретого дутья и использование для этого колошникового газа [3].

Основные черты современной доменной плавки сформированы к концу XIX века. К этому моменту уже большинство стран перешли на использование кокса, была окончательно сформирована конструкция доменной печи.

Дальнейшая эволюция доменной плавки шла по пути укрупнения агрегатов, повышения их производительности за счет интенсификации процессов при одновременном снижении удельного расхода кокса и затрат труда на производство единицы чугуна. Наиболее крупными этапами этой эволюции являются: применение нагрева дутья и последующее использование увлажнения его для дальнейшего увеличения температуры; агломерация пылевидных руд и последующий ввод флюсов в состав агломерата; сжатие газа в рабочем пространстве печи; обогащение бедных руд с последующим их окускованием путем агломерации или окомкования;

|      |      |             |         |      |                                |      |
|------|------|-------------|---------|------|--------------------------------|------|
|      |      |             |         |      | ЮУрГУ – 150404.2019.221 ПЗ ВКР | Лист |
|      |      |             |         |      |                                | 7    |
| Изм. | Лист | № документа | Подпись | Дата |                                |      |

удаление мелких фракций из шихты перед загрузкой в печь; применение природного газа, мазута и измельченного угля для вдувания через фурмы; обогащение дутья кислородом; совершенствование управления доменным производством “сверху” и “снизу” на основе более совершенного контроля технологических параметров. На Рисунок 3 приведено изменение расхода кокса и удельной производительности доменных печей СССР с 1945 года, иллюстрирующее эту особенность, присущую и другим странам [1].

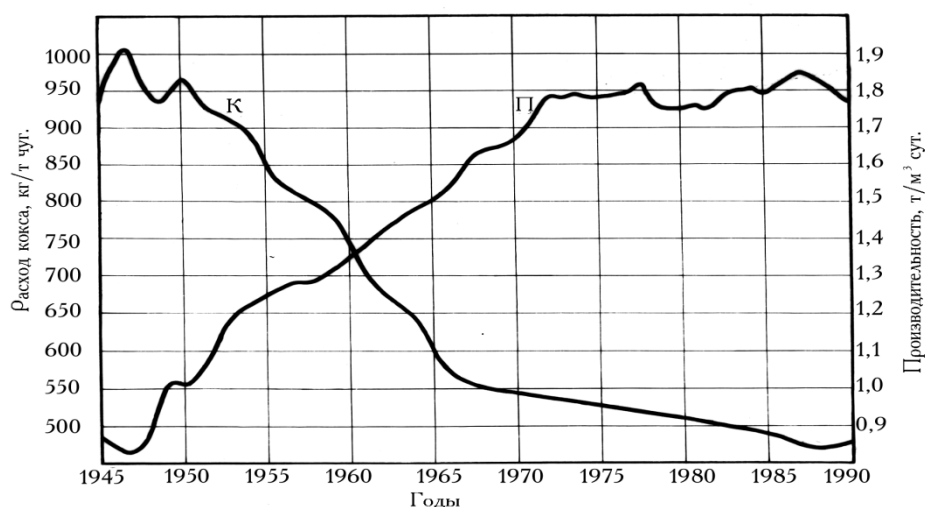


Рисунок 3 – Изменение удельного расхода кокса на передельный чугун и производительности доменных печей СССР после 1945 года (К – удельный расход кокса, кг/т чугуна; П – производительность, т/м³ сут.)



## 1.2 Схема доменной печи

Форма рабочего пространства доменной печи должна соответствовать правильному оседанию плавильных материалов, даже при большой скорости движения, и равномерному распределению газов по поперечным сечениям печи на всей высоте.

Верхний и больший по размерам конус с расходящейся вниз боковой поверхностью называется шахтой, а нижний со сходящей к оси боковой поверхностью – заплечиками. Между шахтой и заплечиками помещают переходную цилиндрическую часть, цилиндрический распар, созданный для того, чтобы в стыке соединения шахты и заплечиков не происходило скопление плавильных материалов. Нижняя часть печи, куда подается дутье, выделяется от заплечиков вертикальными стенами, идущими от лещади до горизонта фурм или несколько выше его, образуя горн. В его верхней части происходит горение углерода топлива, а в нижней части собираются чугун (металлоприемник) и часть шлака. Схема доменной печи в разрезе представлена на Рисунок 4.

В заплечиках правильно устроенных доменных печей в твердом состоянии должен быть лишь один горючий материал, так как в цилиндрическом распаре происходит плавление пустой породы руды и превращение ее в жидкий шлак. В шахте же происходит подготовка плавильных материалов (разложение под действием высокой температуры), затем восстановление руды, обуглероживание железа и, наконец, у распара – плавление чугуна.

Все современные доменные печи снабжены устройствами для улавливания колошниковых газов и автоматического распределения сырьевых материалов на поверхности колошника, т.е. они имеют колошники, закрытые засыпными аппаратами.

Часть шахты, в которую попадают плавильные материалы при завалке в печь, имеет защитные (от разрушения ударами кусков сырых материалов)

|      |      |             |         |      |                                |      |
|------|------|-------------|---------|------|--------------------------------|------|
|      |      |             |         |      | ЮУрГУ – 150404.2019.221 ПЗ ВКР | Лист |
| Изм. | Лист | № документа | Подпись | Дата |                                | 9    |

приспособления. Из конструктивных соображений эту часть шахты делают цилиндрической [8].

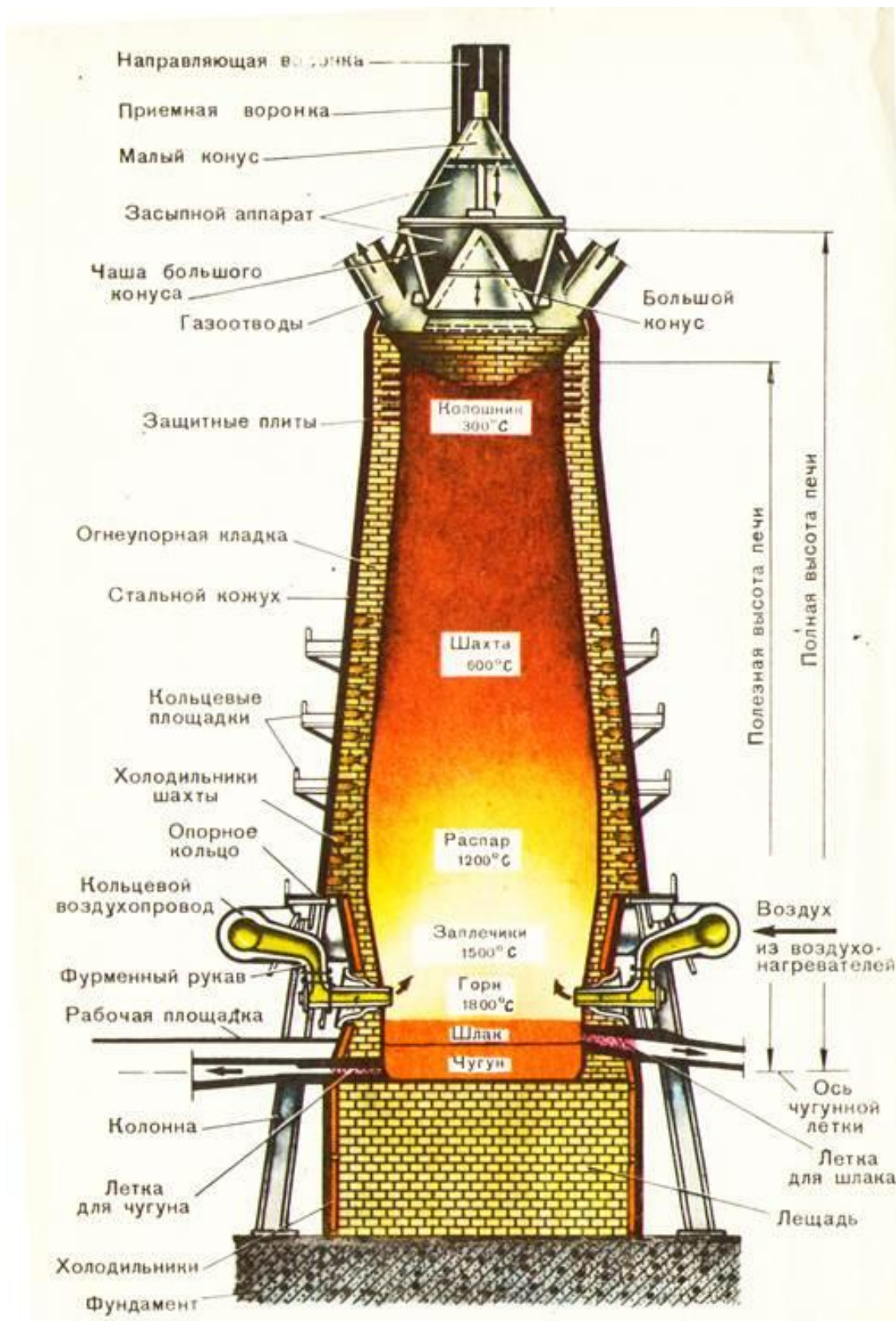


Рисунок 4 – Доменная печь в разрезе

|      |      |             |         |      |
|------|------|-------------|---------|------|
| Изм. | Лист | № документа | Подпись | Дата |
|      |      |             |         |      |

### 1.3 Процесс доменной плавки

Для получения чугуна в доменную печь загружают шихту, которая состоит из следующих компонентов: железорудные материалы (руда, агломерат, окатыши, железосодержащие добавки, например, скрап, марганцевая руда и т.п.), флюс и кокс.

Железная руда – полезное ископаемое, содержащее железо и его соединения в объеме, промышленное извлечение железа из которого целесообразно. Богатая железная руда содержит свыше 57% железа, менее 8-10% кремнезема и менее 0,15% серы и фосфора. Флюс – неорганические вещества, необходимые при выплавке металла из железной руды для снижения температуры плавления и отделения пустой породы от металла. Чаще всего используется известняк, изредка доломит. Кокс – высококачественное бездымное топливо, необходимое для выплавки чугуна. Благодаря коксу происходит процесс восстановления железа из железосодержащей руды, разрыхляются шихтовые материалы.

Доменный процесс основан на принципе противотока. Сверху медленно движется шихта, а на встречу ей движутся раскаленные газы, вдуваемый из фурм кислород  $O_2$  взаимодействуя с углеродом кокса  $C$  образует двуокись углерода:



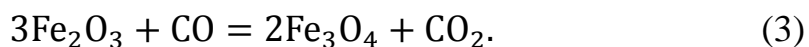
На некотором расстоянии от фурм весь кислород дутья израсходован. Двуокись углерода  $CO_2$  взаимодействует с углеродом кокса  $C$ , образуя окись углерода:



Руда и агломерат омываются потоком горячего газа. При нагреве куска примерно до 200 градусов начинается восстановление окислов железа

|      |      |             |         |      |                                |      |
|------|------|-------------|---------|------|--------------------------------|------|
|      |      |             |         |      | ЮУрГУ – 150404.2019.221 ПЗ ВКР | Лист |
|      |      |             |         |      |                                | 11   |
| Изм. | Лист | № документа | Подпись | Дата |                                |      |

Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> окисью углерода CO. В результате восстановления высшего окисла железа образуется закись окись железа и двуокись углерода:



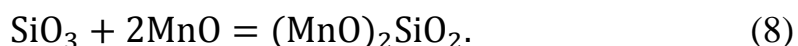
Закись окись железа Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> реагируя с окисью углерода CO переходит в закись железа:



В последней стадии восстановления закись железа FeO вступая в реакцию с окисью углерода CO превращается в губчатое железо:

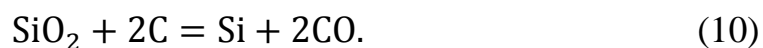
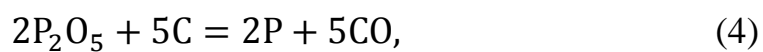


Окись углерода переходит в двуокись углерода. Губчатое железо науглероживается и превращается в чугуны. При температуре около 1200 градусов размягчается и начинает плавиться пустая порода, состоящая в основном из кремнезема SiO<sub>2</sub>. Кремнезем взаимодействует с окисью кальция флюса CaO, а так же не восстановленными окислами железа и марганца, образуя шлак:

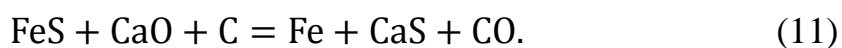


Одновременно с железом восстанавливаются фосфор и кремний, которые растворяются и реагируют с железом:

|      |      |             |         |      |                                |      |
|------|------|-------------|---------|------|--------------------------------|------|
|      |      |             |         |      | ЮУрГУ – 150404.2019.221 ПЗ ВКР | Лист |
|      |      |             |         |      |                                | 12   |
| Изм. | Лист | № документа | Подпись | Дата |                                |      |



Чугун и шлак образуют отдельные слои. Капли чугуна, проходя через слой шлака, частично освобождаются от серы:



Накапливающиеся в горне шлак и чугун периодически выпускают через летку.

|             |             |                    |                |             |                                       |             |
|-------------|-------------|--------------------|----------------|-------------|---------------------------------------|-------------|
|             |             |                    |                |             | <i>ЮУрГУ – 150404.2019.221 ПЗ ВКР</i> | <i>Лист</i> |
| <i>Изм.</i> | <i>Лист</i> | <i>№ документа</i> | <i>Подпись</i> | <i>Дата</i> |                                       | 13          |

## 2 УПРАВЛЕНИЕ ДОМЕННЫМ ПРОЦЕССОМ

### Состав шихты

Железо. Основной полезной составляющей железорудных материалов является железо, образующее чугуны. Содержание железа в шихте определяет не только общую теплотребность плавки, но также влияет на ход восстановления оксидов, газодинамику и ряд других процессов в печи.

Загрузка в доменную печь части железа в металлическом состоянии достигается путем предварительного восстановления окисленных железосодержащих материалов либо добавки отходов готового металла (металлодобавки). Степень металлизации обычно характеризуют отношением количества металлического железа в шихте к общему его количеству.

Опыты проплавки в доменных печах металлизированных материалов, проведенные в различных условиях, показали возможность сокращения расхода кокса на 5-8 % и повышения производительности на 4-9 % [18].

Кокс. Влияние минеральных примесей кокса на его удельный расход поддается расчетной оценке по балансовым соотношениям.

Влияние физико-механических свойств кокса на его расход неоднозначно. Это обусловлено взаимосвязью между собой существующих показателей физико-химических и механических свойств кокса, а также отсутствием до сих пор достаточно представительных критериев их комплексной оценки. По результатам обобщения ДонНИИЧермета [19] увеличение прочности по показателю M25 на 1 % способствует экономии кокса и повышению производительности на 0,6 %, а уменьшение истираемости по показателю M10 на 1 % – экономии кокса и повышению производительности на 2,8 %. Сокращение доли фракции кокса +80 мм способствует экономии кокса и приросту производительности 0,2 % [19].

### Обогащение кислородом, увлажнение и нагрев дутья

При температуре дутья 700 °С обогащение дутья кислородом способствует некоторой экономии кокса за счет увеличения косвенного восстановления железа, обусловленного повышением концентрации восстановительных компонентов в фурменном газе. Прирост производительности составляет 2,82 % при обогащении дутья от 21 до 22 % и уменьшается при дальнейшем обогащении. Для  $\omega = 40$  % прирост производительности составляет 1 %/%.

|      |      |             |         |      |                                |      |
|------|------|-------------|---------|------|--------------------------------|------|
|      |      |             |         |      | ЮУрГУ – 150404.2019.221 ПЗ ВКР | Лист |
| Изм. | Лист | № документа | Подпись | Дата |                                | 14   |

При более высоких температурах дутья обогащение его кислородом способствует повышению расхода кокса, несмотря на увеличение степени косвенного восстановления. Это обусловлено существенным снижением теплоотдачи углерода кокса за счет уменьшения удельного расхода дутья. Прирост производительности печи в этих вариантах значительно меньше, чем в случае низкой температуры дутья. В условиях постоянной доли ПГ в дутье перерасход кокса от повышения концентрации кислорода при той же температуре дутья больше, так как при этом уменьшается расход ПГ на 1 т чугуна, отчего увеличение косвенного восстановления менее значительно. Прирост производительности в этом варианте выше, чем в соответствующем варианте без ПГ.

Наиболее высокий прирост производительности при поддержании  $T = 2000 \text{ }^\circ\text{C}$  за счет добавки ПГ при обогащении дутья кислородом. Высокая экономия кокса в этом варианте обусловлена добавкой ПГ и соответствующим увеличением косвенного восстановления. Аналогичный вариант при более высокой температуре дутья менее эффективен. Во всех вариантах с повышением содержания кислорода в дутье растет теоретическая температура горения, уменьшаются граничная температура зон теплообмена и температура колошникового газа.

Основными факторами, влияющими на величину экономии кокса от нагрева дутья, являются: абсолютный уровень температуры и влажности дутья, концентрация кислорода в нем, расход природного газа, исходное значение расхода кокса, а также расход железорудной шихты (кг/т чугуна) [1].

#### Интенсивность плавки

При постоянных условиях хода доменной плавки повышение интенсивности горения кокса путем увеличения расхода дутья в единицу времени вызывает изменение удельного расхода кокса по кривой с минимумом и соответствующее изменение производительности печи по кривой с максимумом. При этом интенсивность горения кокса, соответствующая минимальному удельному расходу кокса, меньше соответствующей максимальной производительности. Различным условиям плавки (по расходу природного газа и кислорода, выходу шлака, температуре дутья и др.) соответствуют разные абсолютные значения удельного расхода кокса, производительности и интенсивности плавки, но экстремальный характер зависимости сохраняется, хотя взаимное положение экстремумов ( $I_{k\min}$  и  $I_{p\max}$ ) может измениться.

|      |      |             |         |      |                                |      |
|------|------|-------------|---------|------|--------------------------------|------|
|      |      |             |         |      | ЮУрГУ – 150404.2019.221 ПЗ ВКР | Лист |
| Изм. | Лист | № документа | Подпись | Дата |                                | 15   |

Эта закономерность, принципиально установленная А.Н. Раммом [20], качественно подтверждена многочисленными исследованиями, а ее количественное выражение в различных условиях доменной плавки неодинаково [21].

Важнейшей характеристикой упомянутой закономерности является скорость изменения удельного расхода кокса с повышением интенсивности плавки. От величины этой скорости и характера ее изменения зависит интервал значений интенсивности, в пределах которого увеличение расхода дутья в единицу времени приводит к повышению производительности печи. В области низкой степени форсирования хода увеличение интенсивности горения кокса приводит к резкому улучшению газораспределения в печи, заметному снижению удельного расхода кокса и быстрому возрастанию производительности.

