

Оригинальная статья

УДК 004.942

DOI: 10.57070/2304-4497-2024-3(49)-86-96

**ПОСУТОЧНОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ПОТОКОВ СЫРЬЯ
В ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ**

© 2024 г. А. С. Леонтьев¹, И. А. Рыбенко²

¹АО «ЕВРАЗ Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат» (Россия, 654043, Кемеровская обл. –Кузбасс, Новокузнецк, шоссе Космическое, 16)

²Сибирский государственный индустриальный университет (Россия, 654007, Кемеровская обл. – Кузбасс, Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

Аннотация. На АО «ЕВРАЗ Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат» (АО «ЕВРАЗ ЗСМК») с 2017 г. разрабатывается и эксплуатируется математическая модель СММ «Прогноз», охватывающая все переделы (от добычи руды до конечной продукции). Она применяется для расчетов технических кейсов, планов, паритетных цен по железорудному сырью и углю. Ее использование принесло за 2020 г. более 200 млн руб. экономического эффекта. Использование универсальной математической модели позволило в 2023 г. начать разработку модуля посуточного оптимизации работы агломерационной фабрики и доменного производства. Рассмотрен опыт АО «ЕВРАЗ ЗСМК» по разработке и внедрению системы посуточного планирования на базе модели СММ «Прогноз», которая изначально была предназначена для сквозного сценарного расчета основных сырьевых переделов от руды и углей до готовой продукции в объемном месячном планировании. Система использует оптимизационные алгоритмы поиска глобальной целевой функции по максимизации маржинального дохода в заданных ограничениях. Математическая модель переделов использует нормы и технологию, заданные на предприятии нормативными документами. При этом модель является универсальной. Перевод алгоритмов с помесячного на посуточный режим был осуществлен с минимальными доработками. Рассмотрены возникшие трудности и методы решения этих проблем. Первой проблемой, с которой столкнулись разработчики, была низкая скорость оптимизации модели в посуточной динамике из-за сильного усложнения оптимизационной нагрузки. Время расчета существенно возросло, для решения проблемы потребовались оптимизация скорости решения уравнений, задание границ переменных, определение стартовых точек, в результате чего скорость расчета для 30 дней снизилась до 40 мин. Второй проблемой была необходимость разработки сложного алгоритма управления поставками сырья. Важным аспектом стало сохранение удобства использования системы на прежнем уровне для конечного пользователя. Результатом реализации предложенных решений является рабочий инструмент, приносящий дополнительный доход для предприятия.

Ключевые слова: металлургия, моделирование, посуточное планирование, оптимизация, агломерационная фабрика, доменный цех

Благодарности: автор выражает признательность коллективу АО «ЕВРАЗ ЗСМК».

Финансирование: автор выражает благодарность за финансовую поддержку исследования руководству АО «ЕВРАЗ ЗСМК».

Для цитирования: Леонтьев А.С., Рыбенко И.А. Посуточное планирование и оптимизация потоков сырья в черной металлургии. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2024;3(49):86–96. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-3\(49\)-86-96](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-3(49)-86-96)

Original article

**DAILY PLANNING AND OPTIMIZATION OF RAW MATERIAL FLOWS
IN FERROUS METALLURGY**

© 2024 A. S. Leont'ev¹, I. A. Rybenko²

¹JSC «EVRAZ – Joint West Siberian Metallurgical Plant» (16 Kosmicheskoe route, Novokuznetsk, Kemerovo Region – Kuzbass, 654043, Russian Federation)

²Siberian State Industrial University (42 Kirova Str., Novokuznetsk, Kemerovo Region – Kuzbass, 654007, Russian Federation)

Abstract. Since 2017, EVRAZ ZSMK JSC has been developing and operating a mathematical model covering all processing stages from ore extraction to final products – SMM Forecast. The model is used to calculate technical cases, plans, and market prices for iron ore and coal, and its use brought more than 200 million rubles of economic effect in 2020 alone. The use of a universal mathematical model made it possible to begin the development of a module for daily optimization of the agglomeration factory and blast furnace production in 2023. The article discusses the experience of EVRAZ ZSMK JSC in the development and implementation of a daily planning system based on the monthly planning model of SMM Forecast. The SMM Forecast system was originally designed for end-to-end scenario calculation of the main raw materials processing from ore and coal to finished products in a volumetric monthly planning. The system uses optimization algorithms to search for a global objective function to maximize margin income within specified limits. The mathematical model of processing uses the norms and technology specified in the company's regulatory documents. At the same time, the model is universal, and the transfer of algorithms from monthly to daily mode was carried out with minimal modifications. The article also discusses the difficulties encountered and methods of solving these problems. The first problem faced by the developers was the low speed of optimization of the model in daily dynamics due to the strong complication of the optimization load. The calculation time increased significantly, and to solve the problem, it took optimizing the speed of solving equations, setting the boundaries of variables, determining starting points, as a result of which the calculation speed for 30 days decreased to 40 minutes. The second problem was the need to develop a complex algorithm for managing the supply of raw materials. An important aspect was to maintain the usability of the system at the same level for the end user. The result of the implementation of the proposed solutions is a working tool that brings additional income to the enterprise.

Keywords: metallurgy, modeling, daily planning, optimization, sintering factory, blast furnace shop

Acknowledgements: The authors express gratitude to the team of EVRAZ ZSMK JSC for their help.

Funding: The authors express gratitude for the financial support provided by EVRAZ ZSMK JSC.

