

5. Полное руководство по языку программирования C# 6.0 и платформе .NET 4.6 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://metanit.com/sharp/tutorial/> (Дата обращения 01.03.2024)

6. Хорев П. Б. Объектно-ориентированное программирование с примерами на C#. – М.: Форум, Инфра-М, 2016. – 200 с.

УДК 669-042

**Н. О. Ибрагимов, И. О. Мельников, В. В. Лавров, И. А. Гурин,
Н. А. Спирин**

ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, Россия

РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ РАСЧЕТА ОПТИМАЛЬНОГО РАСХОДА ЖЕЛЕЗОРУДНЫХ МАТЕРИАЛОВ И ФЛЮСОВ В ДОМЕННУЮ ШИХТУ НА ОСНОВЕ ВЕБ-ТЕХНОЛОГИЙ

Аннотация. В докладе рассмотрена разработка программного обеспечения автоматизированной системы, предназначенного для расчета оптимального расхода железорудных материалов (агломерата, окатышей) и флюсов в доменную шихту с учетом технологических ограничений на шлаковый режим доменной плавки и качество получаемого чугуна. Изучена математическая модель расчета, выделены целевые функции оптимизации, управляющие воздействия и технологические ограничения, реализовано решение задачи оптимизации с использованием открытой библиотеки *GoogleOrTools*. На основе модели разработано веб-приложение, предназначенное для инженерно-технологического персонала доменного цеха.

Ключевые слова: доменное производство, доменная шихта, железорудные материалы, флюсы, оптимизация, целевая функция, веб-приложение, *ASP.NET*, *GoogleOrTools*, *SQLite*.

Abstract. The report discusses the development of software for an automated system designed to calculate the optimal consumption of iron ore materials (sinter, pellets) and fluxes into the blast furnace charge, taking into account technological restrictions on the slag mode of blast furnace smelting and the quality of the resulting cast iron. A mathematical calculation model has been studied, optimization objective functions, control actions and technological limitations have been identified, and a solution to the optimization problem has been implemented using the open library *GoogleOrTools*. Based on the model, a web application has been developed for the engineering and technological personnel of the blast furnace workshop.

Key words: blast furnace production, blast furnace charge, iron ore materials, fluxes, optimization, objective function, web application, *ASP.NET*, *GoogleOrTools*, *SQLite*.

Введение. В современных условиях доменной плавки в состав рудной части шихты входит, как правило, несколько составляющих. При определении оптимального состава доменной шихты, которые обеспечивают достижение необходимых показателей шлакового режима работы доменной печи и требуемого качества получаемого чугуна инженерно-технологическому персоналу доменного цеха приходится выполнять решение оптимизационных задач, поскольку при

выборе оптимальных управляющих воздействий необходимо учитывать комплекс ограничивающих и лимитирующих параметров работы доменной печи [1–4].

Постановка задачи. Целью данной работы является разработка автоматизированной системы для расчета оптимального расхода железорудных материалов (агломерата, окатышей) и флюсующих добавок в доменную шихту на основе веб-технологий.

Постановка задачи выбора оптимального состава доменной шихты, а также последовательность решения задачи оптимизации отражена на рис. 1.