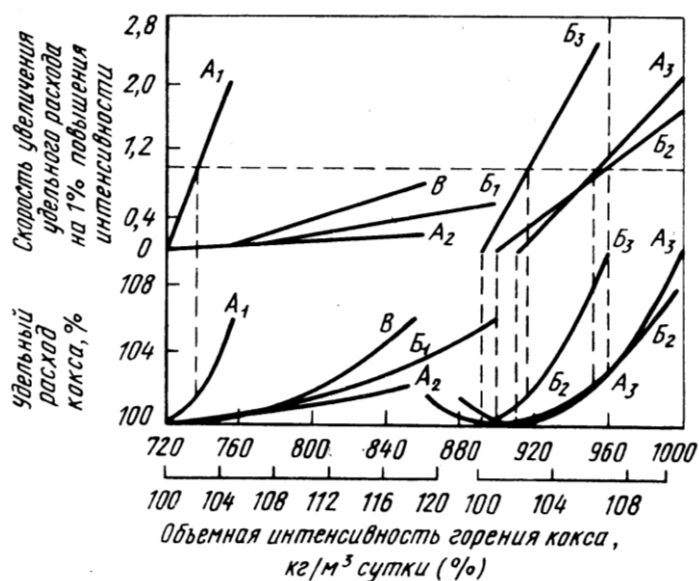


Рисунок 5 – Зависимость удельного расхода кокса и скорости его изменения



### 3 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ И ЕЕ АКТУАЛЬНОСТЬ

Доменный процесс занимает важную роль в металлопроизводстве. Неэффективная работа доменной печи может понести за собой большие экономические потери, поэтому совершенствование технологии доменного производства является важным направлением развития в металлургии.

На сегодняшний день перспективным направлением работ по повышению эффективности ведения доменного процесса является применение методов математического моделирования для изучения влияния управляющих воздействий на расход кокса и производительность и выработке оптимальных решений для эффективной работы печи.

На сегодняшний день собрана фундаментальная база научных работ, посвященных проблеме изучения доменного процесса. Среди отечественных исследователей необходимо выделить работы Товаровского И.Г, Готлиба А.Д., Рамма А.Н.. Среди зарубежных исследователей в этой сфере известны Kule J., Sasaki M., Ono K., Suzuki A., Burgess J.M., Jenkins D.R., Hockings K.L., Kumar S.A., Suresh N., Jeffreson C.P., Gobetto M..

Несмотря на большой исторический опыт металлургической промышленности, сопоставительный анализ показателей и параметров работы доменных печей не всегда позволяет выявить причинно-следственные связи и сделать однозначные выводы о причинах различия. Это обусловлено неполнотой используемой информации и содержащимися в ней погрешностями различной природы, а также неполнотой учета и недостаточной изученностью отдельных факторов. В связи с этим задача моделирования является актуальной и в условиях современного производства.

В данной работе предлагается подход к созданию экспертной системы. Система предлагается в помощь мастеру доменной печи. В рассматриваемом подходе в первую очередь выделяется влияние дутьевого режима на интенсивность плавки и производительность чугуна.

|      |      |             |         |      |                                |      |
|------|------|-------------|---------|------|--------------------------------|------|
|      |      |             |         |      | ЮУрГУ – 150404.2019.221 ПЗ ВКР | Лист |
| Изм. | Лист | № документа | Подпись | Дата |                                | 17   |

## 4 ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ОПИСАНИЯ ДАННЫХ

### 4.1 Анализ и обработка исходных данных

Перед идентификацией модели был проведен анализ статистических данных на предмет выбросов и аномалий. Для этого были построены графики распределения, были выявлены точки данных сильно отдаленных от общей статистики, их считаем выбросами и исключаем из набора данных. На рисунках представлены графики после исключения выбросов.

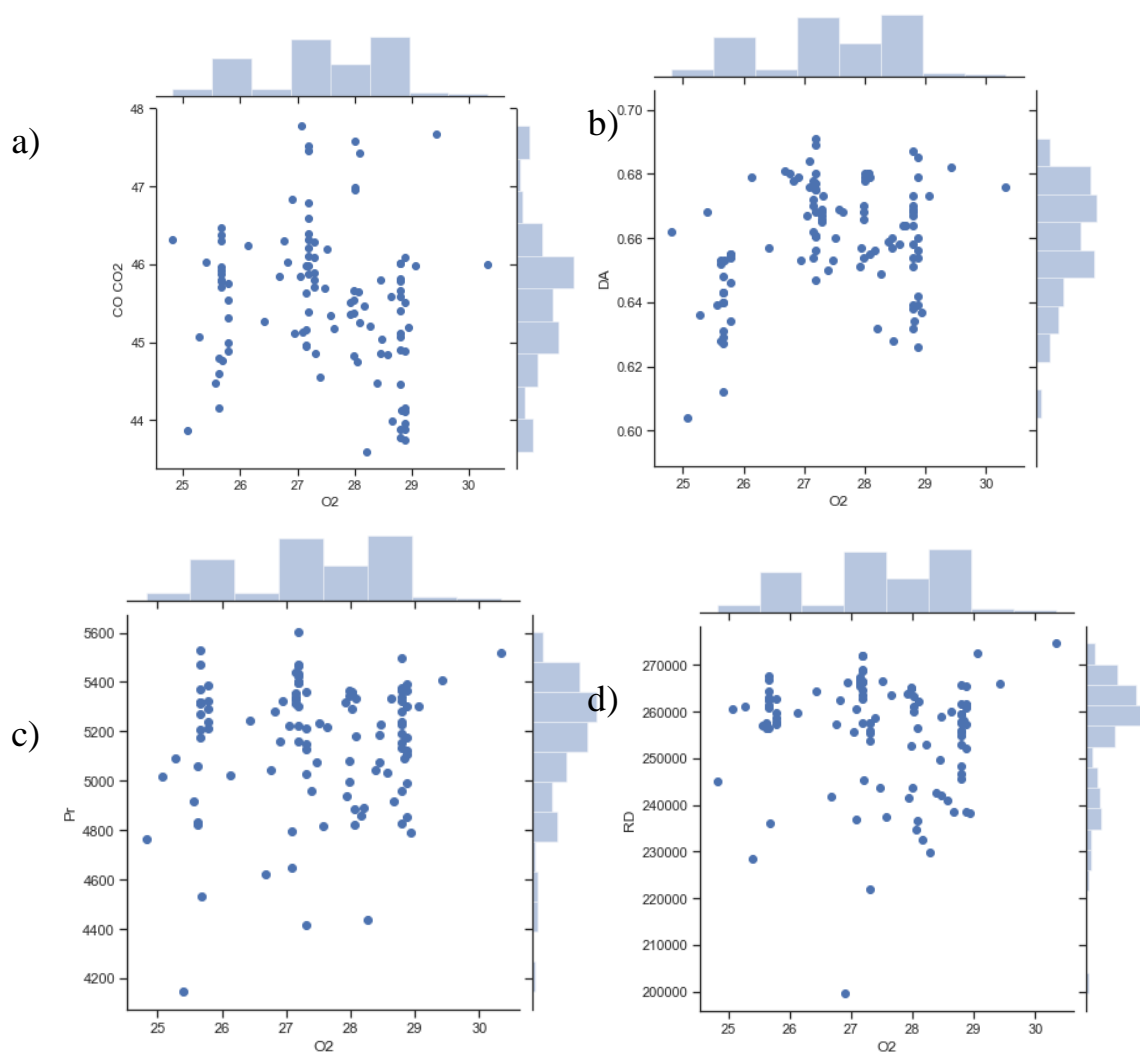


Рисунок 6 – Совмещенные графики статистических данных и графики распределений (а – зависимость содержания СО и СО<sub>2</sub> под колошником от содержания кислорода в дутье, б – зависимость доли агломерата в шихте от содержания кислорода в дутье, с - зависимость производительности чугуна от содержания кислорода в дутье, d - зависимость расхода дутья от содержания кислорода в дутье)

| Изм. | Лист | № документа | Подпись | Дата |
|------|------|-------------|---------|------|
|      |      |             |         |      |

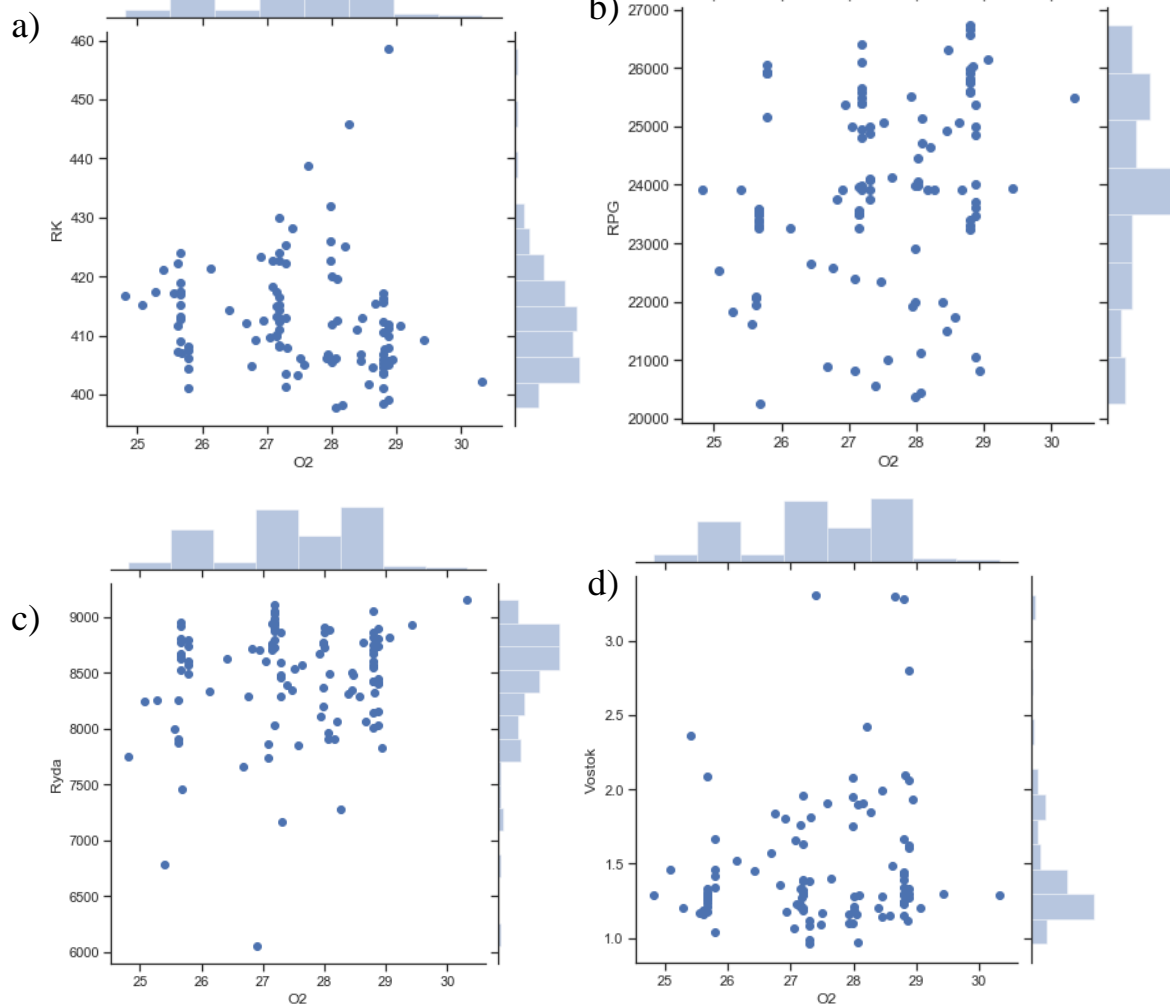


Рисунок 7 – Совмещенные графики статистических данных и графики распределений (а – зависимость расхода кокса от содержания кислорода в дутье, б – зависимость расхода природного газа от содержания кислорода в дутье, с - зависимость руды в шихте от содержания кислорода в дутье, d - зависимость уровня засыпи от содержания кислорода в дутье)

|      |      |             |         |      |
|------|------|-------------|---------|------|
|      |      |             |         |      |
| Изм. | Лист | № документа | Подпись | Дата |

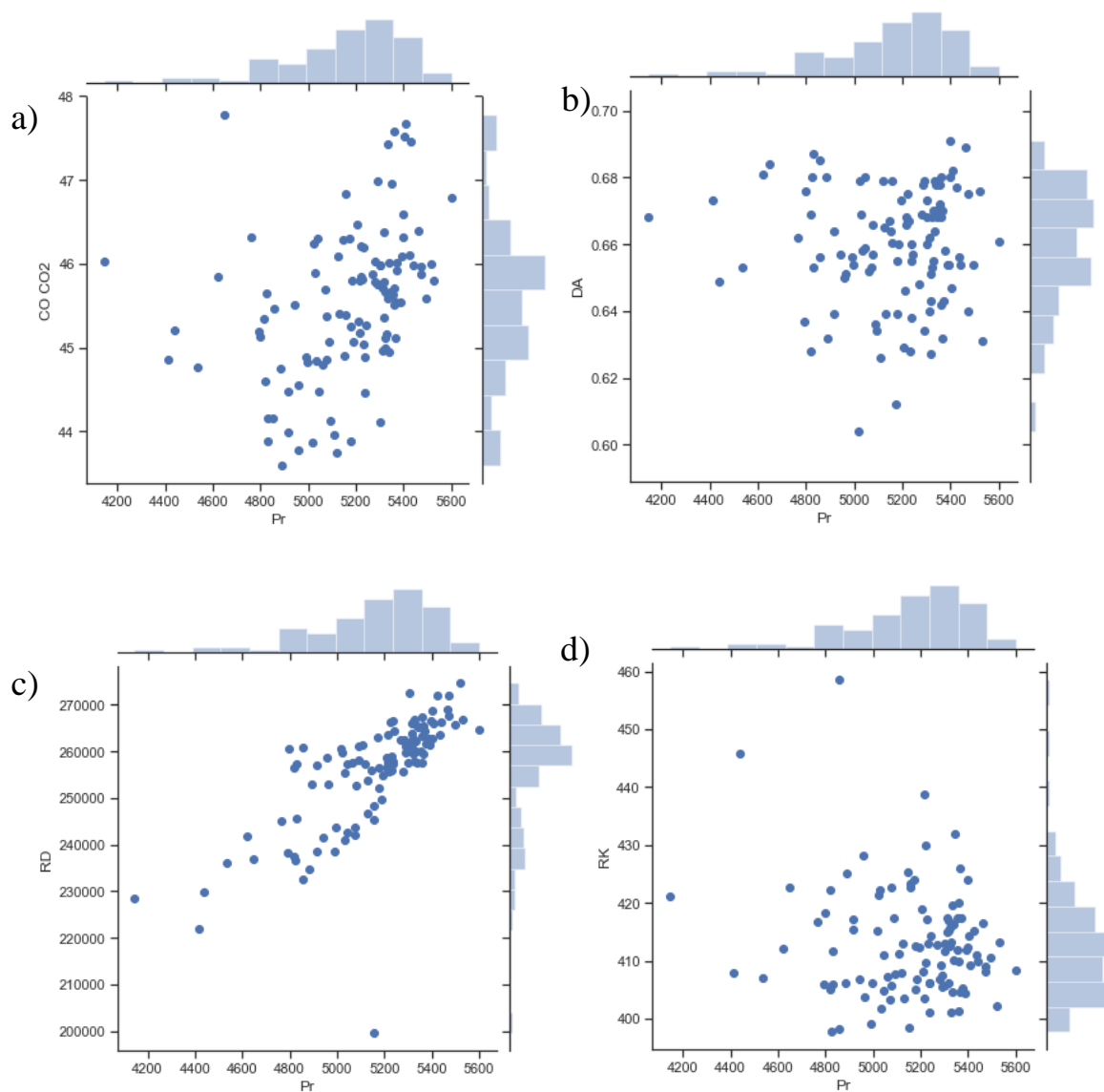


Рисунок 8 – Совмещенные графики статистических данных и графики распределений (а – зависимость содержания СО и СО<sub>2</sub> под колошником от производительности чугуна, б – зависимость доли агломерата в шихте от производительности чугуна, с - зависимость расхода дутья от производительности чугуна, д – зависимость расхода кокса от производительности)

|      |      |             |         |      |
|------|------|-------------|---------|------|
|      |      |             |         |      |
| Изм. | Лист | № документа | Подпись | Дата |

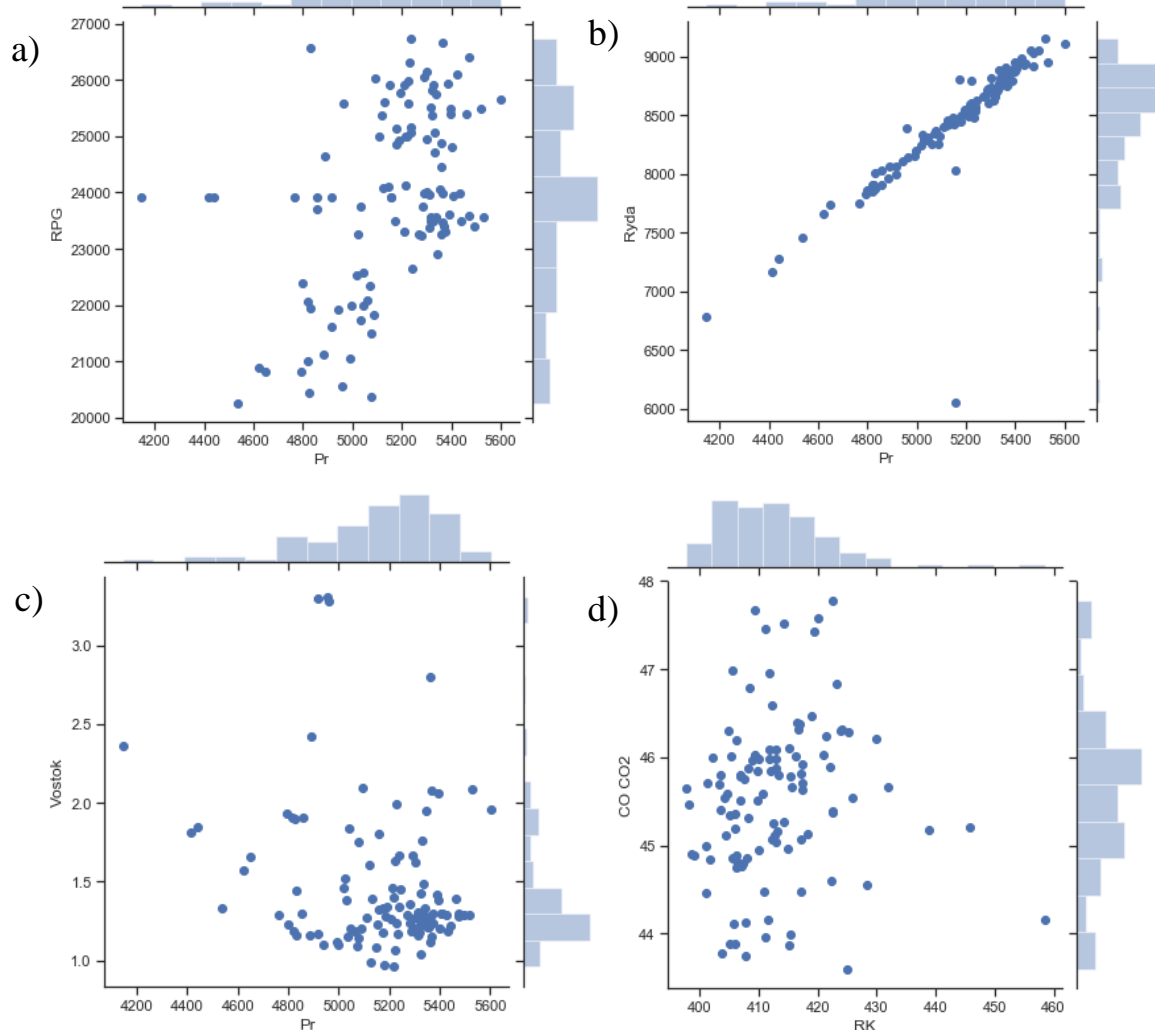


Рисунок 9 – Совмещенные графики статистических данных и графики распределений (а – зависимость расхода природного газа от производительности чугуна, б – зависимость рудной нагрузки от производительности чугуна, с - зависимость уровня засыпи от производительности чугуна, d – зависимость содержания СО и СО<sub>2</sub> под колошником от расхода кокса)

|      |      |             |         |      |
|------|------|-------------|---------|------|
|      |      |             |         |      |
| Изм. | Лист | № документа | Подпись | Дата |