For citation: Leont'ev A.S., Rybenko I.A. Daily planning and optimization of raw materials flows in ferrous metallurgy. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2024;3(49):86–96. (In Russ.). [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-3\(49\)-86-96](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-3(49)-86-96)

Введение

Металлургия – это одна из самых ресурсоемких и энергоемких отраслей промышленности [1; 2]. Для снижения себестоимости металлургической продукции обычно проводятся инвестиционные (затратные) мероприятия. При этом одним из самых эффективных и малозатратных способов является моделирование, с помощью которого происходит планирование работы, заключающееся в оптимальном распределении дорогостоящих покупных и дефицитных собственных ресурсов для максимизации прибыли.

Математическое моделирование уже долгое время имеет решающее значение для понимания и прогнозирования явлений в тяжелой промышленности. Ранее основным источником знаний был практический опыт работы и использование упрощенного, но фундаментального понимания химии и структуры материалов, которые используются в производстве. В последнее время (в течение последних четырех десятилетий) развитие цифровых инструментов предложило аналитикам процессы новые инструменты [3] для математического моделирования и оптимизации.

Модели, использующие линейное программирование, развиваются с 1980 г. [4]. Известны модели металлургических производств, направленные на узкую оптимизацию технологии, например, в работах [5; 6] проводится расчет теплового баланса агломерации. С 2010 г. для моделирования металлургических процессов активно применяются нейронные сети [7 – 12] и статистические модели [13]. Известны и модели металлургических производств целиком [14; 15]. С конца 2010 г. особое внимание в моделировании стали уделять сокращению выбросов оксида углерода для достижения углеродной нейтральности [16]. В современной металлургической практике моделирование широко используется для предоставления решений по проектированию, управлению, оптимизации и визуализации, а также планированию. Они приобретают все большее значение в процессе цифровой трансформации и интеллектуальной металлургии [17].

Главной сложностью моделирования и планирования является то, что шихта каждого из агрегатов может состоять из сотен различных компонентов в различных допустимых комбинациях. Например, на металлургическом комбинате АО «ЕВРАЗ Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат» (АО «ЕВРАЗ ЗСМК», г. Новокузнецк) выбор материалов осуществляют более чем из 110 компонентов шихты для производства чугуна на постоянной основе [18] в разрезе месяца, планирование проводят на три месяца вперед [19; 20].

Цель и задачи разработки системы посуточного планирования

Крупнейшим в Сибири и самым восточным в Российской Федерации сталелитейным предприятием является АО «ЕВРАЗ ЗСМК». Он состоит из двух производственных площадок и горнорудного филиала, который объединяет несколько горнодобывающих и горно-обогащающих предприятий Кемеровской обл. В состав горнорудного подразделения входят шахты «Таштагольская», «Шерегешская», «Казская», а также Гурьевский карьер по добыче известняка и Абагурская обогатительная фабрика.

Площадка строительного проката специализируется на производстве длинномерного проката, в том числе из низколегированной стали (арматуры, катанки), а также фасонного проката (равнополочный уголок, балка, швеллер и другие), непрерывно литых и горячекатаных слябов и заготовок.

Площадка железнодорожного проката является лидирующим производителем всей номенклатуры рельсового сортамента не только в России, но и в мире. Здесь производят рельсы для железнодорожных, трамвайных магистралей и метрополитенов. Рельсовое производство АО

«ЕВРАЗ ЗСМК» включает рельсобалочный и электросталеплавильный цеха [21].

В связи с тем, что комбинат частично закупает сырье для производства продукции, количество которой превышает 1000 единиц, особое внимание уделяется ежемесячному планированию производства. План выпускается три раза в месяц для основных переделов и пять раз для производства продукции:

- индикативный план;
- предлагаемый план;
- утвержденный план;
- текущий план версии 1;
- текущий план версии 2.

В каждом из планов происходит итеративное уточнение плана, например, индикативный план может быть не совсем точным, следовательно, предлагаемый и утвержденные планы уходят в расчет премии сегментам.

На АО «ЕВРАЗ ЗСМК» этому уделяется особое внимание, план выпускается три раза в месяц, учитывается текущий месяц и три месяца вперед. При этом традиционные методы планирования, основанные на месячных прогнозах, часто ограничены в своей способности адаптироваться к изменяющимся условиям в реальном времени и не учитывают множество нюансов:

- даты поставки различного сырья внутри месяца;
- лаг по времени между поступлением и потреблением сырья в 8 – 10 дней из-за необходимости складирования и усреднения сырья на складе;
- различный химический состав сырья внутри месяца;
- проведение капитальных ремонтов оборудования.

Расчетная шихта может получаться оптимальной в среднем по месяцу, но при этом сильно неоптимальной в разрезе по суткам из-за неравномерных поставок флюсов, добавочных материалов или из-за перехода на сушеные концентраты в середине месяца (в ноябре). В связи с этим на АО «ЕВРАЗ ЗСМК» в 2023 г. было принято решение перевести существующую месячную модель на посуточную динамику. Необходимость в новой системе планирования, основанной на посуточной динамике, обусловлена несколькими факторами и достоинствами:

1 – гибкость (посуточное планирование позволяет быстро реагировать и адаптироваться к изменениям поступления сырья, обеспечивая гибкость процесса производства);

2 – точность (посуточное планирование учитывает детали и особенности каждого дня, что позволяет более точно определить оптимальные объемы и состав поступающего сырья, а также произведенный продукт);



Рис. 1. Главное окно программы
Fig. 1. The main window of the program

3 – амбициозность (посуточное планирование позволяет поставить амбициозную цель для выполнения производства на ежедневной основе, снижает запас на неэффективность);

4 – оптимизация затрат (посуточное планирование позволяет более эффективно распределять затраты на производство, минимизируя потери и избыточные затраты);

5 – увеличение производительности (более четкое планирование по дням позволяет оптимизировать процессы и оборудование, что ведет к повышению производительности и улучшению общей эффективности);

6 – лучшее управление рисками (посуточное планирование дает возможность более эффективно управлять рисками, связанными с колебаниями цен на сырье и спросом на продукцию);

7 – верификация результатов (посуточная динамика позволяет интерпретировать и подстраивать модель, исходя из прошедших суток, и в таком случае нет необходимости ожидать окончания месяца для корректировки результатов модели).