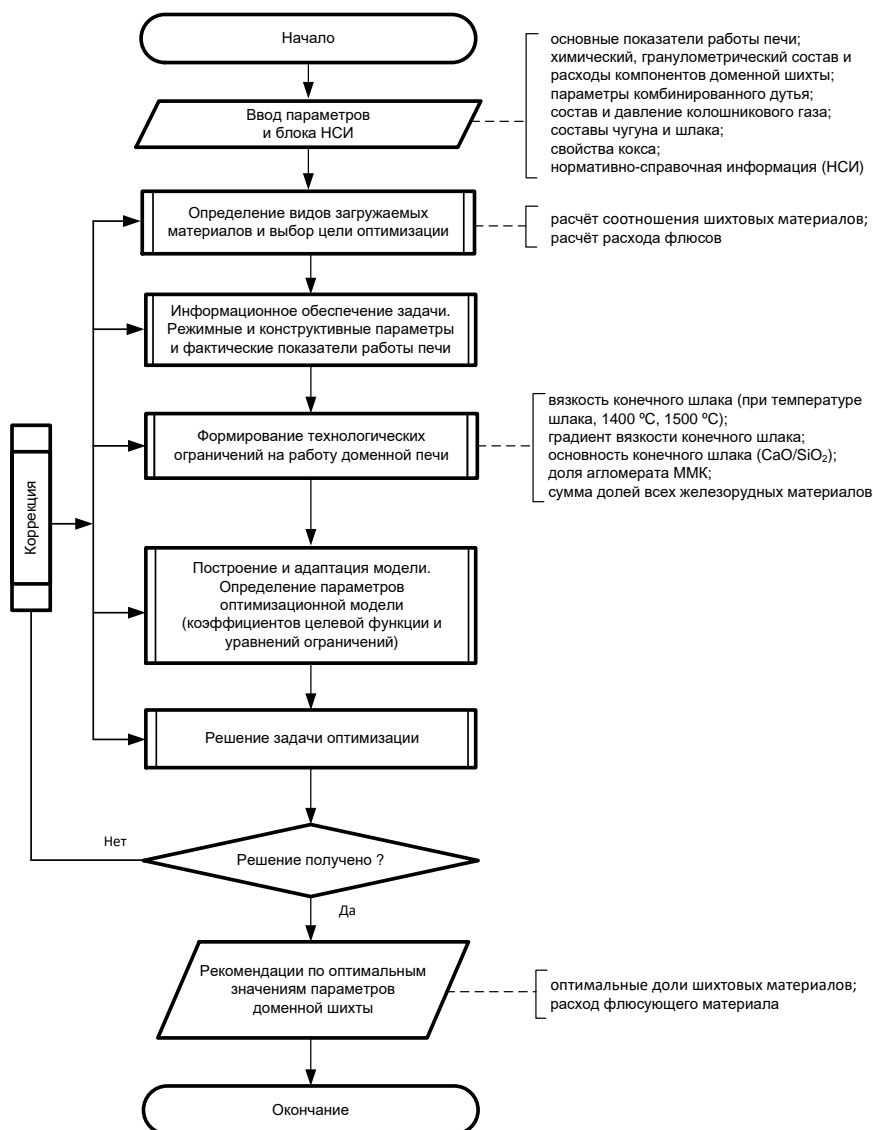


Рис. 1. Последовательность решения задачи выбора оптимального состава доменной шихты

В основу решения задачи положены данные модели [1–4]:

- сквозного расчета доменной шихты;
- расчета технико-экономических показателей доменной плавки (расхода кокса, производительности);

- моделирования свойств шлака, его обессеривающей способности и прогнозирования содержания серы в чугунае;
- диагностики хода доменной плавки.

Оптимизационная модель выбора оптимального состава доменной шихты включает в себя два основных компонента: целевая функция и технологические ограничения на доменную печь.

1. *Целевая функция.* Предусмотрены следующие варианты целевых функций:

- заданная основность конечного шлака (задается пользователем вручную, в том числе минимальная и максимальная границы):

$$Z = B \rightarrow \min_{X_{i,ш} \in G_{x_{ш}}} B_{зд} , \quad (1)$$

где i – индекс вида шихтовых материалов; $X_{i,ш}$ – вектор, характеризующий виды, расходы и химический состав i -х материалов доменной шихты; $X_{i,ш} \in G_{x_{ш}}$ – ограничения на параметры шихты заполнения, т.е. виды, химические составы, физические свойства загружаемых шихтовых материалов; $G_{x_{ш}}$ – область допустимых решений параметров шихты;

- минимум градиента вязкости конечного шлака (подбор состава с минимальным градиентом вязкости шлака);
- минимум удельного расхода кокса (подбор состава с минимальным расходом кокса):

$$Z = K \rightarrow \min_{X_{i,ш} \in G_{x_{ш}}} ; \quad (2)$$

- максимум производительности печи (подбор состава, при котором производительность доменной печи (т/сутки) будет максимальной):

$$Z = P \rightarrow \max_{X_{i,ш} \in G_{x_{ш}}} ; \quad (3)$$

- минимум содержания серы в чугунае (подбор состава, при котором содержание серы в чугунае при заданных ограничениях будет минимальной):

$$Z = [S] \rightarrow \min_{X_{i,ш} \in G_{x_{ш}}} . \quad (4)$$

Технологические ограничения. Особенность решения сложных оптимизационных задач математического программирования связана с тем, что в процессе решения могут возникнуть такие случаи, когда ограничения, наложенные на режимы работы печи, противоречивы, т. е. отсутствует область допустимых решений. В связи с этим в алгоритме решения предусмотрен этап анализа решения задачи. В случае отсутствия допустимой области решения задачи и противоречивости условий используется этап коррекции, т. е. оценить корректность использования шихтовых материалов, ограничений, надёжность исходной информации и т.д.