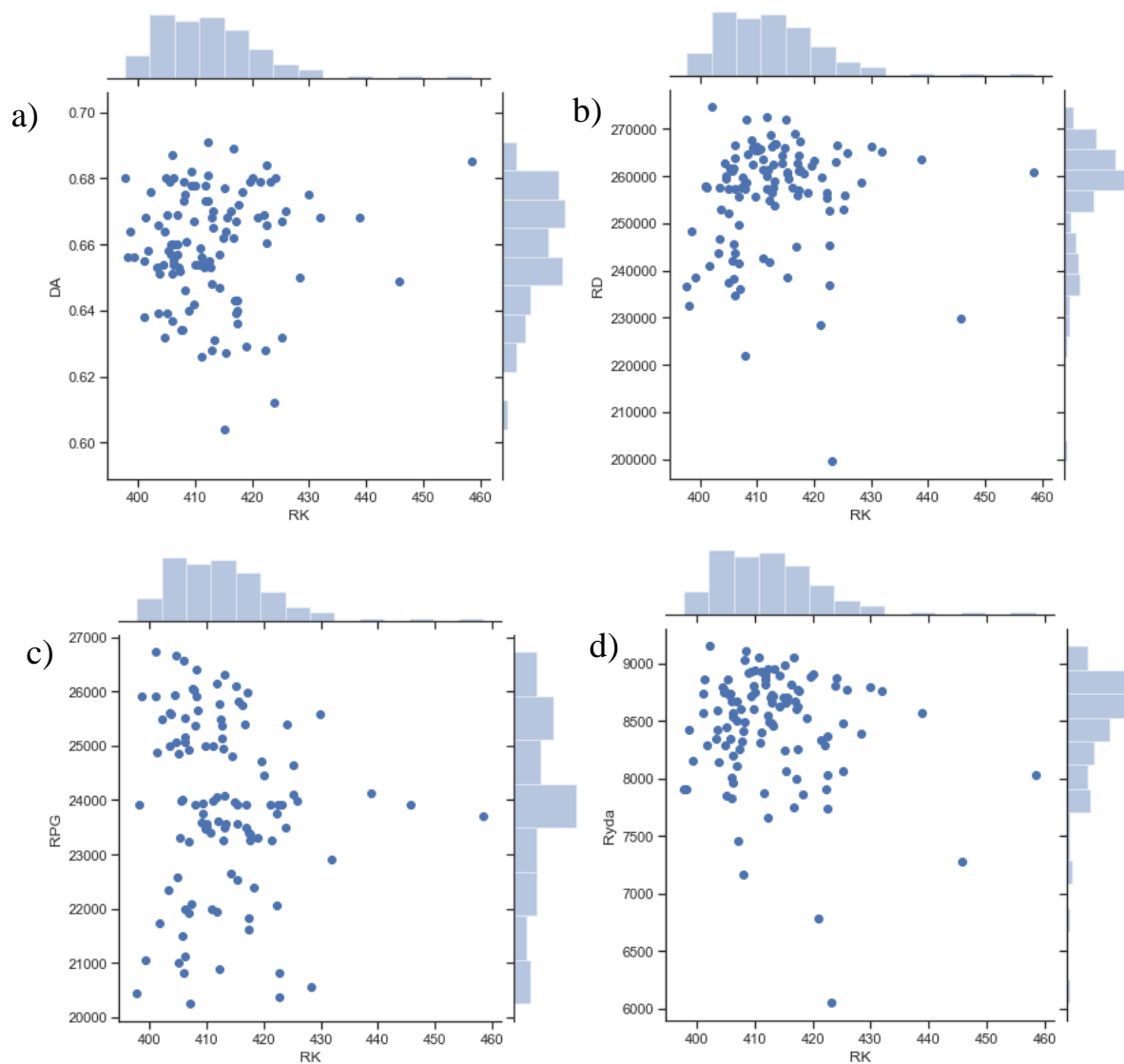


Рисунок 10 – Совмещенные графики статистических данных и графики распределений (а – зависимость доли агломерата от расхода кокса, б – зависимость расход дутья от расхода кокса, с - зависимость расхода природного газа от расхода кокса, d – зависимость рудной нагрузки от расхода кокса)

|      |      |             |         |      |
|------|------|-------------|---------|------|
|      |      |             |         |      |
| Изм. | Лист | № документа | Подпись | Дата |

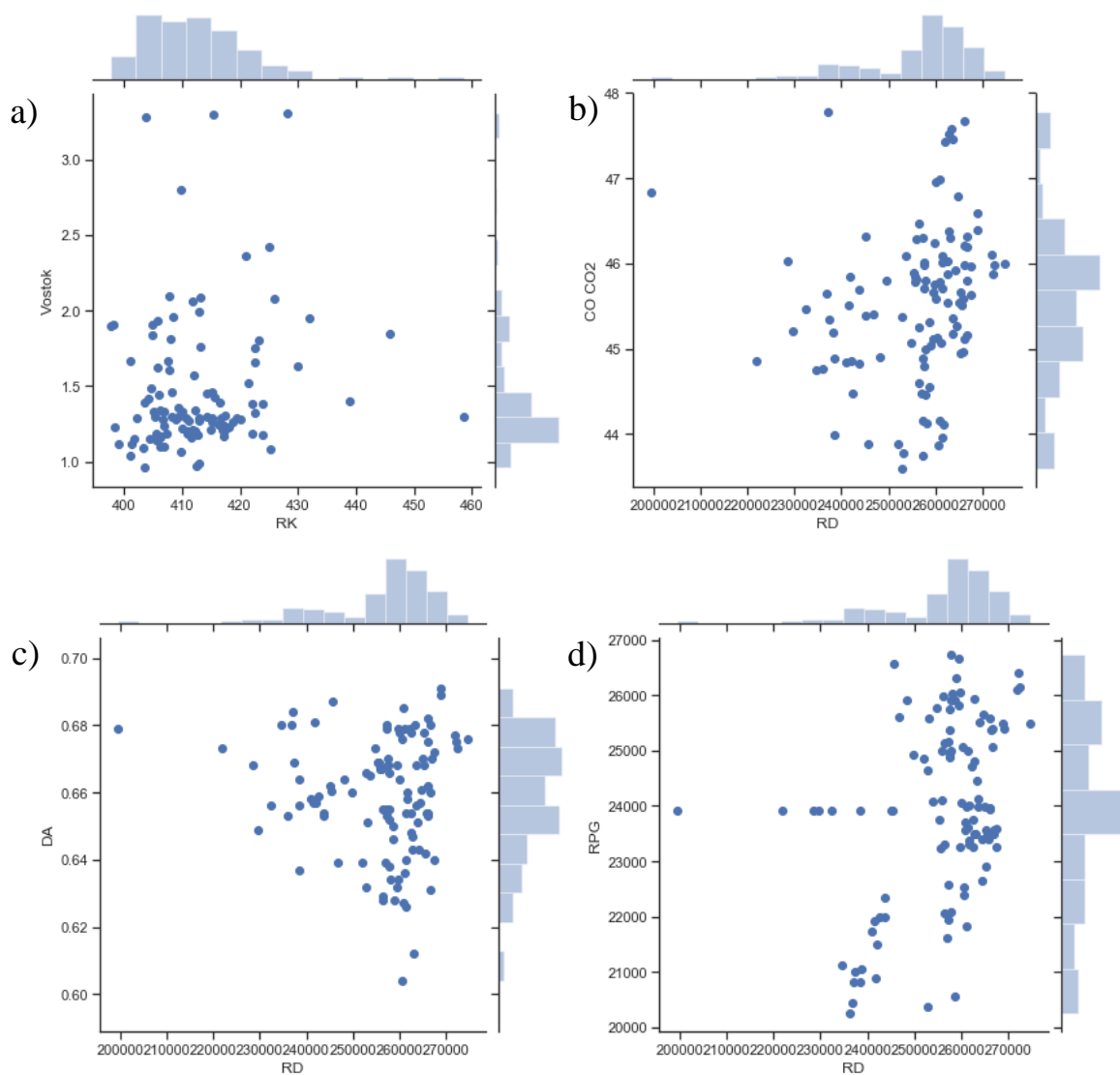


Рисунок 11 – Совмещенные графики статистических данных и графики распределений (а – зависимость уровня засыпи от расхода кокса, б – зависимость содержания СО и СО<sub>2</sub> под колошником от расхода дутья, с – зависимость доли агломерата в шихте от расхода дутья, д – зависимость расхода природного газа от расхода дутья)

|      |      |             |         |      |
|------|------|-------------|---------|------|
|      |      |             |         |      |
| Изм. | Лист | № документа | Подпись | Дата |

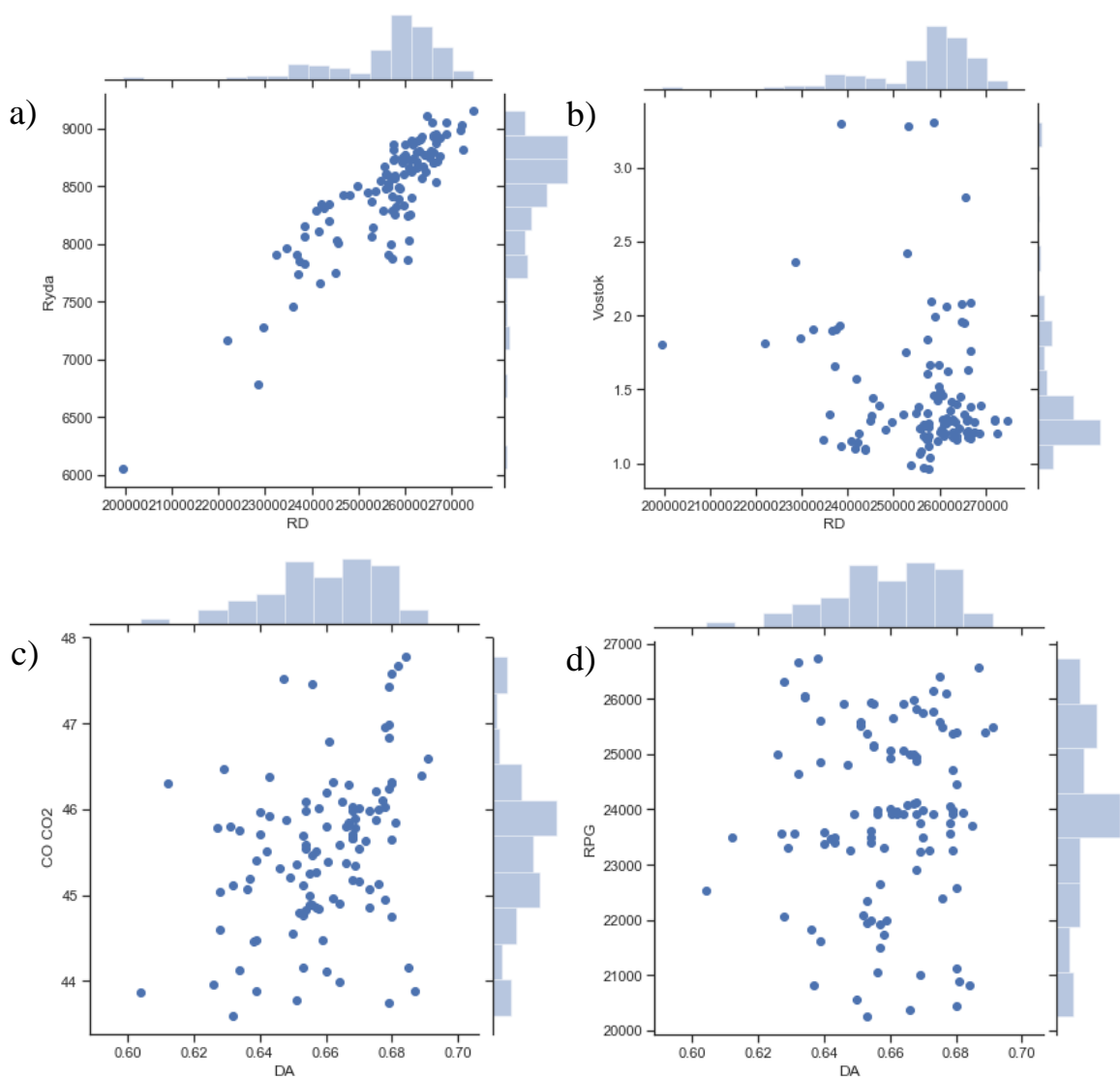


Рисунок 12 – Совмещенные графики статистических данных и графики распределений (а – зависимость рудной нагрузки от расхода дутья, б – зависимость уровня засыпи от расхода дутья, с – зависимость содержания СО и СО<sub>2</sub> под клошником от доли агломерата, d – зависимость расхода природного газа от доли агломерата)

|      |      |             |         |      |
|------|------|-------------|---------|------|
|      |      |             |         |      |
| Изм. | Лист | № документа | Подпись | Дата |



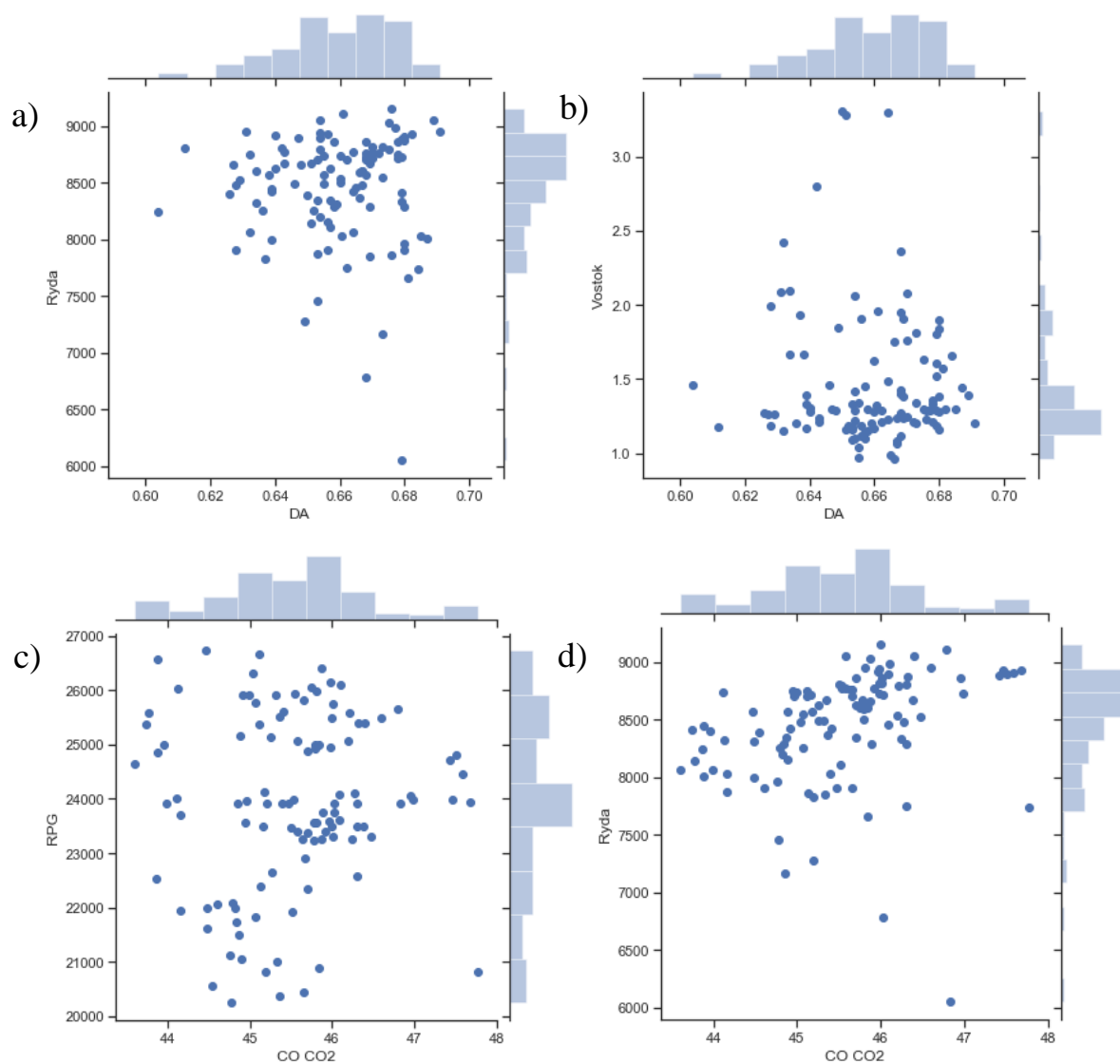


Рисунок 13 – Совмещенные графики статистических данных и графики распределений (а – зависимость рудной нагрузки от доли агломерата в шихте, б – зависимость уровня засыпи от доли агломерата, с – зависимость расхода природного газа от содержания CO и CO<sub>2</sub> под клошником, d – зависимость рудной нагрузки от содержания CO и CO<sub>2</sub> под колошником)