Посуточная система позволяет оценивать следующие экономические кейсы:

- посуточный подбор оптимальной основности агломерата под долю агломерата в печах вместо соблюдения одинаковой основности агломерата по месяцу, когда в определенные сутки приходится снижать основность агломерата добавочными материалами, а в другие перерасходовать известняк;

- подбор оптимального потребления отходов, исходя из суточного прихода вредных примесей в доменные печи;

- посуточный расчет топлива, уровня вдувания пуг;

- максимизация собственного сырья, исходя из технологических особенностей.

Разработка системы посуточного планирования для аглодоменного производства АО «ЕВРАЗ ЗСМК»

Для разработки модели была использована существующая помесячная модель СММ «Прогноз» (АО «ЕВРАЗ ЗСМК»).

В качестве базового программного обеспечения при разработке системы была выбрана Аналитическая платформа Форсайт «Prognoz Platform 8.2» [21] и среда математического моделирования GAMS. Рабочее окно программы приведено на рис. 1.

Разработанная система положительно себя зарекомендовала как для расчета плановой шихты, так и для определения экономических кейсов (делается несколько расчетов и выбирается оптимальный вариант шихты). В программную систему включены следующие переделы металлургического производства:

- рудники (добыча руды);
- обогатительная фабрика (обогащение руды);
- аглофабрика;
- коксохимическое производство (обогащение угля, производства кокса);
- доменный цех;

Границы и приближение химии производства чугуна, %

	Fe	Mn	P	S	C	Si	Cr	Ni	Cu	Al	V	Ti	Mo	W	Nb	As	Sn	Co	N	
Нижняя граница для химии производства, %	93,00	0,00	0,00	0,00	4,20	0,30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Верхняя граница для химии производства, %	95,00	0,70	0,20	0,10	5,20	0,70	0,10	0,10	0,10	0,10	1,00	1,00	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
Химический состав, % - по сертификатам	94,14	0,45	0,09	0,02	4,62	0,62	0,04	0,01	0,02	0,00	0,00	0,08	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Рис. 2. Определение границ и приближений по химическому составу чугуна
 Fig. 2. Determination of boundaries and approximations by the chemical composition of cast iron

- сталеплавильное производство (кислородно-конвертерные цеха 1 и 2);
- электросталеплавильный цех;
- прокатный цех (на рельсовой и строительной площадках).

На текущий момент система оперирует более чем 90 000 уравнениями. Модель охватывает физические процессы переделов в месячной динамике. В 2022 г. был разработан экспериментальный модуль «Энергетика». Он осуществляет оптимизацию энергооборудования в посуточной динамике на базе линейной оптимизации, который показал приемлемую скорость расчета (30 суток за 2 – 3 мин), поэтому было принято решение тиражировать опыт на другие переделы.

Посуточное планирование обладает некоторыми недостатками:

1 – большие объемы данных для оптимизации (посуточное планирование требует обработки и анализа больших объемов данных, что может потребовать специализированных ИТ-ресурсов и инфраструктуры, например, возможности Excel не позволяют оптимизировать такие обширные модели);

2 – увеличенная сложность ввода данных (посуточное планирование требует детального ввода и анализа большого количества данных, что может быть более сложным и трудоемким процессом для оператора);

3 – зависимость от точности входных данных (для успешного посуточного планирования необходима высокая точность и достоверность информации о поступающем сырье и рыночных условиях; недостоверные данные могут привести к неправильным решениям и потере эффективности, которые в разрезе месяца не столь очевидны из-за усреднения и взаимной компенсации выпадов; изменения в ценах на сырье также могут существенно влиять на результаты посуточного планирования, что требует постоянного мониторинга и корректировок, что опять же приводит к усложнению обслуживания модели).

Решение проблемы 1 (ускорение работы модели)

Для проверки гипотезы о возможности одновременной оптимизации в существующей модели был проведен быстрый эксперимент с вводом суточных данных в месячный разрез. Этот эксперимент не требовал дополнительных средств

на разработку, так как в системе уже были все возможности для многопериодного расчета, но в разрезе месяца, а не сутки.

Тесты показали существенное падение скорости при расчете более 10 периодов из-за возрастающей сложности модели и количества оптимизируемых переменных для большого периода данных. Расчет модели зачастую не завершался по достижению необходимой точности в настройках солвера, при завершении работы модели по таймеру выдавался некорректный результат.

Для оптимизации скорости и получения приемлемого результата была проведена оптимизация скорости расчета по модели [23]:

- просчитаны стартовые точки модели, исходя из входных данных, например, расход кокса в доменных печах в среднем составляет 380 кг, эту цифру можно внести как стартовую точку для облегчения работы модели, чтобы поиск начинался не с нуля, в результате чего экономится машинное время;

- определены допустимые границы по каждой из переменных, исходя из статистики процесса и допустимых границ работы оборудования; показан пример задания допустимых границ (рис. 2) по химическому составу чугуна, существенно снижающий вариативность работы;

- сделаны упрощения модели (равномерное потребление агломерата по доменным печам, потребление скипового кокса без разбивки по коксовым батареям).

Раньше с помощью модели можно было индивидуально подбирать оптимальное потребление кокса с каждой из батарей на каждую доменную печь (рис. 3), усреднение материалов (рис. 4) позволило снизить размерность модели до 100 000 переменных.

Итоговый результат по оптимизации скорости представлен на рис. 5.