В связи с этим важным этапом решения задачи выбора оптимального состава шихты является формирование технологических ограничений, предусматривающих учёт и математическое описание ограничений на тепловой, газодинамический и шлаковый режимы плавки. В общем случае ограничения сводятся к следующему:

- обеспечение нормального шлакового режима;
- получение чугуна с допустимым содержанием в нем серы;
- условие шихтовки.

Шлаковый режим:

1) величина вязкости конечного шлака при температуре 1400 °С, η_{1400} , находится в интервале:

$$\eta_{1400}^{min} \leq \eta_{1400}(X_{i,ш}, X_d) \leq \eta_{1400}^{max}, \quad (5)$$

где η_{1400}^{min} , η_{1400}^{max} – постоянные величины, минимально и максимально допустимые вязкости при температуре 1400 °С (при 1400 °С обеспечивается движение шлака через коксовую насадку); X_d – вектор, характеризующий вид, расход и состав дутьевых параметров (влажность дутья, расход природного газа, технологического кислорода);

2) величина вязкости конечного шлака при температуре 1500 °С, η_{1500} , находится в интервале:

$$\eta_{1500}^{min} \leq \eta_{1500}(X_{i,ш}, X_d) \leq \eta_{1500}^{max}, \quad (6)$$

где η_{1500}^{min} , η_{1500}^{max} – постоянные величины, минимально и максимально допустимые вязкости при температуре 1500 °С (ограничение обусловлено тем, что температуру 1500 °С имеет выпускаемый из печи конечный шлак);

3) градиенты вязкости не превышают допустимых значений:

$$\Delta\eta_7^{25} \leq (\Delta\eta_7^{25})^{max}, \quad (7)$$

$$\Delta\eta_{1400}^{1500} \leq (\Delta\eta_{1400}^{1500})^{max} \quad (8)$$

где $\Delta\eta_7^{25} = \frac{25-7}{t_{шл}^7 - t_{шл}^{25}}$ – градиент-1 вязкости шлака, численно равный уменьшению вязкости шлака при увеличении температуры шлака на 1 °С в диапазоне вязкости шлака от 25 до 7 пуаз, пуаз / °С; $\Delta\eta_{1400}^{1500} = \frac{\eta_{1400} - \eta_{1500}}{1500 - 1400}$ – градиент-2 вязкости шлака, численно равный изменению вязкости шлака при изменении температуры шлака на 1 °С в пределах от 1400 °С до 1500 °С, пуаз / °С; $(\Delta\eta_7^{25})^{max}$, $(\Delta\eta_{1400}^{1500})^{max}$ – постоянные величины, максимально допустимые величины соответственно градиента-1 и градиента-2 вязкости шлака, пуаз / °С.

Качество выплавляемого чугуна. Оценивается по содержанию серы в чугуне $[S](X_{i,ш}, X_{зд})$. Оно не должно превышать допустимого предела $X_{зд}$.

$$[S](X_{i,ш}, X_d) \leq [S]_{зд}. \quad (9)$$

Условие шихтовки. Сумма весовых долей компонентов G_i^* железорудной части шихты равна единице, т. е.

$$\sum_{i=1}^n G_i^* = 1. \quad (10)$$

Управляющими воздействиями являются материалы флюсов (известняк, плавиковый шпат, кварцит и шлак фракционированный) и перечень агломератов, имеющих различную географическую принадлежность (ССГОК, Лебединские, Качканарские и Михайловские). Химический состав агломератов также указывается пользователем, исходя из изменений с каждой определенной партией. По итогу расчета пользователю выводится состав, в котором каждый компонент представлен с указанием расхода в килограммах на тонну производимого чугуна.

Разработка программного обеспечения. Для разработки веб-приложения выбран язык C# как наиболее подходящий для разработки веб-интерфейса [5]. Выбранная платформа разработки – ASP.NET. Доставка программного обеспечения будет обеспечиваться развертыванием с помощью инструмента контейнеризации Docker [6] на веб-сервере предприятия, в облачном сервисе или локально.

Реализация логики решения задачи оптимизации выполнена с использованием открытой библиотеки GoogleOrTools. Данный инструмент позволяет существенно облегчить разработку, избавляя от необходимости вручную программировать логику поиска оптимального решения.