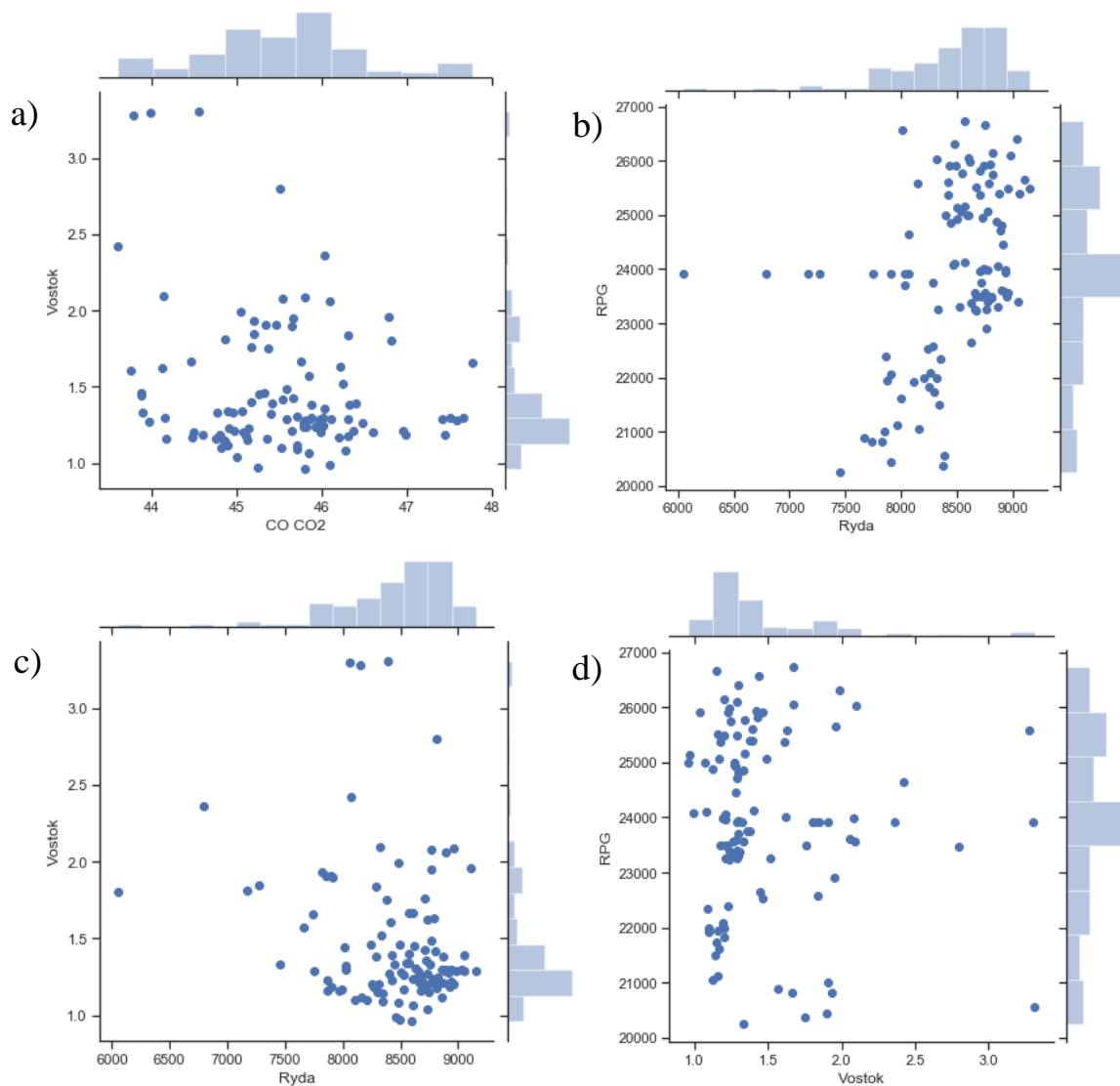


Рисунок 14 – Совмещенные графики статистических данных и графики распределений (а – зависимость уровня засыпи от содержания СО и СО2 под колошником, б – зависимость расхода природного газа от рудной нагрузки, с – зависимость уровня засыпи от рудной нагрузки, д – зависимость расхода природного газа от уровня засыпи)

|      |      |             |         |      |
|------|------|-------------|---------|------|
|      |      |             |         |      |
| Изм. | Лист | № документа | Подпись | Дата |

## 4.2 Построение модели

Перед построением модели был проведен анализ влияния управляемых параметров на производительность чугуна и удельный расход кокса. Оценка влияния управляемых параметров производилась при помощи алгоритма Случайного леса. В таблице 1 и на рисунке 15 представлено процентное влияние каждого параметра на производительность чугуна.

Таблица 1 – Влияние управляемых параметров на производительность чугуна

| Название параметра                              | Влияние на производительность чугуна, % |
|---|---|
| Расход дутья                                    | 56.2                                    |
| Расход природного газа                          | 17.3                                    |
| Содержание кислорода в дутье                    | 7.91                                    |
| Уровень засыпи                                  | 6.83                                    |
| Содержание CO и CO <sub>2</sub> под коолошником | 4.44                                    |
| Температура горячего дутья                      | 3.99                                    |
| Доля агломерата в шихте                         | 3.32                                    |

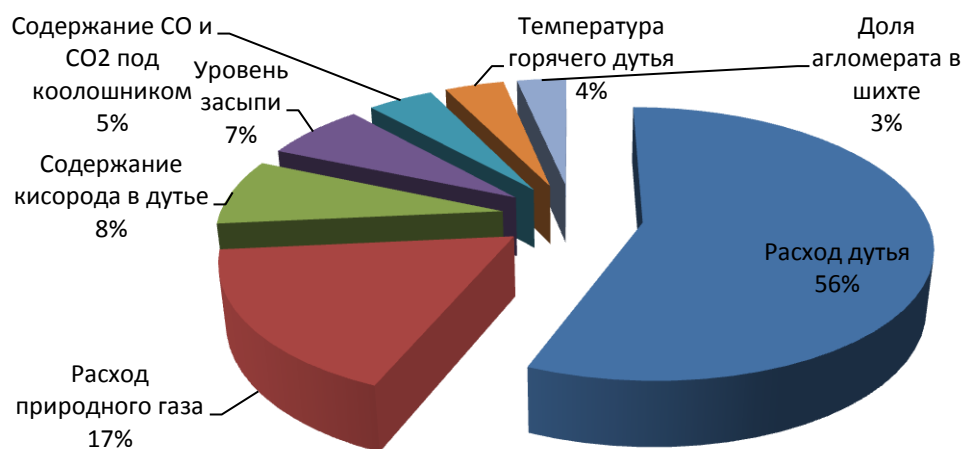


Рисунок 15 – Влияние управляемых параметров на производительность чугуна

В таблице 2 и на рисунке 16 представлено процентное влияние управляемых параметров на расход кокса.

Таблица 2 – Влияние управляемых параметров на расход кокса

| Название параметра                  | Влияние на расход кокса, % |
|-------------------------------------|----------------------------|
| Содержание кислорода в дутье        | 24.30                      |
| Температура горячего дутья          | 12.61                      |
| Расход дутья                        | 10.93                      |
| Доля агломерата в шихте             | 4.19                       |
| Содержание CO и CO2 под коолошником | 14.61                      |
| Содержание руды в шихте             | 11.47                      |
| Уровень засыпи                      | 11.96                      |
| Расход природного газа              | 9.94                       |

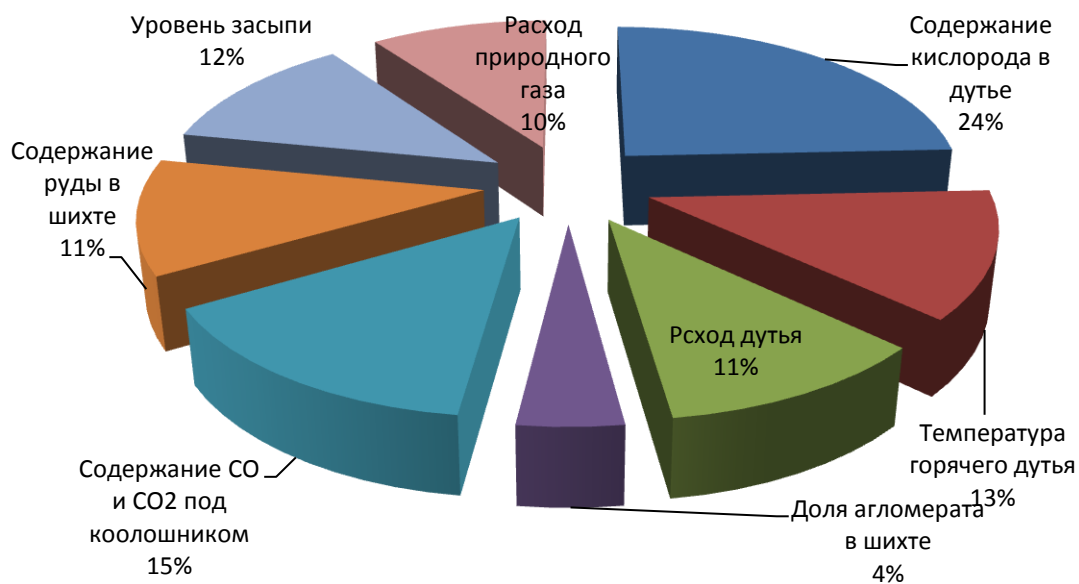


Рисунок 16 – Влияние управляемых параметров на расход кокса

В таблице 3 приведена сопоставительная информация об исследуемых моделях.

Таблица 3 – Описание моделей

| Название модели                         | Описание  |
|---|---|
| Линейная регрессия                      | $y = f(x, b) + \varepsilon, E(\varepsilon) = 0,$ <p>где <math>b</math> – параметры модели,<br/> <math>\varepsilon</math> – случайная ошибка модели</p> $f(x, b) = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_kx_k,$ <p><math>b_j</math> - параметры (коэффициенты) регрессии,<br/> <math>x_j</math> - регрессоры(факторы модели),<br/> <math>k</math> – количество факторов модели</p> |
| Гребневая регрессия<br>(ридж-регрессия) | <p>Ридж-регрессия или гребневая регрессия предполагает оценку параметров по следующей формуле:</p> $\hat{b} = (X^T X + \lambda I)^{-1} X^T y$   |
| Лассо-регрессия                         | <p>Лассо-регрессия сходна с гребневой, за исключением того, что коэффициенты регрессии могут равняться нулю (часть признаков при этом исключается из модели)</p>  |

На рисунках 17 – 18 представлены результаты восстановления исходного сигнала по средствам трех различных моделей. В таблицах 3-4 представлены значения коэффициентов детерминации.

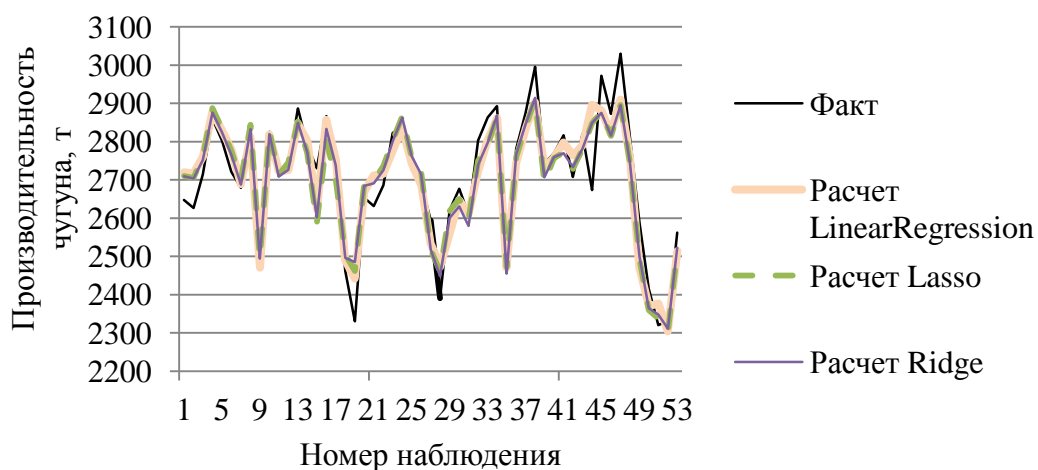


Рисунок 17 – Восстановление значений производительности чугуна

Таблица 3 – Коэффициенты детерминации для трех моделей

|          | Linear Regression | Lasso | Ridge |
|----------|-------------------|-------|-------|
| R2 score | 0.81              | 0.798 | 0.8   |

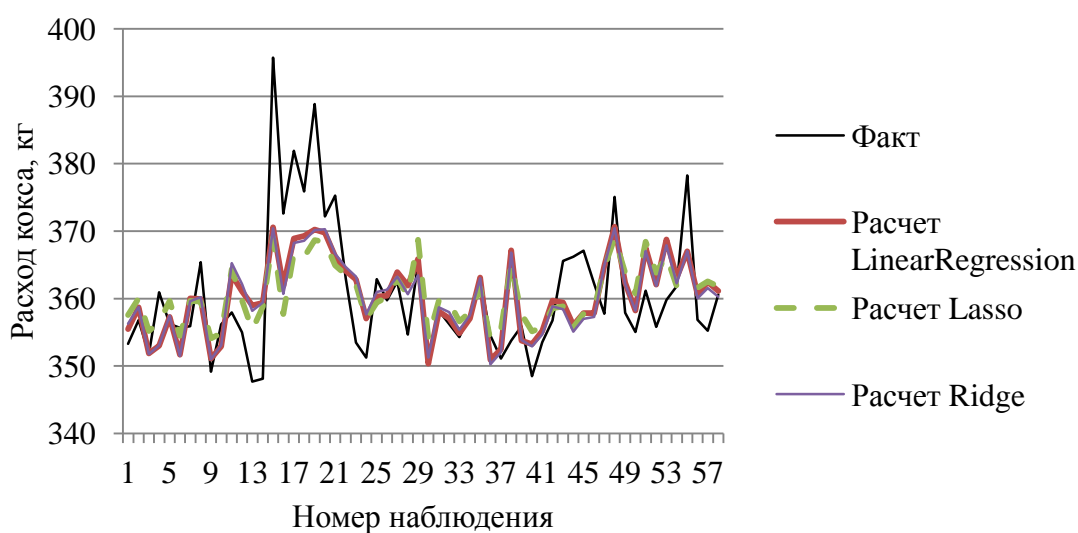


Рисунок 18 – Восстановление значений расхода кокса

Таблица 4 – Коэффициент детерминации для трех моделей

|          | Linear Regression | Lasso | Ridge |
|----------|-------------------|-------|-------|
| R2 score | 0.38              | 0.313 | 0.37  |

Формулы (12) - (13) – Результирующие модели производительности чугуна и расхода кокса.

Линейная модель производительности чугуна:

$$ПЧ = \sum_{i=1}^n K_i \cdot B_i + K_{n+1} \cdot B_{O_2}^2 + K_{n+2} \cdot B_{\text{Расход природного газа}}^2, \quad (12)$$

Линейная модель расхода кокса:

$$ПК = \sum_{i=1}^n K'_i \cdot B_i + K'_{n+1} \cdot B_{O_2}^2 + K'_{n+2} \cdot B_{\text{Расход природного газа}}^2, \quad (13)$$

где

$B_i =$

$$\left\{ B_{\text{Содержание } O_2 \text{ в дутье}}, B_{\text{Температура горячего дутья}}, B_{\text{Расход дутья}}, B_{\text{Доля агломерата}}, B_{\text{Содержание } CO \text{ и } CO_2}, B_{\text{Содержание руды в шихте}}, B_{\text{Уровень засыпи}}, B_{\text{Расход природного газа}} \right\}.$$

## 5 ОПТИМИЗАЦИЯ

### 5.1 Описание оптимизационной задачи

В данной работе рассмотрены две оптимизационные задачи:

- 1) максимум производительности чугуна;
- 2) минимум расхода кокса.

За целевую функцию выбираем модели, которые идентифицировали ранее (формулы (12)-(13)) . Допустимым множеством решений выбираются значения, на которых существуют статистические данные.

Оптимизационные параметры:

- 1) содержание кислорода в дутье, %;
- 2) температура горячего дутья, °С;
- 3) расход дутья, м<sup>3</sup>/ч;
- 4) доля агломерата в шихте;
- 5) содержание СО и СО<sub>2</sub>;
- 6) содержание руды в шихте;
- 7) уровень засыпи, м;
- 8) расход природного газа м<sup>3</sup>/ч.

|      |      |             |         |      |                                |      |
|------|------|-------------|---------|------|--------------------------------|------|
|      |      |             |         |      | ЮУрГУ – 150404.2019.221 ПЗ ВКР | Лист |
| Изм. | Лист | № документа | Подпись | Дата |                                | 32   |



## 5.2 Результаты оптимизации

В таблице 5 представлены значения оптимизации по критерию максимума производительности чугуна.

Таблица 5 – Результат оптимизации по критерию максимума производительности чугуна

| Параметр модели                 | Среднее значение | Значение после оптимизации |
|---------------------------------|------------------|----------------------------|
| Содержание кислорода в дутье, % | 27,5             | 26,6                       |
| Температура горячего дутья, °С  | 968              | 906,5                      |
| Расход дутья, м3/ч              | 255820           | 205062                     |
| Доля агломерата в шихте         | 0,65             | 0,6                        |
| Содержание СО и СО2             | 45,5             | 47,7                       |
| Содержание руды в шихте         | 8448             | 9150                       |
| Уровень засыпи, м               | 1,47             | 0,96                       |
| Расход природного газа м3/ч     | 23922            | 26729                      |

В таблице 6 представлены значения оптимизации по критерию минимума расхода кокса.

Таблица 6 – Результат оптимизации по критерию минимума расхода кокса

| Параметр модели                 | Среднее значение | Значение после оптимизации |
|---------------------------------|------------------|----------------------------|
| Содержание кислорода в дутье, % | 27,5             | 30,3                       |
| Температура горячего дутья, °С  | 968              | 906                        |
| Расход дутья, м3/ч              | 255820           | 199478                     |
| Доля агломерата в шихте         | 0,65             | 0,69                       |
| Содержание СО и СО2             | 45,5             | 43,6                       |
| Содержание руды в шихте         | 8448             | 9150                       |
| Уровень засыпи, м               | 1,47             | 0,96                       |
| Расход природного газа м3/ч     | 23922            | 26729                      |

Алгоритм оптимизации представлены в виде блок-схем в приложении.