На текущий момент при расчете 30 периодов модель оперирует 268 000 переменными в 96 000 уравнениях, время одновременной оптимизации 30-ти дневного периода составляет 3 – 9 мин. в зависимости от входных данных, что является приемлемым результатом по скорости расчета, но еще есть потенциал для улучшения юзабилити модели.

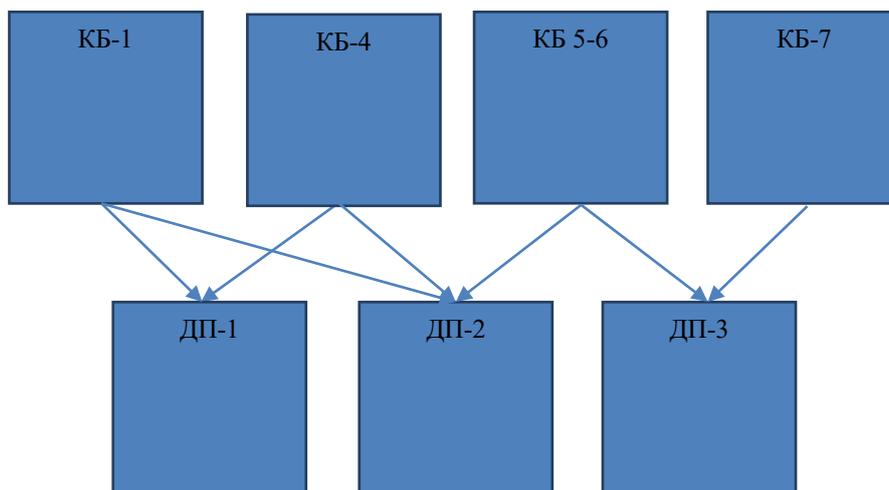


Рис. 3. Изначальная схема оптимизации потребления кокса на печах
 Fig. 3. The initial scheme for optimizing coke consumption on shoulders

Решение проблемы 2 (большие массивы данных для внесения)

Для снижения нагрузки на пользователя был принят ряд технических решений, ускоряющий ввод данных и повышающий юзабилити:

1 – максимальное использование повторяющихся данных на весь месяц (химический состав; коэффициенты модели, нормы);

2 – автозагрузка данных из АРМ при их доступности;

3 – тиражирование данных из предыдущих сценариев.

После реализации всех доработок объем ввода данных кратно сократился.

Решение проблемы 3 (нестабильность рынка и логистики)

В целом, снижение влияния рыночных условий, логистических проблем возможно только за счет привлечения дополнительной экспертизы

специалистов, что возможно при правильно работающей модели.

Разработка модуля «Штабелирование»

Для моделирования работы складов аглофабрики был разработан модуль линейной оптимизации поступающего сырья, который складывает сырье по одному из шести штабелей аглофабрики, учитывая следующие ограничения:

– поступающий маршрут сырья должен сложиться в один из штабелей целиком;

– допускается одновременное наполнение двух штабелей, после заполнения одного из них система переходит к следующему;

– потребляемый штабель не заполняется.

Целевая функция оптимизатора – это усреднение химического состава сырья внутри штабелей и между ними по химическим элементам (Fe, MgO, ZnO) и основности. По итогам опти-

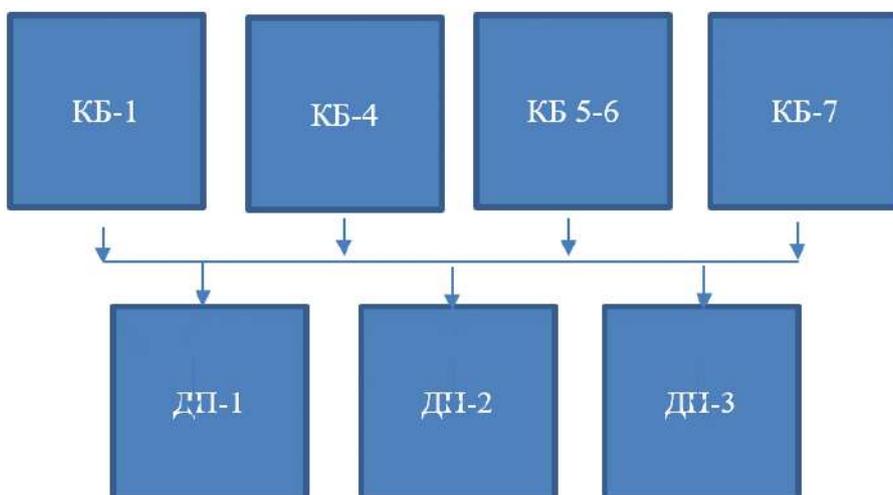


Рис. 4. Улучшенная схема оптимизации потребления кокса на печах
 Fig. 4. Improved scheme for optimizing coke consumption on shoulders