Для хранения набора исходных данных и результатов расчета для индивидуального пользователя создана структура базы данных (рис. 2), реализованная в SQLite.

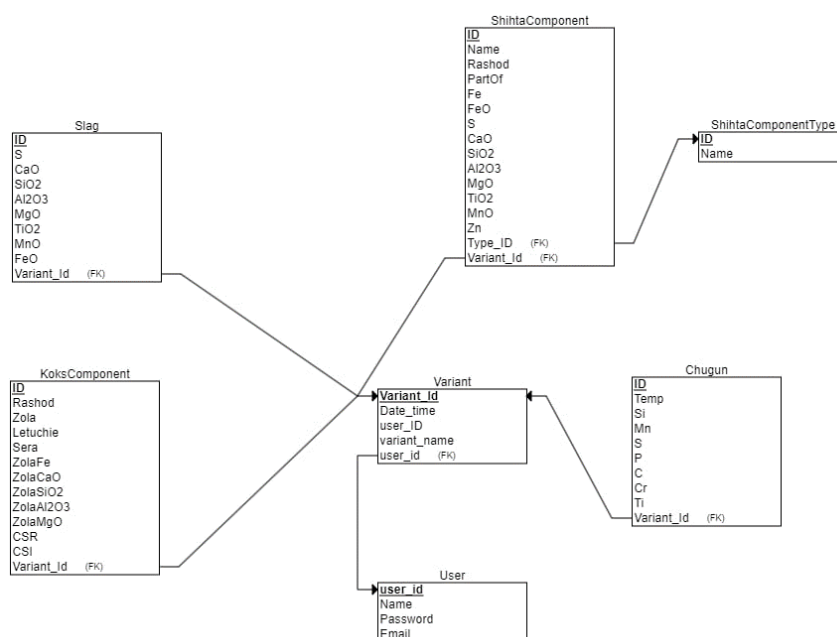


Рис. 2. Схема базы данных системы

Разделение составов компонентов в базе данных осуществляется вводом промежуточной таблицы Variant. Таким образом, у каждого компонента в таблице вместе с составом будет также идентификатор варианта расчета, чтобы пользователь мог отслеживать изменения в перечне расходов флюсов и агломератов.

На главной странице веб-приложения (рис. 3) пользователь имеет возможность ввести данные для решения задачи оптимизации, составы агломератов и остальные физические параметры.

Описание функций программного обеспечения. Разработанное на основе описанной выше модели (1)–(10) программное обеспечение системы [2; 3] позволяет инженерно-технологическому персоналу доменного цеха производить расчёт оптимального состава доменной шихты с учётом технологических ограничений на шлаковый режим доменной плавки. Предусмотрено решение следующих технологических задач:

– подбор оптимального соотношения долей агломерата ПАО «ММК» и одного из видов привозных окатышей (из выпадающего списка выбирается материал, с помощью которого должна производиться корректировка шихты для получения заданной основности шлака);

– подбор расхода одного из видов флюсующих материалов (из выпадающего списка выбирается вид флюса, с помощью которого должна производиться корректировка шихты для получения заданной основности шлака).

ные и результаты Соотношение расходов ЖРМ Расход флюсов

Расчет оптимального расхода флюса в доменную шихту

Показатель, ед. измерения	База	Проект	Отклонение от базы
Производительность доменной печи, т/сутки	2755,93	2786,05	30,12
Суммарный удельный расход кокса, кг/т чугуна	419,15	416,45	-2,70
Содержание серы в чугуне, %	0,020	0,024	0,004
Содержание Al ₂ O ₃ в шлаке, %	10,980	12,864	1,884
Содержание MgO в шлаке, %	8,510	8,826	0,316

Ввод ограничений на поиск оптимальных параметров (в проектном периоде):

Показатель, ед. измерения	Величина проектном периоде	Минимум	Максимум	Задано
Вязкость конечного шлака при 1550 С, пуаз	3,15	1,950	2,000	-
Основность конечного шлака (СаО/SiO ₂)	0,936	1,000	1,170	1,008
Вязкость конечного шлака при 1450 С, пуаз	6,036	2,000	6,500	-
Градиент вязкости конечного шлака, пуаз/град. С	0,160	0,100	0,350	-

Учитывать ограничения:

Вязкость конечного шлака при температуре шлака

Основность конечного шлака, СаО/SiO₂ (диапазон или задано)