## 6 ЭКОНОМИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ НА ПОЛУЧЕННЫХ ДАННЫХ

Расчет экономического эффекта проводился на основе следующих исходных данных:

Себестоимость чугуна = 16500 р/т;

Себестоимость лома = 17000 р/т;

Стоимость кокса = 8 500 р/т.

Экономический эффект при увеличении производительности достигается за счет замены дорогого лома, выплавленным чугуном. Таким образом экономический эффект составляет:

$$\begin{aligned} & (\text{Себестоимость чугуна} - \text{Себестоимость лома}) \\ & \cdot \text{Приrost производительности} = \\ & = (16500 - 17000) \cdot 412 \cdot 30 \text{ дней/мес} = -6,1 \text{ млн рублей.} \end{aligned}$$

Экономический эффект при уменьшении расхода кокса достигается за счет уменьшения покупаемого объема кокса:

$$\begin{aligned} & \text{Стоимость кокса} \cdot \text{Изменение расхода кокса} \\ & \cdot \text{Производительность чугуна} = \\ & = -8500 \cdot 0.015 \cdot 2686 = -10,3 \text{ млн рублей.} \end{aligned}$$

На рисунках 19 – 20 и в таблице 8 представлены результаты.

|      |      |             |         |      |                                |      |
|------|------|-------------|---------|------|--------------------------------|------|
|      |      |             |         |      | ЮУрГУ – 150404.2019.221 ПЗ ВКР | Лист |
| Изм. | Лист | № документа | Подпись | Дата |                                | 35   |

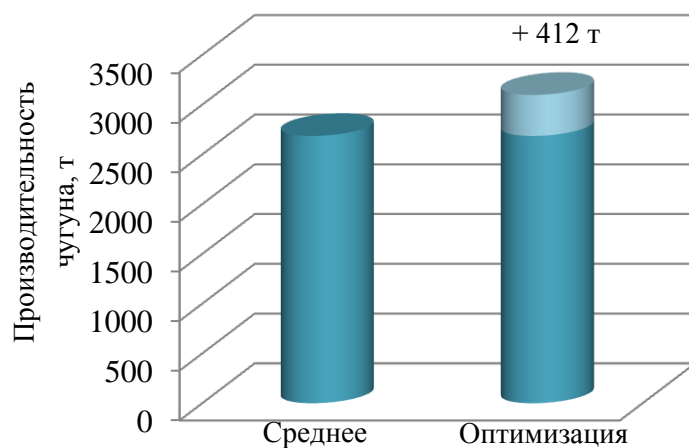


Рисунок 19 – Прирост производительности

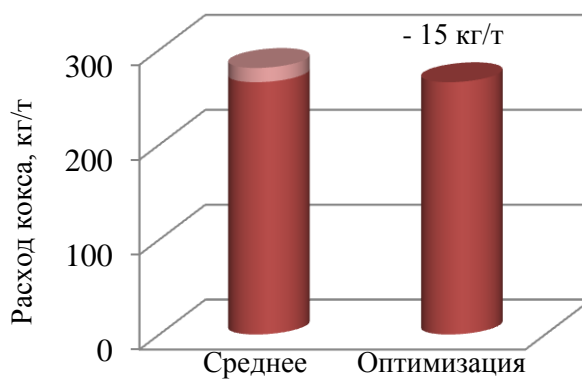


Рисунок 20 – Уменьшение расхода кокса

Таблица 8 – Результаты расчета экономического эффекта

|                      | Производительность чугуна | Расход кокса   |
|----------------------|---------------------------|----------------|
| Себестоимость        | 16 500 р/т                | 8 500 р/т      |
| Изменение            | 412 т                     | -15 кг/т       |
| Экономический эффект | 6,1 млн р/мес             | 10,3 млн р/мес |

## 7 ЭКСПЕРТНАЯ СИСТЕМА

### 7.1 Оптимизация на статистических данных за неделю

При определении оптимального значения M10 для нахождения максимального значения производительности выполняется алгоритм оптимизации. Результаты определения оптимального значения M10 приведен на рисунке 21.

| Результаты оптимизации по критерию максимума производительности (M10) |   |       |       |        |        |       |
|---|---|-------|-------|--------|--------|-------|
| Факторы   | ◆ | ДП6 ◆ | ДП9 ◆ | ДП10 ◆ | Проч ◆ | ДЦ ◆  |
| 1 Прочность на истирание (M10), %                                     |   | 8.08  | 7.79  | 8.31   | 7.85   | 7.93  |
| 2 Изменение прочности на истирание (M10), %                           |   | -0.06 | -0.06 | -0.06  |        | -0.06 |
| 3 Доля агломерата в ЖРС, %  |   | 0.67  | 0.66  | 0.65   | 0.6    | 0.62  |
| 4 Изменение доли агломерата в ЖРС, %                                  |   | 0     | 0     | 0      |        | 0     |
| 5 УРК, кг/т   |   | -0.6  | -0.5  | -0.8   | 0      | -0.7  |
| 6 Изменение производительности, т/сут                                 |   | 4.04  | 6.83  | 8.94   | 0      | 19.8  |
| 7 Изменение стоимости угольной шихты, руб/т                           |   |       |       |        |        | 21.4  |
| 8 Изменение стоимости ЖРС, руб/т                                      |   | 0     | 0     | 0      | 0      | 0     |
| 9 Изменение себестоимости чугуна, руб/т                               |   |       |       |        |        | 11.25 |
| 10 Изменение себестоимости стали, руб/т                               |   |       |       |        |        | 3.46  |

Рисунок 21 – Результаты нахождения оптимального значения M10 по максимуму производительности

Снижение M10 на 0,06% приведет к:

- снижению удельного расхода кокса на 0,7 кг/т,
- увеличению производительности на 19,8 т/сут,
- увеличению стоимости угольной шихты на 21,4 руб/т,
- увеличению себестоимости стали на 3,46 руб/т,
- увеличению себестоимости чугуна на 11,25 руб/т.

При определении оптимального значения M10 для нахождения минимального значения себестоимости чугуна запускается модуль оптимизации. Результаты определения оптимального значения M10 приведен на рисунке 22.

| Результаты оптимизации по критерию минимума себестоимости чугуна (M10) |   |       |       |        |        |       |
|--|---|-------|-------|--------|--------|-------|
| Факторы  | ◆ | ДП6 ◆ | ДП9 ◆ | ДП10 ◆ | Проч ◆ | ДЦ ◆  |
| 1 Прочность на истирание (M10), %                                      |   | 8.22  | 7.93  | 8.45   | 7.99   | 8.07  |
| 2 Изменение прочности на истирание (M10), %                            |   | 0.08  | 0.08  | 0.08   |        | 0.08  |
| 3 Доля агломерата в ЖРС, %   |   | 0.67  | 0.66  | 0.65   | 0.6    | 0.62  |
| 4 Изменение доли агломерата в ЖРС, %                                   |   | 0     | 0     | 0      |        | 0     |
| 5 УРК, кг/т  |   | 0.85  | 0.71  | 1.08   | 0      | 0.88  |
| 6 Изменение производительности, т/сут                                  |   | -5.4  | -9.1  | -12    | 0      | -26   |
| 7 Изменение стоимости угольной шихты, руб/т                            |   |       |       |        |        | -24   |
| 8 Изменение стоимости ЖРС, руб/т                                       |   | 0     | 0     | 0      | 0      | 0     |
| 9 Изменение себестоимости чугуна, руб/т                                |   |       |       |        |        | -11.4 |
| 10 Изменение себестоимости стали, руб/т                                |   |       |       |        |        | -2.99 |

Рисунок 22 – Результаты нахождения оптимального значения M10 по минимуму себестоимости чугуна

Увеличение M10 на 0,08% по ДЦ приведет к:

- увеличению удельного расхода кокса на 0,88 кг/т,
- уменьшению производительности на 26 т/сут,
- уменьшению стоимости угольной шихты на 24 руб/т,
- уменьшению себестоимости стали на 2,99 руб/т,
- уменьшению себестоимости чугуна на 11,4 руб/т.

При определении оптимального значения M10 для нахождения минимального значения себестоимости стали запускается модуль оптимизации. Результаты определения оптимального значения M10 приведен на рис. 23.

| Результаты оптимизации по критерию минимума себестоимости стали (M10) |      |      |      |      |      |       |
|---|------|------|------|------|------|-------|
| Факторы   | ДП6  | ДП9  | ДП10 | Проч | ДЦ   |       |
| 1 Прочность на истирание (M10), %                                     | 8.22 | 7.93 | 8.45 | 7.99 | 8.07 |       |
| 2 Изменение прочности на истирание (M10), %                           | 0.08 | 0.08 | 0.08 |      | 0.08 |       |
| 3 Доля агломерата в ЖРС, %  | 0.67 | 0.66 | 0.65 | 0.6  | 0.62 |       |
| 4 Изменение доли агломерата в ЖРС, %                                  | 0    | 0    | 0    |      | 0    |       |
| 5 УРК, кг/т   | 0.85 | 0.71 | 1.08 | 0    | 0.88 |       |
| 6 Изменение производительности, т/сут                                 | -5.4 | -9.1 | -12  | 0    | -26  |       |
| 7 Изменение стоимости угольной шихты, руб/т                           |      |      |      |      |      | -24   |
| 8 Изменение стоимости ЖРС, руб/т                                      | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |       |
| 9 Изменение себестоимости чугуна, руб/т                               |      |      |      |      |      | -11.4 |
| 10 Изменение себестоимости стали, руб/т                               |      |      |      |      |      | -2.99 |

Рисунок 23– Результаты нахождения оптимального значения M10 по минимуму себестоимости стали

Увеличение M10 на 0,08% по ДЦ приведет к:

- увеличению удельного расхода кокса на 0,88 кг/т,
- уменьшению производительности на 26 т/сут,
- уменьшению стоимости угольной шихты на 24 руб/т,
- уменьшению себестоимости стали на 2,99 руб/т,
- уменьшению себестоимости чугуна на 11,4 руб/т.

При определении оптимального значения доли агломерата для нахождения максимального значения производительности запускается модуль оптимизации. Результаты определения оптимального значения доли агломерата приведен на рис. 24.

| Результаты оптимизации по критерию максимума<br>производительности (Д.Агл.) |   |       |       |        |        |       |
|---|---|-------|-------|--------|--------|-------|
| Факторы   | ◆ | ДП6 ◆ | ДП9 ◆ | ДП10 ◆ | Проч ◆ | ДЦ ◆  |
| 1 Прочность на истирание (M10), %   |   | 8.14  | 7.85  | 8.37   | 7.91   | 7.99  |
| 2 Изменение прочности на истирание (M10), %                                 |   | 0     | 0     | 0      |        | 0     |
| 3 Доля агломерата в ЖРС, %  |   | 0.63  | 0.61  | 0.55   | 0.6    | 0.6   |
| 4 Изменение доли агломерата в ЖРС, %  |   | -0.04 | -0.05 | -0.1   |        | -0.02 |
| 5 УРК, кг/т   |   | -1.7  | -2.7  | -3.9   | 0      | -2.8  |
| 6 Изменение производительности, т/сут                                       |   | 31.8  | 41    | 89.7   | 0      | 162   |
| 7 Изменение стоимости угольной шихты, руб/т                                 |   |       |       |        |        | 0     |
| 8 Изменение стоимости ЖРС, руб/т  |   | 6.7   | 53.4  | 317    | 0      | 377   |
| 9 Изменение себестоимости чугуна, руб/т                                     |   |       |       |        |        | 83.6  |
| 10 Изменение себестоимости стали, руб/т                                     |   |       |       |        |        | 34.31 |

Рисунок 24 – Результаты нахождения оптимального значения доли агломерата по максимуму производительности



Уменьшение доли агломерата в ЖРС на 0,02% по ДЦ приведет к:

- уменьшению удельного расхода кокса на 2,8 кг/т,
- увеличению производительности на 162 т/сут,
- увеличению себестоимости стали на 34,31 руб/т,
- увеличению себестоимости чугуна на 83,6 руб/т.

При определении оптимального значения доли агломерата для нахождения минимального значения себестоимости чугуна модуль оптимизации. Результаты определения оптимального значения доли агломерата приведен на рис. 25.

| Результаты оптимизации по критерию минимума себестоимости чугуна (Д.Агл.) |   |       |       |        |        |       |
|---|---|-------|-------|--------|--------|-------|
| Факторы   | ◆ | ДП6 ◆ | ДП9 ◆ | ДП10 ◆ | Проч ◆ | ДЦ ◆  |
| 1 Прочность на истирание (M10), %   |   | 8.14  | 7.85  | 8.37   | 7.91   | 7.99  |
| 2 Изменение прочности на истирание (M10), %                               |   | 0     | 0     | 0      |        | 0     |
| 3 Доля агломерата в ЖРС, %  |   | 0.64  | 0.64  | 0.64   | 0.6    | 0.62  |
| 4 Изменение доли агломерата в ЖРС, %                                      |   | -0.03 | -0.02 | -0.01  |        | 0     |
| 5 УРК, кг/т   |   | -1.3  | -1.1  | -0.39  | 0      | -0.9  |
| 6 Изменение производительности, т/сут                                     |   | 23.9  | 16.4  | 8.97   | 0      | 49.2  |
| 7 Изменение стоимости угольной шихты, руб/т                               |   |       |       |        |        | 0     |
| 8 Изменение стоимости ЖРС, руб/т  |   | -4    | 3.3   | 4.7    | 0      | 4     |
| 9 Изменение себестоимости чугуна, руб/т                                   |   |       |       |        |        | -12   |
| 10 Изменение себестоимости стали, руб/т                                   |   |       |       |        |        | -8.68 |

Рисунок 25 – Результаты нахождения оптимального значения доли агломерата по минимуму себестоимости чугуна

Перераспределение доли агломерата в ЖРС по печам приведет к:

- уменьшению удельного расхода кокса на 0,9 кг/т,
- увеличению производительности на 49,2 т/сут,
- уменьшению себестоимости стали на 8,68 руб/т,
- уменьшению себестоимости чугуна на 12 руб/т.

При определении оптимального значения доли агломерата для нахождения минимального значения себестоимости стали модуль оптимизации. Результаты определения оптимального значения доли агломерата приведен на рис. 26.

| Результаты оптимизации по критерию минимума себестоимости стали (Д.Агл.) |   |       |       |        |        |       |
|--|---|-------|-------|--------|--------|-------|
| Факторы  | ◆ | ДП6 ◆ | ДП9 ◆ | ДП10 ◆ | Проч ◆ | ДЦ ◆  |
| 1 Прочность на истирание (M10), %  |   | 8.14  | 7.85  | 8.37   | 7.91   | 7.99  |
| 2 Изменение прочности на истирание (M10), %                              |   | 0     | 0     | 0      |        | 0     |
| 3 Доля агломерата в ЖРС, %   |   | 0.63  | 0.63  | 0.64   | 0.6    | 0.61  |
| 4 Изменение доли агломерата в ЖРС, %                                     |   | -0.04 | -0.03 | -0.01  |        | -0.01 |
| 5 УРК, кг/т  |   | -1.7  | -1.6  | -0.39  | 0      | -1.2  |
| 6 Изменение производительности, т/сут                                    |   | 31.8  | 24.6  | 8.97   | 0      | 65.4  |
| 7 Изменение стоимости угольной шихты, руб/т                              |   |       |       |        |        | 0     |
| 8 Изменение стоимости ЖРС, руб/т   |   | 6.7   | 14    | 4.7    | 0      | 25.4  |
| 9 Изменение себестоимости чугуна, руб/т                                  |   |       |       |        |        | -10   |
| 10 Изменение себестоимости стали, руб/т                                  |   |       |       |        |        | -8.99 |

Рисунок 26 – Результаты нахождения оптимального значения доли агломерата по минимуму себестоимости стали

Увеличение доли агломерата в ЖРС по печам на 0,61 приведет к:

- уменьшению удельного расхода кокса на 1,2 кг/т,
- увеличению производительности на 65,4 т/сут,
- уменьшению себестоимости стали на 8,99 руб/т,
- уменьшению себестоимости чугуна на 10 руб/т.

|             |             |                    |                |             |                                       |             |
|-------------|-------------|--------------------|----------------|-------------|---------------------------------------|-------------|
|             |             |                    |                |             | <i>ЮУрГУ – 150404.2019.221 ПЗ ВКР</i> | <i>Лист</i> |
|             |             |                    |                |             |                                       | 43          |
| <i>Изм.</i> | <i>Лист</i> | <i>№ документа</i> | <i>Подпись</i> | <i>Дата</i> |                                       |             |

## 7.2 Оптимизация на статистических данных за месяц

При определении оптимального значения M10 для нахождения максимального значения производительности запускается модуль оптимизации. Результаты определения оптимального значения M10 приведен на рис. 27.

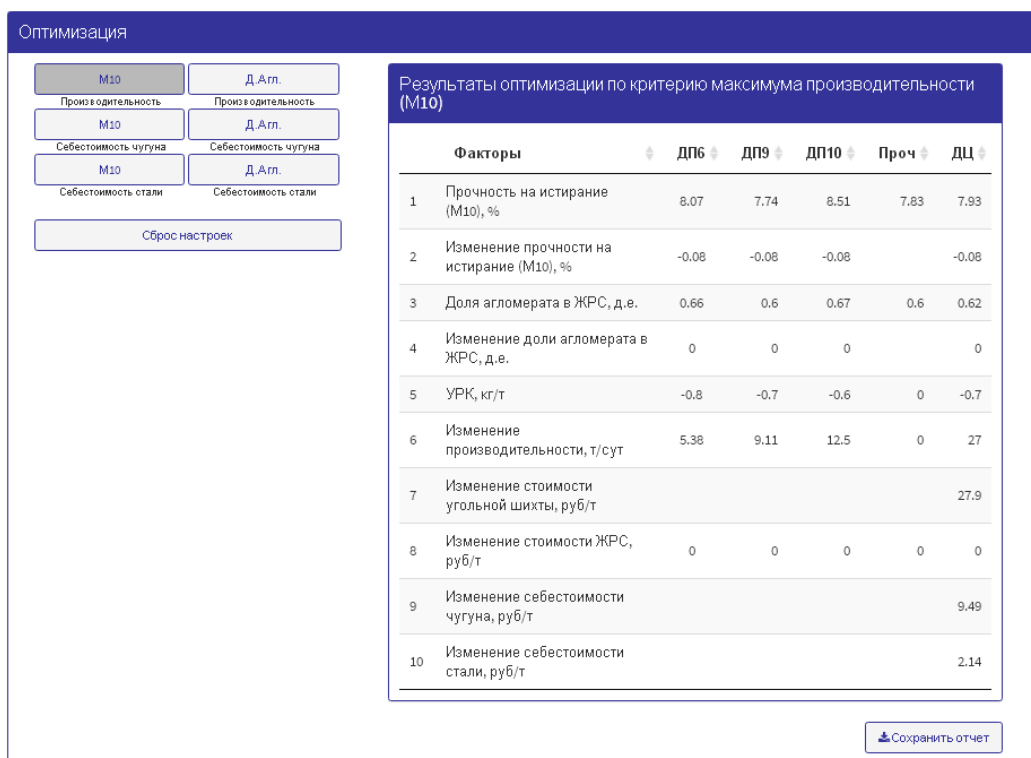


Рисунок 27 – Результаты нахождения оптимального значения M10 по максимуму производительности

Снижение M10 на 0,08%:

- приведет к снижению удельного расхода кокса на 0,7 кг/т,
- увеличению производительности на 27 т/сут,
- увеличению стоимости угольной шихты на 27,9 руб/т,
- увеличению себестоимости стали на 2,14 руб/т,
- увеличению себестоимости чугуна на 9,49 руб/т.