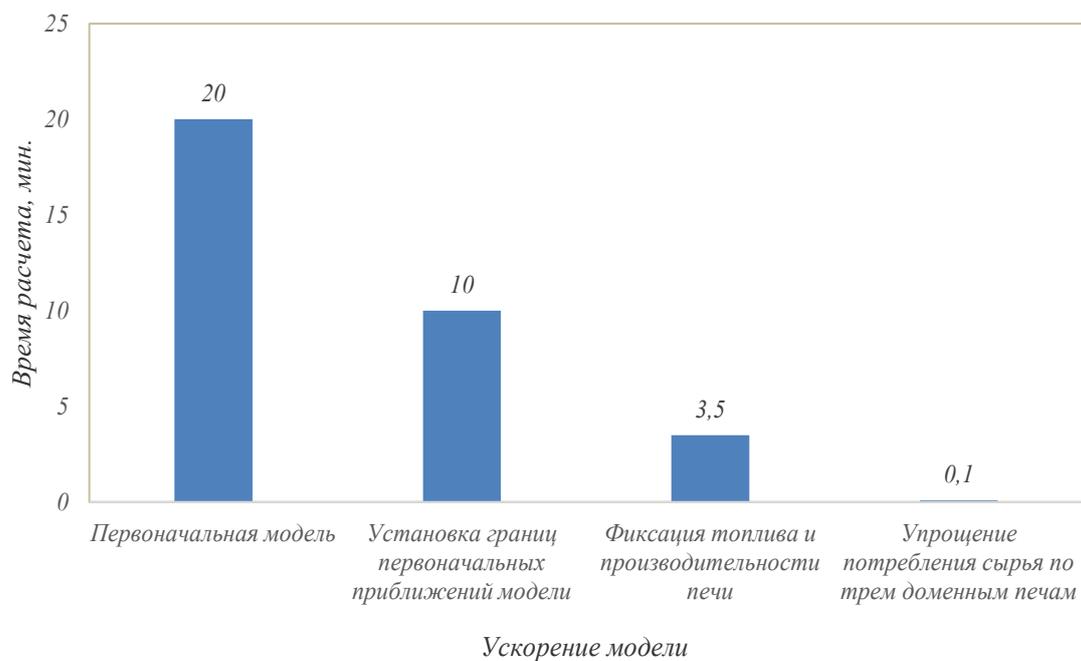


Рис. 5. Достигнутое ускорение модели
Fig. 5. Achieved acceleration of the model

мизации получается матрица заполнения штабелей (рис. 6), химический состав материала в штабелях приведен на рис. 7.

Выводы

Оптимизация посуточного планирования в черной металлургии требует разработки системы, которая удовлетворяет множеству функциональных требований. Подобные системы имеют повышенные требования к скорости расчета. Это связано с тем, что даже с оптимизациями вводных форм объем ввода данных существенно повышен относительно помесечной оптимизации. Пользователь может допустить ошибку ввода, и в рассматриваемом случае время исправление ошибки лимитируется скоростью расчета. Приемлемое время расчета составляет 40 мин.

Несмотря на все сложности, инвестиции в посуточное планирование окупаются. Изменчивость рыночных условий и цен на сырье требует более гибкого и реактивного подхода к планированию. Посуточное планирование позволяет быстро отреагировать на изменения спроса и цен, минимизируя потери и максимизируя прибыль. Посуточное планирование обеспечивает более точные результаты и детализацию в сравнении с более длительными прогнозами. Это позволяет учитывать факторы, влияющие на качество сырья и его доступность на каждый конкретный день. Такой подход позволяет оптимизировать процессы производства и снизить затраты, улучшая общую эффективность. Преимущество посуточной динамики заключается в

возможности более точно предсказывать и планировать простои оборудования и ремонтные работы. Система посуточного планирования помогает учесть необходимость профилактических мероприятий и сократить простои в производственных процессах. Использование системы позволяет получать дополнительную прибыль для предприятия и находить новые технические кейсы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лисиенко В.Г., Соловьева Н.В., Трофимова О.Г. *Альтернативная металлургия: проблема легирования, модельные оценки эффективности*. Москва: Изд-во Теплотехник, 2007:440.
2. Протопопов Е.В., Калиногорский А.Н., Ганзер А.А. Сталеплавильное производство: современное состояние и направления развития. В кн.: *«Металлургия: технологии, инновации, качество: тр. XX междунар. науч.-практ. конф. Ч. 1 / Под ред. Е.В. Протопопова*. Новокузнецк: ИЦ СибГИУ. 2019:9–14. EDN: MAPRGL.
3. Johansen S.T. Mathematical modeling of metallurgical processes. In: *Third International Conference on CFD in the Minerals and Process Industries CSIRO, Melbourne, Australia 10–12 December 2003*. Norway. 2003.
4. Svatos J., Gargulak Z. Set of Models for Planning Iron and Steel Production. *IFAC Proceedings Volumes*. 1983;16(15):55–62. [https://doi.org/10.1016/S1474-6670\(17\)64256-3](https://doi.org/10.1016/S1474-6670(17)64256-3)

Общая масса концентратов на конец суток по штабелям за 01 сен 2023-30 сен 2023 (Выделено 30 из 34421) по сценарию 321