Вязкость шлака при 1450 С

Градиент вязкости конечного шлака

Цели: [Заданная основность конечного шлака]

Управляющие воздействия (расход флюса): [Известный]

Результат расчета, доля в проектном периоде

Результат расчета, доля в проектном периоде:

Рис. 3. Страница ввода данных для решения задачи оптимизации

Использование разработанной системы при расчете состава шихты в доменном производстве приводит, в конечном итоге, к экономии железорудных материалов и кокса, что в свою очередь уменьшает себестоимость выпускаемой продукции. Программное обеспечение может быть использовано также для учебных целей студентами и преподавателями высших учебных заведений.

Список использованных источников

1. Компьютерные методы моделирования доменного процесса: монография / О.П. Онорин, Н.А. Спириин, В.Л. Терентьев, Л.Ю. Гилева, В.Ю. Рыболовлев, И.Е. Косаченко, В.В. Лавров, А.В. Терентьев; под ред. Н.А. Спирина. – Екатеринбург: УГТУ–УПИ, 2005. – 301 с.

2. Модельные системы поддержки принятия решений в АСУ ТП доменной плавки: монография / Н.А. Спириин, В.В. Лавров, В.Ю. Рыболовлев, А.В. Краснобаев, О.П. Онорин, И.Е. Косаченко; под ред. Н.А. Спирина. – Екатеринбург: УрФУ, 2011. – 462 с. Электронный научный архив УрФУ (полная версия), URL: <http://hdl.handle.net/10995/39973>.

3. Математическое моделирование металлургических процессов в АСУ ТП: учебное пособие / Н.А. Спириин, В.В. Лавров, В.Ю. Рыболовлев, Л.Ю. Гилева, А.В. Краснобаев, В.С. Швыдкий, О.П. Онорин, К.А. Щипанов, А.А. Бурыкин;

под ред. Н.А.Спирина. – Екатеринбург: УрФУ, 2014. – 558 с. Электронный научный архив УрФУ (полная версия), URL: <http://hdl.handle.net/10995/27839>.

4. Спири́н Н.А. Оптимизация и идентификация технологических процессов в металлургии: учебное пособие / Н.А. Спири́н, В.В. Лавров, С.И. Паршаков, С.Г. Денисенко; под ред. Н.А. Спирина. Екатеринбург: УГТУ–УПИ, 2006. – 311 с.

5. Программные средства решения задач оптимизации в информационно-моделирующих системах / И.А. Гури́н, В.В. Лавров, Н.А. Спири́н // Системы автоматизации (в образовании, науке и производстве): AS'2022: труды Всероссийской научно-практической конференции (с международным участием) 15–16 декабря 2022 г., Сиб. гос. индустр. ун-т. – Новокузнецк: изд. центр СибГИУ, 2022. – 417 с.: ил. С. 348–354.

6. Микросервисы и контейнеры Docker / П.С. Кочер. – М.: ДМК-Пресс, 2019. – 240 с.

УДК 621.762

А. А. Ившин, Е. А. Девятых, В. В. Лавров

ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет

имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, Россия

ПРОЕКТИРОВАНИЕ СХЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ УСТАНОВКИ ПОЛУЧЕНИЯ МЕЛКОДИСПЕРСНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОРОШКОВ ЗАДАННЫХ РАЗМЕРОВ

Аннотация. Рассмотрено проектирование схемы автоматизации технологического процесса установки получения мелкодисперсных металлических порошков заданных размеров. Рассмотрены программные математические функции получения прямоугольного сигнала. Определена основная проблема получения прямоугольного выходного управляющего сигнала для управления проектируемой установкой.

Ключевые слова: автоматизация, функциональная схема, проектирование, мелкодисперсные металлические порошки, контроллер, АСУ, рабочий режим.

Annotation. The design of an automation scheme for the technological process of an installation for obtaining finely dispersed metal powders of specified sizes is considered, software mathematical functions for obtaining a rectangular signal are considered, the main problem of obtaining a rectangular output control signal for controlling the projected installation is determined.

Key words: automation, functional diagram, design, fine metal powders, controller, automated control system, operating mode.

В современном мире проблема получения металлических порошков заданных размеров является актуальной и востребованной. Мелкодисперсные металлические порошки широко применяются в различных отраслях промышленности, таких как аэрокосмическая, автомобильная, медицинская, энергетическая и других.