При определении оптимального значения M10 для нахождения минимального значения себестоимости чугуна запускается модуль оптимизации. Результаты определения оптимального значения M10 приведен на рис. 28.

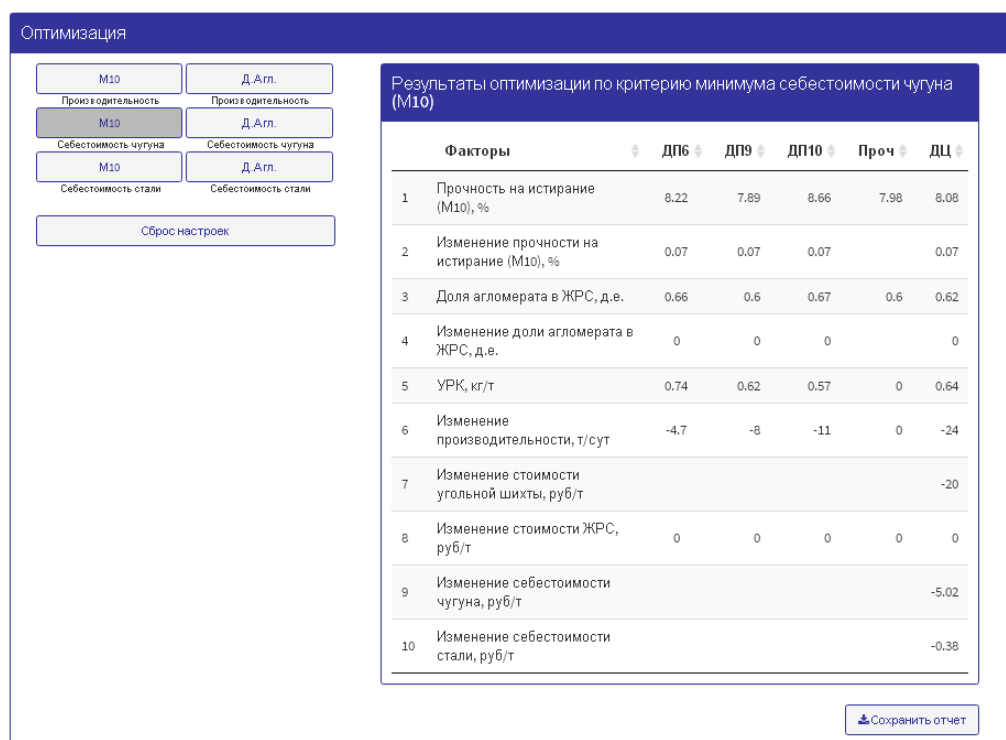


Рисунок 28 – Результаты нахождения оптимального значения M10 по минимуму себестоимости чугуна

Увеличение M10 на 0,07% по ДЦ:

- приведет к увеличению удельного расхода кокса на 0,64 кг/т,
- уменьшению производительности на 24 т/сут,
- уменьшению стоимости угольной шихты на 20 руб/т,
- уменьшению себестоимости стали на 5,02 руб/т,
- уменьшению себестоимости чугуна на 0,38 руб/т.

При определении оптимального значения доли агломерата для нахождения максимального значения производительности запускается модуль оптимизации. Результаты определения оптимального значения доли агломерата приведен на рис. 29.

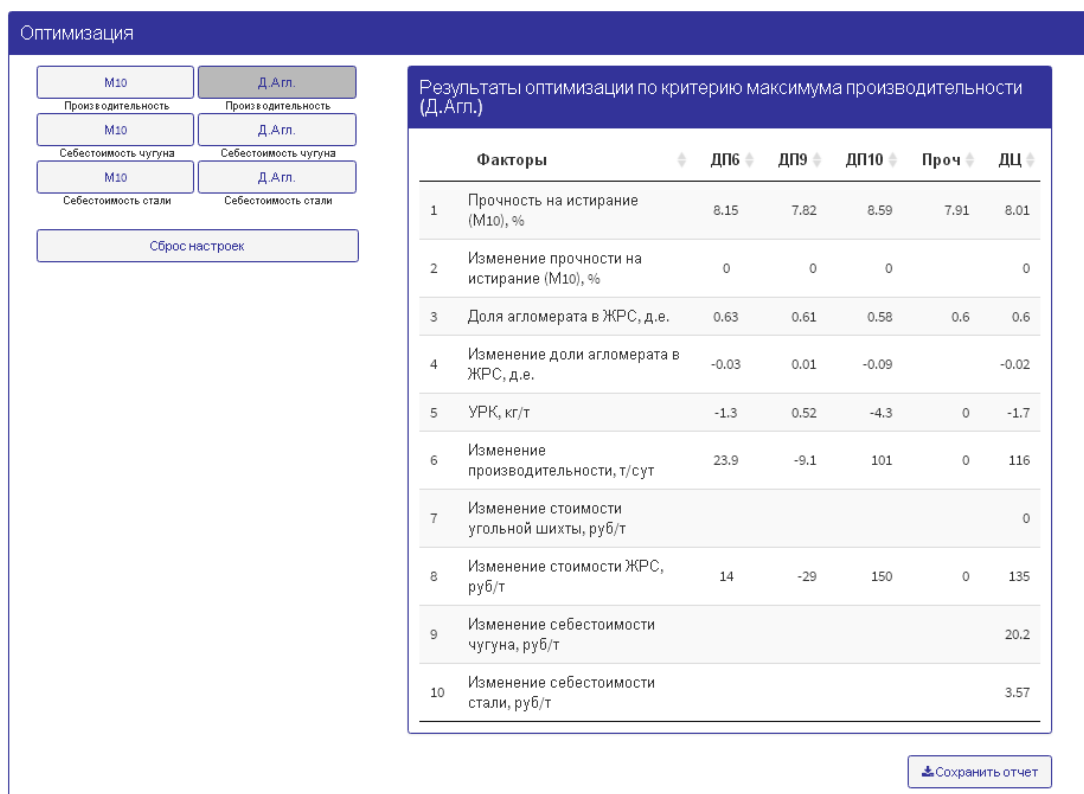


Рисунок 29 – Результаты нахождения оптимального значения доли агломерата по максимуму производительности

Уменьшение доли агломерата в ЖРС на 0,02% по ДЦ:

- приведет к уменьшению удельного расхода кокса на 1,7 кг/т,
- увеличению производительности на 116 т/сут,
- увеличению себестоимости стали на 3,57 руб/т,
- увеличению себестоимости чугуна на 20,2 руб/т.

При определении оптимального значения доли агломерата для нахождения минимального значения себестоимости чугуна модуль

оптимизации. Результаты определения оптимального значения доли агломерата приведен на рис. 30.

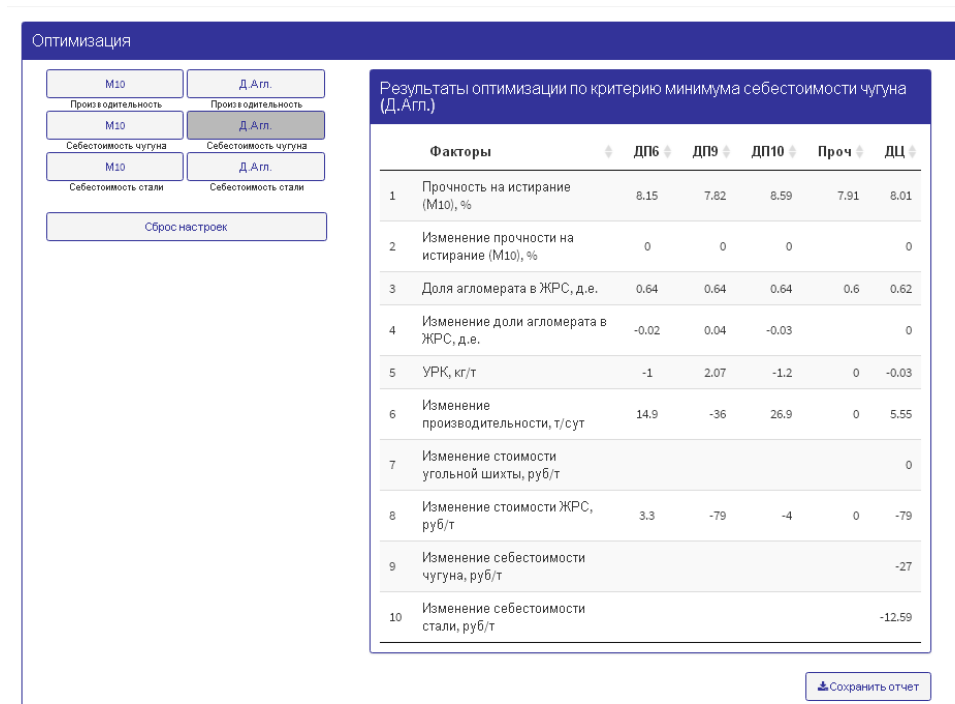


Рисунок 30 – Результаты нахождения оптимального значения доли агломерата по минимуму себестоимости чугуна

Перераспределение доли агломерата в ЖРС по печам:

- приведет к уменьшению удельного расхода кокса на 0,03 кг/т,
- увеличению производительности на 5,55 т/сут,
- уменьшению себестоимости стали на 12,59 руб/т,
- уменьшению себестоимости чугуна на 27 руб/т.

При определении оптимального значения доли агломерата для нахождения минимального значения себестоимости стали модуль оптимизации. Результаты определения оптимального значения доли агломерата приведен на рис. 31.

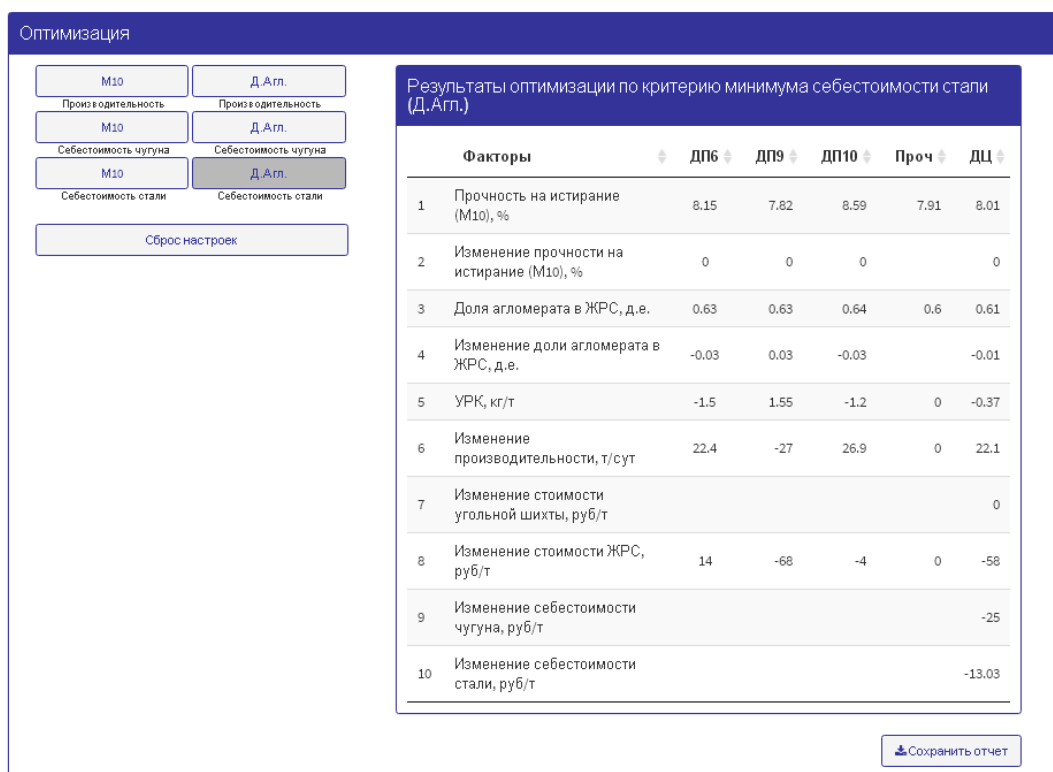


Рисунок 31 – Результаты нахождения оптимального значения доли агломерата по минимуму себестоимости стали

Уменьшение доли агломерата в ЖРС по цеху на 0,01:

- приведет к уменьшению удельного расхода кокса на 0,37 кг/т,
- увеличению производительности на 22,1 т/сут,
- уменьшению себестоимости стали на 13,03 руб/т,
- уменьшению себестоимости чугуна на 25 руб/т.



## 8 ОПИСАНИЕ СОЗДАНИЯ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

Программное обеспечение экспертной системы представляет собой web-приложение написанное полностью на языке программирования R. Интерфейс был создан при помощи пакета Shiny. Shiny - это пакет R, который позволяет легко создавать интерактивные веб-приложения (приложения) прямо из R. На рисунке 32 представлена команда для установки данного пакета.

```
install.packages("shiny")
```

Рисунок 32 – Установка пакета Shiny

Shiny приложение состоит из двух основных блоков: пользовательского интерфейса (ui) и серверной части (server). Запуск приложения выполняется по команде shinyApp(). Структура пользовательского приложения представлена на рисунке 33.

```
library(shiny)

# See above for the definitions of ui and server
ui <- ...

server <- ...

shinyApp(ui = ui, server = server)
```

Рисунок 33 – Структура приложения

Сессия R будет занята, пока приложение активно, поэтому R команды выполняться не будут. R контролирует приложение и выполняет реакции

|      |      |             |         |      |                                |      |
|------|------|-------------|---------|------|--------------------------------|------|
|      |      |             |         |      | ЮУрГУ – 150404.2019.221 ПЗ ВКР | Лист |
| Изм. | Лист | № документа | Подпись | Дата |                                | 49   |

приложения. Чтобы возобновить сеанс R, необходимо нажать escape или щелкнуть значок знака остановки.

Shiny использует функцию FluidPage для создания экрана, который автоматически подстраивается под размеры окна браузера. Пользовательский интерфейс размечается под программу путем размещения элементов в функции fluidPage().

Например, приведенная ниже функция пользовательского интерфейса создает пользовательский интерфейс с панелью заголовка и макетом боковой панели, который включает панель боковой панели и основную панель.

```
ui <- fluidPage(  
  titlePanel("title panel"),  
  
  sidebarLayout(  
    sidebarPanel("sidebar panel"),  
    mainPanel("main panel")  
  )  
)
```

Рисунок 34 – Пример программы простого пользовательского интерфейса

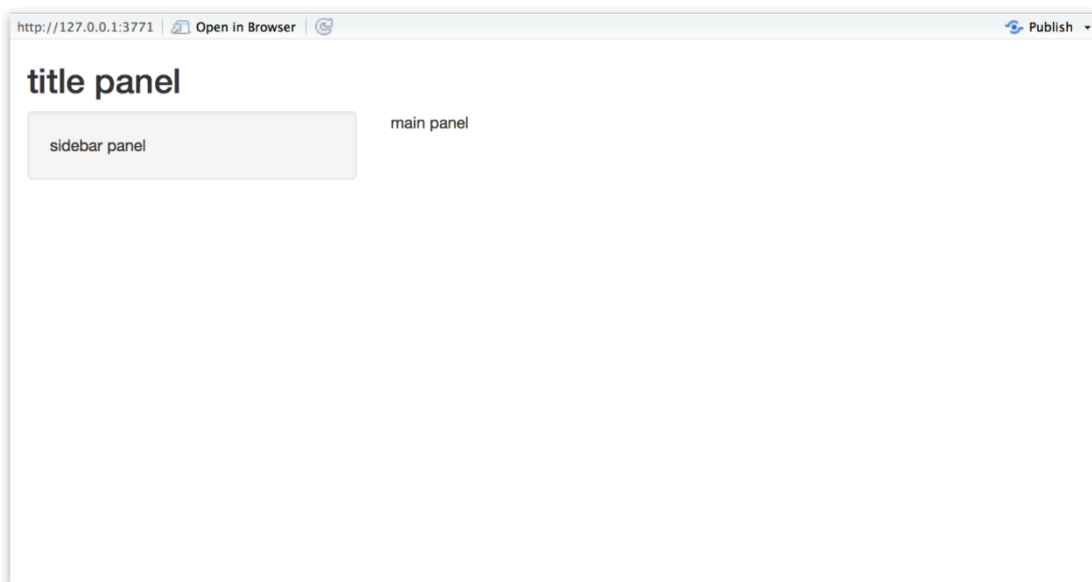


Рисунок 35 – Пример простого пользовательского интерфейса

TitlePanel и sidebarLayout - два элемента, которые были добавлены в FluidPage. Они создают приложение с боковой панелью. sidebarLayout всегда принимает два аргумента: вывод функции боковой панели, вывод функции mainPanel. Эти функции размещают контент либо на боковой панели, либо на основных панелях.

По умолчанию боковая панель появится в левой части вашего приложения. Вы можете переместить его в правую часть, задавая sidebarLayout необязательный аргумент position = "right".