	С3 - Виртуальный штабель №1	С3 - Виртуальный штабель №2	С3 - Виртуальный штабель №3	С3 - Виртуальный штабель №4	С3 - Виртуальный штабель №5	С3 - Виртуальный штабель №6	С3 - Виртуальный штабель №7	С3 - Виртуальный штабель №8	С3 - Виртуальный штабель №9
01 сен 2023	40 000,00	60 000,00	4 000,00	20 000,00	10 000,00				
02 сен 2023	40 000,00	62 000,00	16 000,00	20 000,00	10 000,00				
03 сен 2023	40 000,00	62 000,00	40 000,00	20 000,00	10 000,00				
04 сен 2023	40 000,00	62 000,00	60 000,00	20 000,00	14 000,00				
05 сен 2023	40 000,00	62 000,00	60 000,00	28 000,00	30 000,00				
06 сен 2023	40 000,00	62 000,00	60 000,00	48 000,00	34 000,00				
07 сен 2023	40 000,00	62 000,00	60 000,00	60 000,00	38 000,00	8 000,00			
08 сен 2023	40 000,00	62 000,00	60 000,00	60 000,00	58 000,00	12 000,00			
09 сен 2023	40 000,00	62 000,00	60 000,00	60 000,00	62 000,00	20 000,00	12 000,00		
10 сен 2023	40 000,00	62 000,00	60 000,00	60 000,00	62 000,00	40 000,00	16 000,00		
11 сен 2023	40 000,00	62 000,00	60 000,00	60 000,00	62 000,00	60 000,00	20 000,00		
12 сен 2023	40 000,00	62 000,00	60 000,00	60 000,00	62 000,00	60 000,00	40 000,00	4 000,00	
13 сен 2023	40 000,00	62 000,00	60 000,00	60 000,00	62 000,00	60 000,00	60 000,00	8 000,00	
14 сен 2023	40 000,00	62 000,00	60 000,00	60 000,00	62 000,00	60 000,00	60 000,00	32 000,00	
15 сен 2023	40 000,00	62 000,00	60 000,00	60 000,00	62 000,00	60 000,00	60 000,00	56 000,00	
16 сен 2023	40 000,00	62 000,00	60 000,00	60 000,00	62 000,00	60 000,00	60 000,00	12 000,00	4 000,00
17 сен 2023	40 000,00	62 000,00	60 000,00	60 000,00	62 000,00	60 000,00	60 000,00	28 000,00	8 000,00
18 сен 2023	40 000,00	62 000,00	60 000,00	60 000,00	62 000,00	60 000,00	60 000,00	44 000,00	12 000,00
19 сен 2023	40 000,00	62 000,00	60 000,00	60 000,00	62 000,00	60 000,00	60 000,00	60 000,00	16 000,00
20 сен 2023	40 000,00	62 000,00	60 000,00	60 000,00	62 000,00	60 000,00	60 000,00	60 000,00	28 000,00
21 сен 2023	40 000,00	62 000,00	60 000,00	60 000,00	62 000,00	60 000,00	60 000,00	60 000,00	44 000,00
22 сен 2023	40 000,00	62 000,00	60 000,00	60 000,00	62 000,00	60 000,00	60 000,00	60 000,00	60 000,00
23 сен 2023	40 000,00	62 000,00	60 000,00	60 000,00	62 000,00	60 000,00	60 000,00	60 000,00	60 000,00
24 сен 2023	40 000,00	62 000,00	60 000,00	60 000,00	62 000,00	60 000,00	60 000,00	60 000,00	60 000,00
25 сен 2023	40 000,00	62 000,00	60 000,00	60 000,00	62 000,00	60 000,00	60 000,00	60 000,00	60 000,00
26 сен 2023	40 000,00	62 000,00	60 000,00	60 000,00	62 000,00	60 000,00	60 000,00	60 000,00	60 000,00
27 сен 2023	40 000,00	62 000,00	60 000,00	60 000,00	62 000,00	60 000,00	60 000,00	60 000,00	60 000,00
28 сен 2023	40 000,00	62 000,00	60 000,00	60 000,00	62 000,00	60 000,00	60 000,00	60 000,00	60 000,00
29 сен 2023	40 000,00	62 000,00	60 000,00	60 000,00	62 000,00	60 000,00	60 000,00	60 000,00	60 000,00
30 сен 2023	40 000,00	62 000,00	60 000,00	60 000,00	62 000,00	60 000,00	60 000,00	60 000,00	60 000,00

Рис. 6. Матрица наполнения штабелей
Fig. 6. Stack filling matrix

- Mitterlehner J., Loeffler G., Winter F., Hofbauer H., Schmid H., Zwittag E., Buegler T.H., Pammer O., Stiasny H. *Modeling and Simulation of Heat Front Propagation in the Iron Ore Sintering Process*. ISIJ International. 2004;44(11):11–20. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.44.11>
- Yang W., Changkook R., Choi S., Lee D., Huh W. Modeling of Combustion and Heat Transfer in an Iron Ore Sintering Bed with Considerations of Multiple Solid. *ISIJ International*. 2004;44(3):492–499. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.44.492>
- Fernández-González D., Martín-Duarte R., Ruiz-Bustanza Á., Mochón J., González-Gasca C., Verdeja L.F. Optimization of Sinter Plant Operating Conditions Using Advanced Multivariate Statistics: Intelligent Data Processing. *The Minerals, Metals & Materials Society*. 2016;68(8):2089–2095. <https://doi.org/10.1007/s11837-016-2002-2>
- Shi Z., Lv W., & Mei G. A novel soft sensing modelling approach for sulphur content estimation in hot metal pretreatment process. *Ironmaking & Steelmaking: Processes, Products and Applications*. 2024;51. <http://dx.doi.org/10.1051/metal/2023073>
- Shao H., Yi Z., Chen Z., Zhou Z., Deng Z. Application of artificial neural networks for prediction of sinter quality based on process parameters control. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*. 2019;42(3):1–18. <https://doi.org/10.1177/0142331219883501>
- Mallicka A., Dhara S., Rath S. Application of machine learning algorithms for prediction of sinter machine productivity. *Machine Learning with Applications*. 2021;6:100186. <http://dx.doi.org/10.1016/j.mlwa.2021.100186>
- Song L., Qing L., Xiaojie L., Yanqin S. Synthetically predicting the quality index of sinter using machine learning model. *Ironmaking & Steelmaking Processes, Products and Applications*. 2020;47(7):828–836. <https://doi.org/10.1080/03019233.2019.1617573>
- Mohanan S., Mohapatra P., Kumar A. C., Adepu R. K., Koranne V.M., Prasad Y. G.S., Reddy A.S., Ramna R.V. Prediction and Optimization of Internal Return Fines Generation in Iron Ore Sintering Using Machine Learning. *Advances in Materials*. 2021;10(3):42–46. <https://doi.org/10.11648/j.am.20211003.12>
- Metzger M., Sieber A., Stirmer U. Mathematical model for a metallurgical plant, and method for optimizing the operation of a metallurgical