TitlePanel и sidebarLayout создают базовый макет для приложения Shiny, также можно создавать более сложные макеты. NnavbarPage используется, чтобы предоставить приложению многостраничный пользовательский интерфейс, включающий панель навигации. Можно использовать liquidRow и column для построения макета из системы сетки.

```
ui <- fluidPage(  
  titlePanel("title panel"),  
  
  sidebarLayout(position = "right",  
    sidebarPanel("sidebar panel"),  
    mainPanel("main panel")  
  )  
)
```

Рисунок 36 – Код программы с sidebarLayout

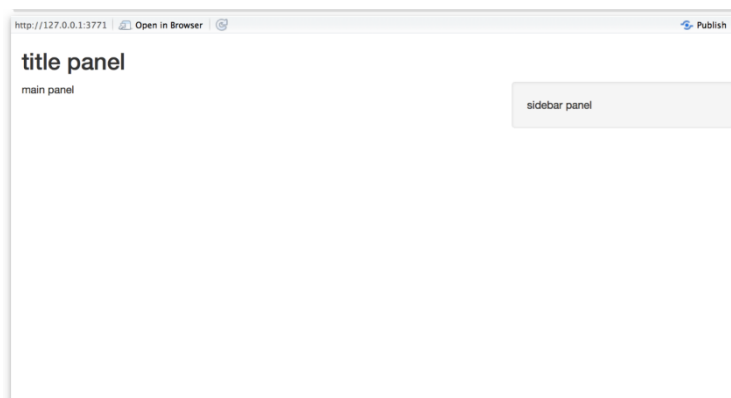


Рисунок 37 – Результат выполнения программы

Добавление виджетов. Виджеты – это элементы, которые осуществляют взаимодействие пользователя с программой. На рисунке 38 представлен набор виджетов, который доступен в shiny.

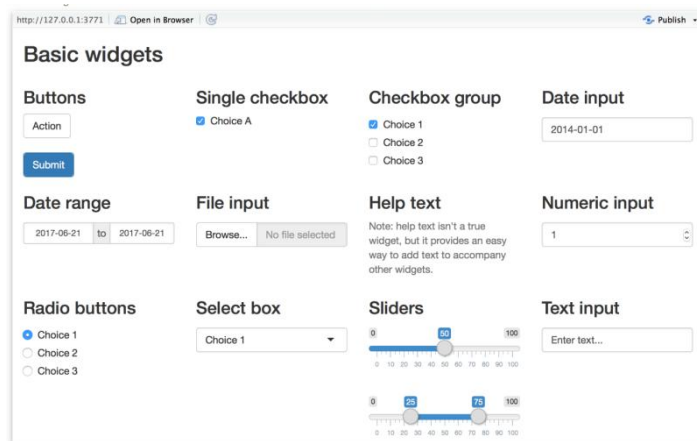


Рисунок 38 – Примеры виджетов в shiny

В таблице 9 представлен перечень стандартных виджетов.

Таблица 9 – Список стандартных виджетов

| №  | Функция            | Фиджет  |
|----|--------------------|---|
| 1  | actionButton       | Кнопка  |
| 2  | checkboxGroupInput | Группа флажков                                      |
| 3  | checkboxInput      | Один флажок   |
| 4  | dateInput          | Календарь для выбора даты                           |
| 5  | dateRangeInput     | Пара календарей для выбора диапазона дат            |
| 6  | fileInput          | Мастер управления загрузкой файлов                  |
| 7  | helpText           | Текст справки, который можно добавить в форму ввода |
| 8  | numericInput       | Поле для ввода чисел                                |
| 9  | radioButtons       | Набор радио кнопок                                  |
| 10 | selectInput        | Коробка с вариантами выбора                         |
| 11 | sliderInput        | Ползунок  |
| 12 | submitButton       | Кнопка отправки                                     |
| 13 | textInput          | Поле для ввода текста                               |

На рисунке 39 представлено web-приложение вместе с кодом программы.

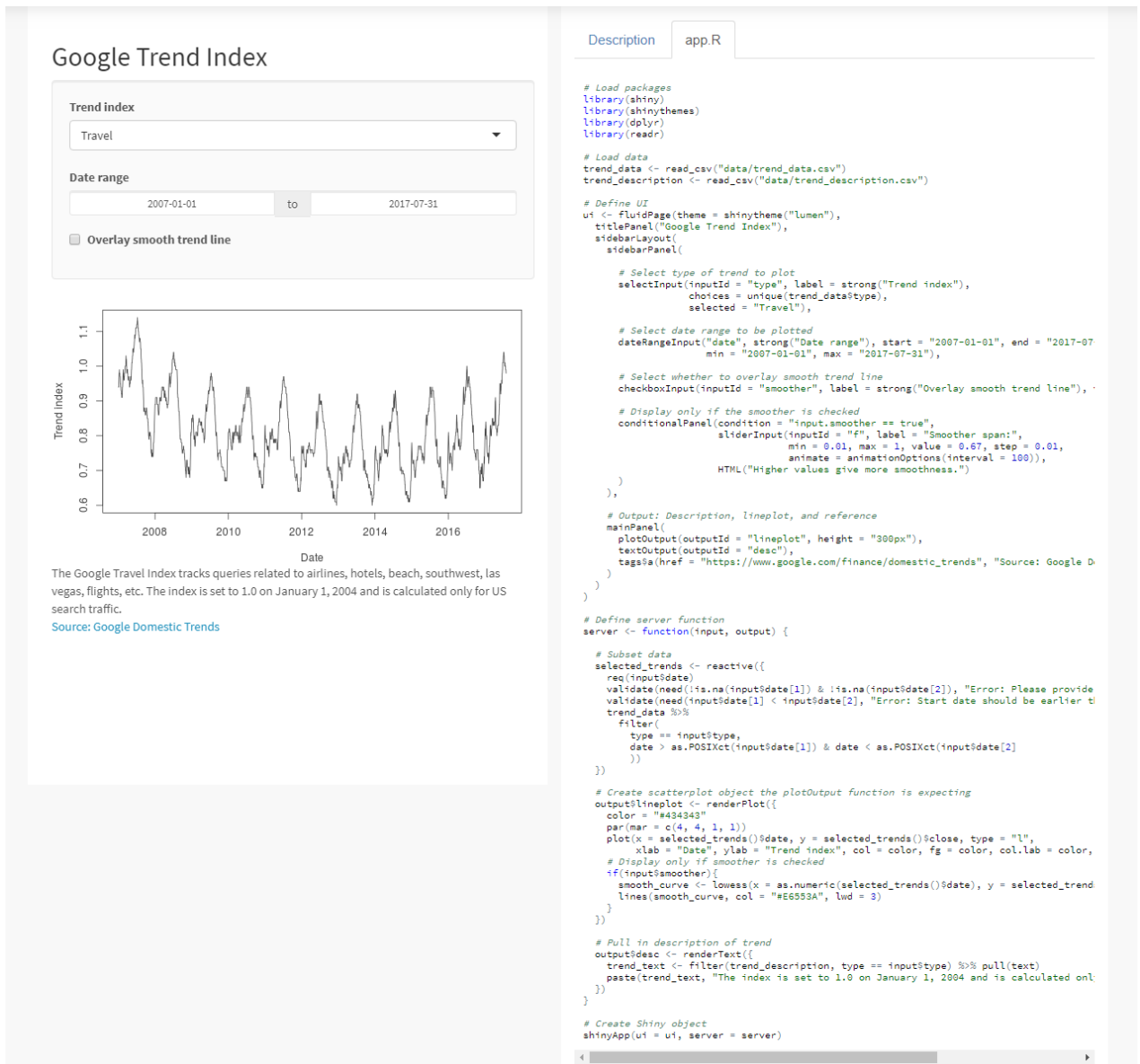


Рисунок 39 – Пример web-приложения

Кроме того при создании данного приложения использовалась надстройка над Рассматриваемой библиотекой, shinydashboard. На рисунке 40 представлена команда установки данной надстройки.

```
install.packages("shinydashboard")
```

Рисунок 40 – Установка shinydashboard

|      |      |             |         |      |                               |  |  |  |      |
|------|------|-------------|---------|------|-------------------------------|--|--|--|------|
|      |      |             |         |      |                               |  |  |  | Лист |
|      |      |             |         |      |                               |  |  |  | 53   |
| Изм. | Лист | № документа | Подпись | Дата | ЮрГУ – 150404.2019.221 ПЗ ВКР |  |  |  |      |

Панель инструментов состоит из трех частей: заголовка, боковой панели и тела. На рисунках 41-42 представлен минимально возможный интерфейс.

```
## app.R ##  
library(shiny)  
library(shinydashboard)  
  
ui <- dashboardPage(  
  dashboardHeader(),  
  dashboardSidebar(),  
  dashboardBody()  
)  
  
server <- function(input, output) { }  
  
shinyApp(ui, server)
```

Рисунок 41 – Основа интерфейса shinydashboard (код программы)

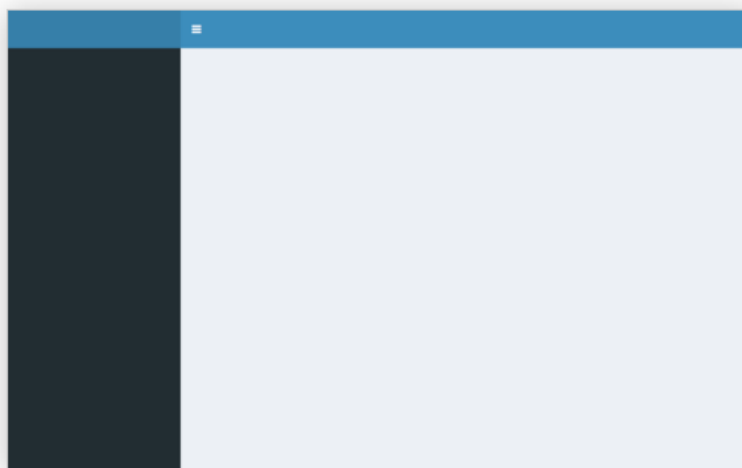


Рисунок 42 – Основа интерфейса shinydashboard

В данное поле удобно размещать поля с контентом.

```

## app.R ##
library(shinydashboard)

ui <- dashboardPage(
  dashboardHeader(title = "Basic dashboard"),
  dashboardSidebar(),
  dashboardBody(
    # Boxes need to be put in a row (or column)
    fluidRow(
      box(plotOutput("plot1", height = 250)),

      box(
        title = "Controls",
        sliderInput("slider", "Number of observations:", 1, 100, 50)
      )
    )
  )
)

server <- function(input, output) {
  set.seed(122)
  histdata <- rnorm(500)

  output$plot1 <- renderPlot({
    data <- histdata[seq_len(input$slider)]
    hist(data)
  })
}

shinyApp(ui, server)

```

Рисунок 43 – Пример приложения shinydashboard (код программы)

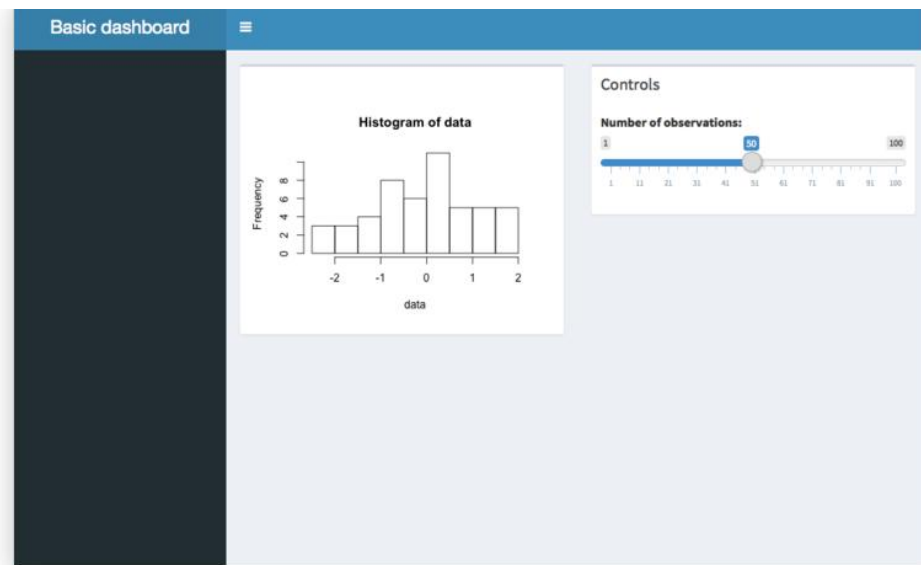


Рисунок 44 – Пример приложения shinydashboard

На основе данного подхода к созданию пользовательского интерфейса была создана экспертная система. На рисунке 45 представлена система в работе с комментариями.

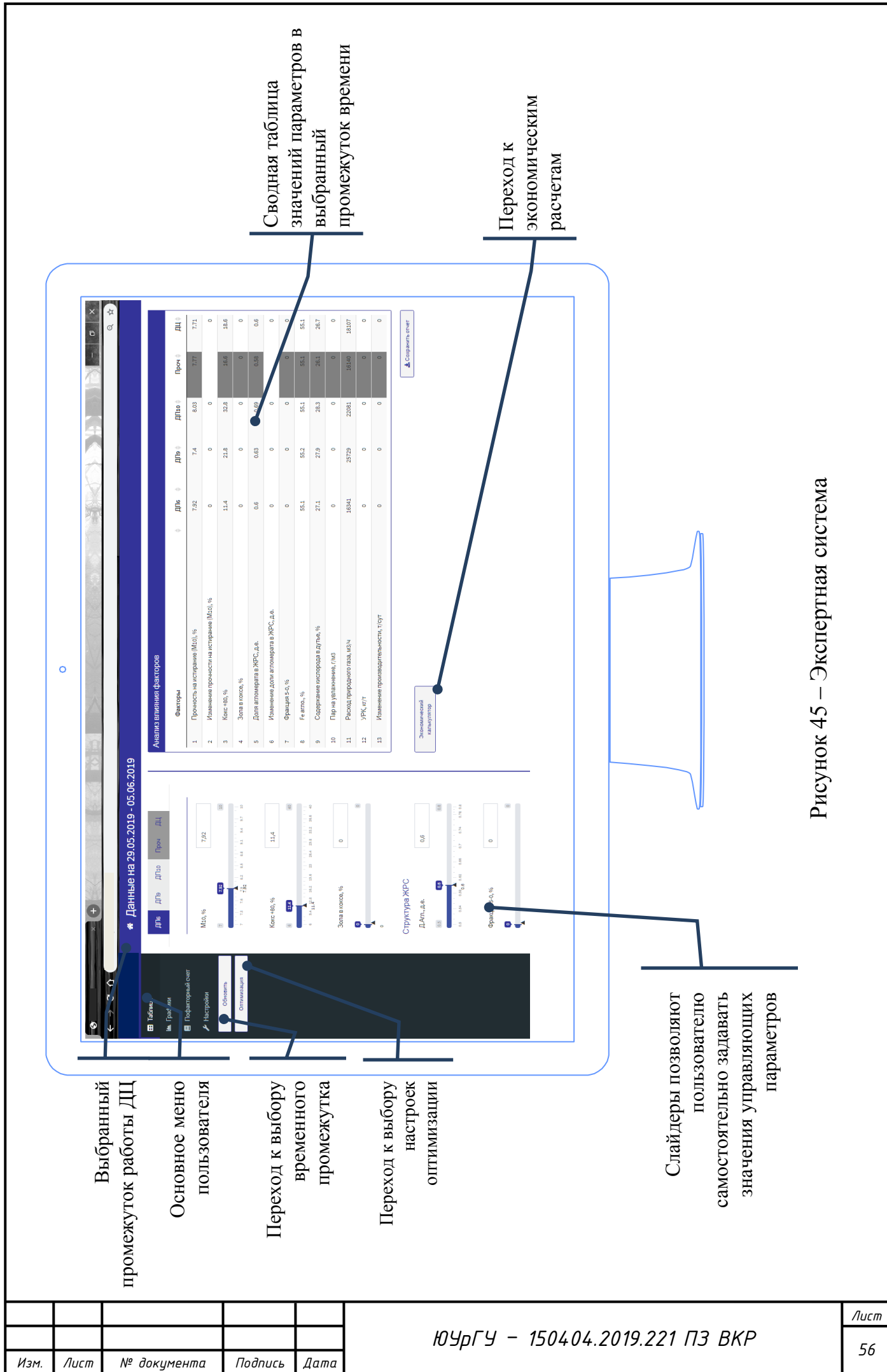


Рисунок 45 – Экспертная система

|      |      |             |         |      |
|------|------|-------------|---------|------|
| Изм. | Лист | № документа | Подпись | Дата |
|      |      |             |         |      |



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для повышения эффективности доменного процесса предложен подход управления при помощи экспертной системы, основанный на моделировании работы доменной печи и оперативной стабилизации параметров на основе полученных математических моделей.

В работе перелagается использовать линейную регрессию для идентификации модели влияния управляемых параметров (содержание кислорода в дутье, температура горячего дутья, расход дутья, доля агломерата в шихте, содержание CO и CO<sub>2</sub>, содержание руды в шихте, уровень засыпи, расход природного газа) на производительность и расход кокса. Полученные модели были использованы в оптимизации в качестве целевых функций. Оптимизационная задача была поделена на две составляющие: оптимизация по критерию максимума производительности чугуна и минимума расхода кокса. На основе результатов полученных при решении оптимизационной задачи был проведен расчет экономического эффекта. Данный расчет показал, что экономия наблюдается, при том значительная. Это говорит о полезности данного алгоритма на производстве. Для того чтобы мастер самостоятельно мог выполнять необходимые расчеты, в данной работе так же была предложена концепция экспертной системы, которая была протестирована на примерах месячных и недельных данных.

Такая система является полезным инструментом для операторов доменной печи. Данная система позволяет мастеру моделировать поведение печи и основываясь на результаты прогноза и собственный опыт мастер может принимать верное решение по отношению управляющих воздействий.

|      |      |             |         |      |                                |      |
|------|------|-------------|---------|------|--------------------------------|------|
|      |      |             |         |      | ЮУрГУ – 150404.2019.221 ПЗ ВКР | Лист |
| Изм. | Лист | № документа | Подпись | Дата |                                | 57   |

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1 Товаровский, И.Г. Доменная плавка Монография. 2-е издание. / И.Г. Товаровский. – Днепропетровск: Пороги, 2009. – 768 с.
- 2 Чернов, Д.К. О прямом получении литого железа и стали в доменной печи / Д.К. Чернов // Сб. трудов. – М.-Л.: ГосНТИ по черной и цветной металлургии. – 1950. – С. 307-327.
- 3 Доменное производство. Справочник. Т.1. / Под редакцией И.П. Бардина. – М.: Металлургиздат. – 1963. – 648 с.
- 4 David, S.F. Artificial Neural Network Model for Predict of Silicon Content in Hot Metal Blast Furnace/ S.F. David, F.F. David, M.L.P. Machado // Materials Science Forum. – 2016. – V. 869, P. 572-577.
- 5 Angela, X.G. A Neural Network Approach to the Modeling of Blast Furnace: Bachelor of Science in Computer Science and Engineering and Master of Engineering in Electrical Engineering and Computer Science /X.G. Angela. – Massachusetts Institute of Technology. – 1999. – 69 p.
- 6 Kumar, D. Optimization of blast furnace parameters using artificial neural network: Master of technology in metallurgical and materials engineering / D. Kumar. – 2015. 36 p.
- 7 Tunçkaya, Y. Comparative performance evaluation of blast furnace flame temperature prediction using artificial intelligence and statistical methods / Y. Tunokaya, E. Koklúkaya // Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences, – 2016. – V. 24, – P. 1163 – 1175.
- 8 Павлов, М.А. Металлургия чугуна. Часть первая / М.А. Павлов. – М.: Государственное научно-техническое издательство литературы по черной и цветной металлургии, 1955. – 212 с.
- 9 Дюк, В.А. Применение технологий интеллектуального анализа данных в естественнонаучных, технических и гуманитарных областях / В.А. Дюк, А.В. Флегонтов, И.К. Фомина //Известия российского государственного педагогического университета им. А.И. Герцена.– Издательство: Российский

|      |      |             |         |      |                                |      |
|------|------|-------------|---------|------|--------------------------------|------|
|      |      |             |         |      | ЮУрГУ - 150404.2019.221 ПЗ ВКР | Лист |
| Изм. | Лист | № документа | Подпись | Дата |                                | 58   |

государственный педагогический университет им. А.И. Герцена (Санкт-Петербург). – 2011. – № 138. – С. 77-84.

10 Aleksander, I. An Introduction to Neural Computing / I. Aleksander, N. Morton // London, Chapman&Hall. – 1990. – 250 p.

11 McCulloch, W.S. A logical calculus of ideas imminent in nervous activity / W.S. McCulloch, W. Pitts // Bulletin Mathematical Biophysics. – 1943. – V. 5, – P.115-133.

12 Rosenblatt, F. The perceptron: A probabilistic model for information storage and organization in the brain / F. Rosenblatt // Psychological Review. – 1958. – V. 65, – P.386-407.

13 Вороновский, Г.К. Генетические алгоритмы, искусственные нейронные сети и проблемы виртуальной реальности. / Г.К. Вороновский, К.В. Махотило, С.Н. Петрашев, С.А. Сергеев // Харьков: Основа. – 1997. – 112 с.

14 Хайкин, С. Нейронные сети: полный курс / С. Хайкин. – 2-е издание. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2006. – 1104 с.

15 Воронов, И.В. Обзор типов искусственных нейронных сетей и методов их обучения / И.В. Воронов, Е.А. Политов, В.М. Ефременко // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2007. – №3. – С. 38-42.

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

17 Кохонен, Т. Самоорганизующиеся карты / Т. Кохонен: пер. 3-го англ. изд. – 2-е изд. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2014. – 655 с.

18 Рамм, А.Н. Современный доменный процесс.– М.: Металлургия, 1980.– 304 с.

|      |      |             |         |      |                                |      |
|------|------|-------------|---------|------|--------------------------------|------|
|      |      |             |         |      | ЮУрГУ – 150404.2019.221 ПЗ ВКР | Лист |
| Изм. | Лист | № документа | Подпись | Дата |                                | 59   |

19 Журавлев, Г.В. Влияние качества кокса при выплавке чугуна / Г.В. Журавлев, Н.Н. Попов, П.О. Коростик // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 1980. – № 4. – С. 28–29.

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

21 Логинов, В.И. Повышение эффективности использования кокса в народном хозяйстве. / В.И. Логинов, И.М. Глущенко, Е.И. Бехтер. – М.: *Металлургия*, 1986. – 160 с.

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

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

24 Прокофьев, И.А. Работа доменной печи с использованием освобожденного от мелочи высокоосновного агломерата / И.А. Прокофьев, И.Г. Товаровский, В.И. Бондаренко и др. // *Сталь*. – 1979. – № 5. – С. 332-333.

25 Журавлев, Г.В. Влияние качества кокса при выплавке чугуна / Г.В. Журавлев, Н.Н. Попов, П.О. Коростик // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 1980. – № 4. – С. 28–29.

26 Старшинов, Б.Н. Влияние технологических параметров на показатели доменной плавки / Б.Н. Старшинов, Н.Т. Романенко, А.В. Гаврашенко и др. // *Сталь*. – 1968. – №8. – С. 677-679.

27 Некрасов, З.И. Опытная плавка в доменной печи объемом 2000 м<sup>3</sup> при обогащении дутья кислородом до 30 % / З.И. Некрасов, П.Г. Нетребко, Ф.Н. Москалина и др. // *Сталь*. – 1971. – № 10. – С. 887-894.

|             |             |                    |                |             |                                       |             |
|-------------|-------------|--------------------|----------------|-------------|---------------------------------------|-------------|
|             |             |                    |                |             | <i>ЮУрГУ - 150404.2019.221 ПЗ ВКР</i> | <i>Лист</i> |
| <i>Изм.</i> | <i>Лист</i> | <i>№ документа</i> | <i>Подпись</i> | <i>Дата</i> |                                       | 60          |

28 Некрасов, З.И. Доменная плавка на комбинированном дутье, содержащем 30–32 % кислорода / З.И. Некрасов, М.Т. Бузоверя, Ф.Н. Москалина, В.А. Шатлов // Сталь. – 1978. – № 4. – С. 306-310.

29 Некрасов, З.И. Опытные плавки в доменной печи объемом 2000 м<sup>3</sup> на дутье с концентрацией кислорода до 35% / З.И. Некрасов, С.В. Колпаков, А.Ф. Андреев и др. // Сталь. – 1973. – № 2. – С. 97-104.

30 Некрасов, З.И. Первый опыт работы доменной печи объемом 2000 м<sup>3</sup> НЛМЗ с обогащением дутья кислородом до 40% / З.И. Некрасов, Н.С. Антипов, Н.М. Можаренко и др. // Сталь. – 1981. – № 7. – С. 7-9.

31 Русаков, П.Г. Некоторые вопросы применения кислорода в доменной плавке / П.Г. Русаков, А.Б. Шур // Сталь. – 1968. – № 8. – С. 679-683.

32 Бялый, Л.А. Работа доменной печи Череповецкого завода на комбинированном дутье высоких параметров / Л.А. Бялый, Б.Л. Жураковский, А.Г. Михалевич и др. // Сталь. – 1978. – № 9. – С. 782-787.

33 Бялый, Л.А. Работа доменной печи с низкой степенью компенсации кислорода природным газом / Л.А. Бялый, В.А. Улахович, Б.Л. Жураковский и др. // Сталь. – 1981. – № 11. – С. 31-35.

34 Каган, И.С. Применение корреляционного метода для выявления эффективности повышенного давления газа на колошнике доменной печи / И.С. Каган, Л.А. Сабин-Гуз // *Металлургия и коксохимия (межвузовский сборник)*. – Киев: Техніка. – 1966. – № 1. – С. 115-120.

35 Гудфеллоу, Я. Глубокое обучение / Я. Гудфеллоу, И. Бенджио, А. Курвиль // пер. с англ. А.А. Слинкина. – М: ДМК Пресс, 2017. – 652 с.

36 Мюллер, А. Введение в машинное обучение с помощью Python. Руководство для специалистов по работе с данными / А. Мюллер, С. Гвидо.: Пер. с англ. – СПб.: ООО «Альфа-книга», 2018. – 480 с.

37 Barron, A.E. Universal approximation bounds for superpositions of sigmoidal function / A.E. Barron // *IEEE Trans.on Information Theory*. – 1993. – V. 39. – P. 930-945.

|      |      |             |         |      |                                |      |
|------|------|-------------|---------|------|--------------------------------|------|
|      |      |             |         |      | ЮУрГУ – 150404.2019.221 ПЗ ВКР | Лист |
| Изм. | Лист | № документа | Подпись | Дата |                                | 61   |

38 Bartholomew, D.J. Latent variable models and factor analysis / D.J. Bartholomew. – Oxford University Press. – 1987. – 230 p.

39 Basilevsky, A. Statistical Factor Analysis and Related Methods: Theory and Applications / A. Basilevsky. – Wiley. – 1994. – 768 p.

40 Bergstra, J. Random search for hyper-parameter optimization / J. Bergstra, Y. Bengio // J.Machine Learning Res. – 2012. – V. 13. – P.281-305.

41 Chung, J. A recurrent latent variable model for sequential data / J. Chung, K. Kastner, L. Dinh, K. Goel, A. Courville, Y. Bengio // In NIPS'2015. – 2016.

42 Deng, L. Deep learning – methods and applications / L. Deng, D. Yu // Foundations and Trends in Signal Processing. – 2013. – V. 7, nos. 3-4. – P. 197-387.

43 Dreyfus, S. E. The computational solution of optimal control problems with time lag. / S. E Dreyfus // IEEE Transactions on Automatic Control. – 1973. – V. 18(4). – P. 383-385.

44 Gupta, S. Deep learning with limited numerical precision / S. Gupta, A. Agrawal, K. Gopalakrishnan, P. Narayanan // ICML'15 Proceedings of the 32nd International Conference on International Conference on Machine Learning. – 2015. – V. 37. – P. 1737-1746.

45 Mitchell, T.M. Machine Learning / T.M. Mitchell // McGraw-Hill, New York. – 1997. – 432 p.

46 Cohen, J. Applied multiple regression/correlation analysis for the behavioral sciences. / J. Cohen, P. Cohen, S.G. West, L.S. Aiken // Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates. – 2003. – 320 p.

47 Draper, N.R. Applied Regression Analysis / N.R. Draper, Smith H. // John Wiley, – 1998. – 548p.

48 Pedhazur, Multiple regression in behavioral research: Explanation and prediction / Pedhazur, J. Elazar // New York: Holt, Rinehart and Winston. –1986.

49 Santosa, F. Linear inversion of band-limited reflection seismograms / F. Santosa, W. William // SIAM Journal on Scientific and Statistical Computing. SIAM. –1986. – V. 7 (4). – P. 1307-1330.

|      |      |             |         |      |                                |      |
|------|------|-------------|---------|------|--------------------------------|------|
|      |      |             |         |      | ЮУрГУ – 150404.2019.221 ПЗ ВКР | Лист |
| Изм. | Лист | № документа | Подпись | Дата |                                | 62   |

50 Laurent, J. Group Lasso with Overlap and Graph LASSO / J. Laurent, G. Obozinski, J-P. Vert // Appearing in Proceedings of the 26th International Conference on Machine Learning, Montreal, Canada. – 2009.

51 Tibshirani, R. Sparsity and Smoothness via the Fused lasso / R. Tibshirani, S. Michael, R. Saharon, Z. Ji, K. Keith // Journal of the Royal Statistical Society. Series B (statistical Methodology). – 2005. – V. 67 (1). – P. 91-108.

52 Friedman, J. Regularization Paths for Generalized Linear Models via Coordinate Descent]. Journal of Statistical Software. / J. Friedman, T. Hastie, R. Tibshirani. – 2010. – V. 33 (1). – P. 1-21.

53 Bradley, E. Least Angle Regression. / E. Bradley, T. Hastie, I. Johnstone, R. Tibshirani // The Annals of Statistics. Institute of Mathematical Statistics. – 2004. – V. 32(2). – P. 407-510.

54 Birch, A. The Economic History of the British Iron and Steel Industry / A. Birch // Routledge. – 2005. – p.679.

55 Gimpel, J. The Medieval Machine: The Industrial Revolution of the Middle Ages / J. Gimpel // New York: Holt, Rinehart and Winston. – 1976. – p.365.

56 Hyde, C.K. Technological Change and the British iron industry / C.K. Hyde // Princeton University Press. – 1977. – p.558.

57 Boyd, S.P. Convex Optimization. / S.P. Boyd // Cambridge: Cambridge University Press. – 2004. – 547 p.

58 Gill, P.E. Practical Optimization. / P.E. Gill, Murray W., Wright M.H. // London: Academic Press. – 1986. –186 p.

59 Lee, J. A First Course in Combinatorial Optimization. / J. Lee // Cambridge University Press. – 2004. – 479 p.

60 Nocedal, J. Numerical Optimization. / J. Nocedal, S.J. Wright // Berlin: Springer. – 2006. – 745 p.

61 Snyman, J.A. Practical Mathematical Optimization: Basic Optimization Theory and Gradient-Based Algorithms (2nd ed.). / J.A. Snyman, D.N. Wilke // Berlin: Springer. – 2018. – 340 p.

|      |      |             |         |      |                                |      |
|------|------|-------------|---------|------|--------------------------------|------|
|      |      |             |         |      | ЮУрГУ – 150404.2019.221 ПЗ ВКР | Лист |
|      |      |             |         |      |                                | 63   |
| Изм. | Лист | № документа | Подпись | Дата |                                |      |

62 Mobahi, H. A theoretical analysis of optimization by Gaussian continuation. / H. Mobahi // AAAI'15 Proceedings of the Twenty-Ninth AAAI Conference on Artificial Intelligence. – 2015. – P. 1205-1211.

63 Barbasova, T.A. Prediction of Titanium Module in Blast Furnace Based on Multilayer Perceptron and Elman Neural Network / T.A. Barbasova, Y.V. Lapteva // 2018 Global Smart Industry Conference (GloSIC), Chelyabinsk. – 2018. – P.1-6.

64 Barbasova, T.A. Application of Recurrent Neural Network and Matrix Pencil Method in Predicting Blast Furnace Thermal State Indicators / Barbasova T.A., Lapteva Y.V., Salov D.D. // 2018 International Russian Automation Conference (RusAutoCon), Sochi. – 2018. – pp.1-5.

65 Shnayder, D.A. Enhancing Blast Furnace Control Efficiency Based on Self-Organizing Kohonen Neural Networks / D.A. Shnayder, T.A. Barbasova, Y.V. Lapteva // 2018 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), Moscow, Russia. – 2018. – P.1-4.

66 Lavrov, V.V. Regression Testing of Information-Modeling Systems for Solving Technological Problems in Blast-Furnace Production. / V.V. Lavrov, N.A. Spirin, I.A. Gurin // 2018 International Russian Automation Conference (RusAutoCon), Sochi. – 2018. – P. 1-5.

67 Luo, S. Optimal operation strategy extraction for blast furnace ironmaking process based on fuzzy C-means clustering. / S. Luo, X. Chen, J. Zeng // 2010 8th World Congress on Intelligent Control and Automation, Jinan. – 2010. – P. 1547-1551.

68 Zhou, H. Multi-objective optimization of operating parameters based on neural network and genetic algorithm in the blast furnace. / H. Zhou, C. Yang, T. Zhuang, Z. Li, Y. Li, L. Wang // 2017 36th Chinese Control Conference (CCC), Dalian. – 2017. – P.2607-2610.

69 Wang, A. Research on fault diagnosis method of blast furnace based on clustering combine SVMs dynamic pruned binary tree. / A. Wang, Y. Hou,

|      |      |             |         |      |                                |      |
|------|------|-------------|---------|------|--------------------------------|------|
|      |      |             |         |      | ЮУрГУ – 150404.2019.221 ПЗ ВКР | Лист |
| Изм. | Лист | № документа | Подпись | Дата |                                | 64   |



Y. Zhao, F. Zhao // 2010 International Conference on Networking, Sensing and Control (ICNSC), Chicago. – 2010. – P.67-70.

70 Guo, X. Minimum time dynamic optimization using double-layer optimization algorithm / X. Guo, W. Du, R. Qi, F. Qian // Proceedings of the 10th World Congress on Intelligent Control and Automation, Beijing. – 2012. – P.84-88.

71 Unnsteinsson, S.D. Fast Design Optimization of Wideband Antennas Using EM-Driven Adaptive Response Scaling / S.D. Unnsteinsson, S. Koziel // 2018 IEEE MTT-S International Conference on Numerical Electromagnetic and Multiphysics Modeling and Optimization (NEMO), Reykjavik. – 2018. – P. 1-4.

72 Abrudan, T.E. Steepest Descent Algorithms for Optimization Under Unitary Matrix Constraint / T.E. Abrudan, J. Eriksson, V. Koivunen // inIEEE Transactions on Signal Processing. – 2008. – V. 56, no. 3. – P.1134-1147.

73 Yang, L. The prediction for output of blast furnace gas based on genetic algorithm and LSSVM / L. Yang, K. He, X. Zhao, Z. Lv // 2014 9th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, Hangzhou. – 2014. – P. 1493-1498.

74 Zhao, H. Study on prediction method of hot metal temperature in blast furnace / H. Zhao, D. Zhao, Y. Yue, H. Wang, // 2017 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA), Takamatsu. – 2017. – P. 316-321.

75 An, J. Modeling method of carbon efficiency calculation in the blast furnace iron making process / J. An, D. Chen, M. Wu, W. Cao, // Proceedings of the 32nd Chinese Control Conference, Xi'an. – 2013. – P.1854-1859.

76 Choi, W. Development of automatic temperature control system in blast furnace / W. Choi, W. Yoo , S. Won // 2006 SICE-ICASE International Joint Conference, Busan. – 2006. – P.899-903.

77 Zhao, X. The model of prediction of Blast Furnace Gas Output / X. Zhao, K. He, L. Yang and Z. lv // 2014 9th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, Hangzhou. – 2014. – P.1489-1492.

|      |      |             |         |      |                                |      |
|------|------|-------------|---------|------|--------------------------------|------|
|      |      |             |         |      | ЮУрГУ - 150404.2019.221 ПЗ ВКР | Лист |
| Изм. | Лист | № документа | Подпись | Дата |                                | 65   |

78 Hongwei, G. Application of Clustering Algorithm to Blast Furnace Expert System / G. Hongwei, Z. Jianliang, Z. Haibin, Z. Xu // 2009 International Conference on Advanced Computer Control, Singapore. – 2009. – P.171-175.

79 Li, J. Multi-scale entropy analysis on the complexity of blast furnace ironmaking process / J. Li, C.Gao // 2010 The 2nd International Conference on Industrial Mechatronics and Automation, Wuhan. – 2010. – P.257-260.

Hongwei, G. Application of Clustering Algorithm to Blast Furnace Expert System / G. Hongwei, Z. Jianliang, Z. Haibin, Z. Xu // 2009 International Conference on Advanced Computer Control, Singapore. – 2009. – P.171-174

|             |             |                    |                |             |                                       |             |
|-------------|-------------|--------------------|----------------|-------------|---------------------------------------|-------------|
|             |             |                    |                |             | <i>ЮУрГУ – 150404.2019.221 ПЗ ВКР</i> | <i>Лист</i> |
|             |             |                    |                |             |                                       | 66          |
| <i>Изм.</i> | <i>Лист</i> | <i>№ документа</i> | <i>Подпись</i> | <i>Дата</i> |                                       |             |