Химический состав в штабелях за 30 сен 2023 по сценарию 321

		Fe	Mn	P	S	FeO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO
30 сен 2023	СЗ - Виртуальный штабель №1	61,00	0,39	0,04	0,48	26,30	5,91	1,97	2,49	1,35
	СЗ - Виртуальный штабель №2	61,00	0,39	0,04	0,48	26,30	5,91	1,97	2,49	1,35
	СЗ - Виртуальный штабель №3	61,00	0,39	0,04	0,48	26,30	5,91	1,97	2,49	1,35
	СЗ - Виртуальный штабель №4	63,33	0,27	0,03	0,37	27,70	5,49	1,34	1,70	1,00
	СЗ - Виртуальный штабель №5	62,13	0,33	0,03	0,42	26,98	5,70	1,67	2,11	1,18
	СЗ - Виртуальный штабель №6	61,00	0,39	0,04	0,48	26,30	5,91	1,97	2,49	1,35
	СЗ - Виртуальный штабель №7	61,00	0,39	0,04	0,48	26,30	5,91	1,97	2,49	1,35
	СЗ - Виртуальный штабель №8	61,00	0,39	0,04	0,48	26,30	5,91	1,97	2,49	1,35
	СЗ - Виртуальный штабель №9	61,00	0,39	0,04	0,48	26,30	5,91	1,97	2,49	1,35
	СЗ - Виртуальный штабель №10	61,00	0,39	0,04	0,48	26,30	5,91	1,97	2,49	1,35
	СЗ - Виртуальный штабель №11	61,00	0,39	0,04	0,48	26,30	5,91	1,97	2,49	1,35
	СЗ - Виртуальный штабель №12	61,00	0,39	0,04	0,48	26,30	5,91	1,97	2,49	1,35

Рис. 7. Химический состав полученных штабелей
Fig. 7. Chemical composition of the resulting stacks

- plant using a model. Pat. US 7,720,653 B2 USA Patent. 2010.
- Lian X., Wu D., Lu S., Liu C., Wang H., Wang J. Optimal scheduling of multi-energy medium in steel enterprises based on improved genetic simulated annealing algorithm. *Proceedings of the 2024 Chinese Control and Decision Conference (CCDC)*. 2024:2632–2637. <https://doi.org/10.1109/CCDC62350.2024.10587574>
 - Liu Q., Shao X., Yang J.-P., Zhang J.-S. Multiscale modeling and collaborative manufacturing for steelmaking plants. *Chinese Journal of Engineering*. 2012;12:1698–1712. <https://doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2021.09.27.010>
 - Zhang J., Liu Y., Liu Q. Metallurgical Process Simulation and Optimization Metallurgical Process Simulation and Optimization. *Materials*. 2022;15(23):8421. <https://doi.org/10.3390/ma15238421>
 - Леонтьев А. С., Рыбенко И. А. Опыт разработки и применения системы математического моделирования на «ЕВРАЗ ЗСМК». В кн.: *Моделирование и наукоемкие информационные технологии в технических и социально-экономических системах: труды V Международной научно-практической конференции с международным участием / под общ. ред. И.А. Рыбенко, Т.В. Киселевой*. Новокузнецк: ИЦ СибГИУ. 2021:250–255. EDN: ATSSJP.
 - Леонтьев А.С., Рыбенко И.А. Опыт использования и повышения юзабилити системы математического моделирования производства на металлургическом предприятии. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2023;66(1):119–126. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2023-1-119-126>
 - Леонтьев А.С., Рыбенко И.А. Опыт внедрения машинного обучения для расчета качества и производства агломерата на «ЕВРАЗ ЗСМК». В кн.: *Металлургия: технологии, инновации, качество: тр. XXII междунар. науч.-практ. конф. Ч. I / Под ред. А.Б. Юрьева*. – Сиб. гос. индустр. ун-т. Новокузнецк: ИЦ СибГИУ. 2021:82 – 87. EDN: HRRSAU.
 - Информация о АО «ЕВРАЗ ЗСМК»// Газета Коммерсант. – URL: <https://www.kommersant.ru/doc/3502550> (дата обращения 16.09.2024).
 - Аналитическая платформа прогноз платформ/Сайт компании Форсайт. – URL: <https://www.fsight.ru/> (дата обращения 16.09.2024).
 - GAMS. – URL: https://www.gams.com/latest/docs/UG_ExecErrPerformance.html (дата обращения: 19.10.2023).

REFERENCES

- Lisienko V.G., Solov'eva N.V., Trofimova O.G. *Alternative metallurgy: the problem of alloying, model efficiency estimates*. Moscow : Izd. Teplotekhnika. 2007:440. (In Russ.).
- Protopopov E.V., Kalinogorskii A.N., Ganzer A.A. Steel production: current range and directions of development. In: *"Metallurgy: technologies, innovations, quality: TR. Overseas. learned-practical. conf. H. 1 / E.V. Protopopov ed*. Novokuznetsk: ITs SibGIU. 2019:9–14. EDN: MAPRGL. (In Russ.).
- Johansen S.T. Mathematical modeling of metallurgical processes. In: *Third International Conference on CFD in the Minerals and Pro-*

- cess Industries CSIRO, Melbourne, Australia 10-12 December 2003.* Norway. 2003.
4. Svatos J., Gargulak Z. Set of Models for Planning Iron and Steel Production. *IFAC Proceedings Volumes*. 1983;16(15):55–62.
[https://doi.org/10.1016/S1474-6670\(17\)64256-3](https://doi.org/10.1016/S1474-6670(17)64256-3)
 5. Mitterlehner J., Loeffler G., Winter F., Hofbauer H., Schmid H., Zwittag E., Buerger T. H., Pammer O., Stiasny H. Modeling and Simulation of Heat Front Propagation in the Iron Ore Sintering Process. *ISIJ International*. 2004;44(11):11–20.
<https://doi.org/10.2355/isijinternational.44.11>
 6. Yang W., Changkook R., Choi S., Lee D., Huh W. Modeling of Combustion and Heat Transfer in an Iron Ore Sintering Bed with Considerations of Multiple Solid. *ISIJ International*. 2004;44(3):492–499.
<https://doi.org/10.2355/isijinternational.44.492>
 7. Fernández-González D., Martín-Duarte R., Ruiz-Bustanza Í., Mochón J., González-Gasca C., Verdeja L. F. Optimization of Sinter Plant Operating Conditions Using Advanced Multivariate Statistics: Intelligent Data Processing. *The Minerals, Metals & Materials Society*. 2016;68(8):2089–2095.
<https://doi.org/10.1007/s11837-016-2002-2>
 8. Shi Z., Lv W., & Mei G. A novel soft sensing modelling approach for sulphur content estimation in hot metal pretreatment process. *Ironmaking & Steelmaking: Processes, Products and Applications*. 2024;51.
<http://dx.doi.org/10.1051/metal/2023073>
 9. Shao H., Yi Z., Chen Z., Zhou Z., Deng Z. Application of artificial neural networks for prediction of sinter quality based on process parameters control. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*. 2019;42(3):1–18.
<https://doi.org/10.1177/0142331219883501>
 10. Mallicka A., Dhara S., Rath S. Application of machine learning algorithms for prediction of sinter machine productivity. *Machine Learning with Applications*. 2021;6:100186.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.mlwa.2021.100186>
 11. Song L., Qing L., Xiaojie L., Yanqin S. Synthetically predicting the quality index of sinter using machine learning model. *Ironmaking & Steelmaking Processes, Products and Applications*. 2020;47(7):828–836.
<https://doi.org/10.1080/03019233.2019.1617573>
 12. Mohanan S., Mohapatra P., Kumar A.C., Adepur R.K., Koranne V.M., Prasad Y.G.S., Reddy A.S., Ramna R.V. Prediction and Optimization of Internal Return Fines Generation in Iron Ore Sintering Using Machine Learning. *Advances in Materials*. 2021;10(3):42–46.
<https://doi.org/10.11648/j.am.20211003.12>
 13. Metzger M., Sieber A., Stirmer U. Mathematical model for a metallurgical plant, and method for optimizing the operation of a metallurgical plant using a model Pat. US 7,720,653 B2 USA Patent. 2010.
 14. Lian X., Wu D., Lu S., Liu C., Wang H., Wang J. Optimal scheduling of multi-energy medium in steel enterprises based on improved genetic simulated annealing algorithm. *Proceedings of the 2024 Chinese Control and Decision Conference (CCDC)*. 2024:2632–2637.
<https://doi.org/10.1109/CCDC62350.2024.10587574>
 15. Liu Q., Shao X., Yang J.-P., Zhang J.-S. Multiscale modeling and collaborative manufacturing for steelmaking plants. *Chinese Journal of Engineering*. 2012;12:1698–1712.
<https://doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2021.09.27.010>
 16. Zhang J., Liu Y., Liu Q. Metallurgical Process Simulation and Optimization Metallurgical Process Simulation and Optimization. *Materials*. 2022;15(23):8421.
<https://doi.org/10.3390/ma15238421>
 17. Leont'ev A.S., Rybenko I.A. Experience in the development and application of the mathematical modeling system at EVRAZ ZSMK. In: *Modeling and high-tech information technologies in technical and socio-economic systems: proceedings of the V International Scientific and Practical Conference with international participation* / I.A. Rybenko, T.V. Kiseleva ed. Novokuznetsk: ITs SibGIU. 2021:250–255. EDN: ATSSJP. (In Russ.).
 18. Leont'ev A.S., Rybenko I.A. Mathematical modelling system for metallurgical enterprise: Operation and usability enhancement. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2023;66(1):119–126.
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2023-1-119-126>
 19. Leont'ev A.S., Rybenko I.A. Experience in implementing machine learning for calculating the quality and production of agglomerate at EVRAZ ZSMK. In: *Metallurgy: technologies, innovations, quality: tr. XXII international scientific and practical conference* / A.B. Yuriev ed. Novokuznetsk: ITs SibGIU. 2021:82–87. EDN: HRRSAU.
 20. Information about EVRAZ ZSMK JSC // EVRAZ Company website. Available at URL:<https://www.kommersant.ru/doc/3502550> (Accessed 16.09.2024).
 21. Analytical platform platform forecast // Website of the Foresight company. Available at URL:<https://www.fsight.ru/> (Accessed 16.09.2024). (In Russ.).

22. GAMS. Available at URL: https://www.gams.com/latest/docs/UG_ExecErrPerformance.html (Accessed 19.10.2023). (In Russ.).

Сведения об авторах:

Алексей Сергеевич Леонтьев, старший менеджер группы планирования, АО «ЕВРАЗ ЗСМК»
E-mail: aleksey.leontiev@evraz.com

Инна Анатольевна Рыбенко, д.т.н., доцент, заведующий кафедрой прикладных информационных технологий и программирования, Сибирский государственный индустриальный университет

E-mail: rybenkoi@mail.ru
ORCID: 0000-0003-1679-0839
SPIN-код: 2300-9843

Information about the authors:

Aleksei S. Leont'ev, Senior Manager of the Planning Group, EVRAZ ZSMK JSC.

E-mail: aleksey.leontiev@evraz.com

Inna A. Rybenko, Dr. Sci. (Eng.), Assist. Prof., Head of the Chair of Applied Information Technologies and Programming, Siberian State Industrial University

E-mail: rybenkoi@mail.ru
ORCID: 0000-0003-1679-0839
SPIN-код: 2300-9843

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare that there is no conflict of interest.*

Поступила в редакцию 09.01.2024
После доработки 29.01.2024
Принята к публикации 05.02.2024

Received 09.01.2024
Revised 29.01.2024
Accepted 05.02.2024