

## МЕТАЛЛУРГИЯ ЧЕРНЫХ, ЦВЕТНЫХ И РЕДКИХ МЕТАЛЛОВ

УДК 669.162.16

<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2018-16-3-30-38>

## ОПТИМИЗАЦИЯ ПОТРЕБЛЕНИЯ УГОЛЬНОГО СЫРЬЯ В ПАО «ММК» НА ОСНОВЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Липатников А.В.<sup>1</sup>, Шмелёва А.Е.<sup>1</sup>, Степанов Е.Н.<sup>1</sup>, Шнайдер Д.А.<sup>2</sup><sup>1</sup> ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат», г. Магнитогорск, Россия<sup>2</sup> Южно-Уральский государственный университет (НИУ), г. Челябинск, Россия

**Аннотация.** Магнитогорский металлургический комбинат (ММК) – один из крупнейших мировых производителей стали и ведущая российская металлургическая компания. ПАО «ММК» представляет собой металлургический комплекс с полным производственным циклом, начиная с подготовки железорудного сырья и заканчивая глубокой переработкой черных металлов. Развитие ПАО «ММК» идет в направлении повышения конкурентоспособности продукции и снижения затрат на производство, что неразрывно связано с работой доменного цеха. Технично-экономические показатели работы доменного цеха в значительной степени определяют экономику предприятия в целом, поэтому снижение себестоимости чугуна является важной и актуальной задачей.

В общей структуре себестоимости чугуна расходы на кокс составляют около 30%. Таким образом, целью работы является решение задачи по снижению себестоимости чугуна за счет снижения расхода кокса в доменном цехе на основе оптимизации закупки угольной шихты. Задача оптимизации закупки угольной шихты заключается в подборе долевого участия поставщиков, обеспечивающего минимальную стоимость угольной шихты при технологически заданном качестве кокса. Результатом исследования являются: разработка методики оптимального потребления угольной шихты; определение нелинейных статистических взаимосвязей между показателями качества угольной шихты и показателями качества получаемого кокса, показателями качества кокса и удельным расходом кокса на уровне 70–80%; определение принципиальной возможности построения модели оптимизации привоза и потребления угольного сырья в ПАО «ММК» на основе имеющихся статистических данных; возможность снижения стоимости, используемой угольной шихты при аналогичном качестве, либо улучшения качества кокса при неизменной цене на основе использования разработанной модели. Дальнейшее развитие модели состоит в разработке автоматизированной системы планирования привоза и потребления угольной шихты, а также для прогнозирования качества кокса при фактическом привозе.

**Ключевые слова:** кокс, коксующийся уголь, закупка угля, системы поддержки принятия решений, промышленная оптимизация, автоматизация бизнес-процессов.

## Введение

Острая конкурентная борьба на рынке металлопродукции вынуждает крупные комбинаты искать потенциальные возможности для снижения издержек практически во всех сферах своей деятельности. Потенциалы повышения эффективности производства за счет более интенсивного использования ресурсов оборудования и увеличения производительности труда практически исчерпаны, а иногда могут приводить к нежелательным последствиям, таким как отказы оборудования и производственные травмы.

Тем не менее существуют сферы, в которых все еще остается потенциал снижения затрат. Оптимизация технологических и бизнес-процессов, применение математического моде-

лирования для их описания открывают широкие возможности по снижению издержек без необходимости к излишнему стимулированию труда или эксплуатации оборудования на износ [1].

Исключение человеческого фактора из процесса принятия управленческих решений позволяет минимизировать риски, связанные с влиянием фактора человеческой иррациональности, однако следует учитывать важность и полезность накопленных людьми знаний и обязательно использовать их при разработке систем поддержки принятия решений.

Автоматизация и формализация человеческих знаний позволяет интегрировать опыт различных служб для решения комплексных задач, при этом получая такие решения, которые учитывают большую часть требований и пожеланий этих служб.

© Липатников А.В., Шмелёва А.Е., Степанов Е.Н., Шнайдер Д.А., 2018

Одной из наиболее сложных составляющих производства металлопродукции с точки зрения оптимизации управления технологическим процессом является доменное производство. Снижение затрат в этом переделе возможно в том числе за счет внедрения в производство оперативного и адаптивного управления [2].

Оперативное управление предполагает сбор данных с приборов учета, контроль и корректировку процесса в режиме онлайн. Адаптивное управление предполагает комплексную оптимизацию агло-коксо-доменного производства в целом, включая закупку угольного сырья для производства кокса [3].

В процессе принятия решений, связанных с закупкой угля, принимают участие различные службы ПАО «ММК»: научно-технический центр, коксохимическое производство, управление материально-технических и энергетических ресурсов и управление экономики. Формализация и оптимизация данного процесса позволит существенно снизить трудовые и временные затраты, а также учесть, в определенной степени, пожелания всех вышеперечисленных служб.

Отличительной чертой ПАО «ММК» является отсутствие постоянной, стабильной сырьевой базы. Данное обстоятельство открывает возможность для оптимизации процесса закупки и потребления угольных концентратов. Наличие большого количества поставщиков угля с различными качественными характеристиками позволяет получать угольную смесь определенного состава различными способами.

Таким образом, основная цель данного исследования заключается в поиске наиболее дешевого варианта структуры потребления угольной шихты, при которой будут выполнены все технологические требования, связанные с качеством поставляемых концентратов, рыночной конъюнктурой, состоянием оборудования коксохимического производства, заключенными договорами, состоянием склада угольных концентратов и т.д.

### Модель прогнозирования качества кокса

Металлургический кокс – это крупнопористый материал высокой прочности, производимый при коксовании либо углей специальных марок, либо угольной шихты при температуре около 1400 К. Примерно 90% кокса, производимого из угольной шихты, используется для производства чугуна в доменных печах. При этом кокс выполняет три основные функции:

- в качестве топлива кокс обеспечивает тепло для протекания эндотермических химических реакций и для расплава шлака и металла;
- в качестве восстановителя кокс образует газы для восстановления железа из оксидов;
- в качестве пористой насадки кокс является единственным твердым материалом в горне доменной печи, который поддерживает чугун и создает коксовый тотерман, необходимый для протекания жидких фаз шлака и чугуна в горн и продвижения газа в шахту доменной печи [4].

Кокс – это наиболее важный материал, загружаемый в печь, с точки зрения влияния на ход доменного процесса и качество получаемого чугуна. Высокое качество кокса должно обеспечивать плавный сход шихты, при этом давая наименьшее количество примесей, наибольшее количество тепла, максимальное восстановление металла и оптимальную проницаемость для жидких и газовых потоков доменной печи. Использование кокса высокого качества позволит снизить удельный расход кокса, повысить производительность доменных печей и снизить себестоимость чугуна [5].

Так как решаемая задача является подзадачей для задачи более высокого уровня, а именно снижение себестоимости чугуна, то и часть ограничений, накладываемых технологиями, является не непосредственным требованием на определенное качество угольной шихты, а требованием на определенное качество кокса. Следовательно, возникает дополнительная задача исследования зависимости между показателями качества кокса и показателями качества угольной шихты. Данная задача была глубоко изучена специалистами ПАО «ММК» [6–8].

Общая постановка задачи представлена на рис. 1.

К основным показателям качества угольной шихты относятся: содержание влаги ( $W_r$ ), содержание золы ( $A$ ), выход летучих веществ ( $V_d$ ), содержание серы ( $S$ ), толщина пластического слоя ( $Y$ ), показатель отражения витринита ( $R_o$ ), сумма отошающих компонентов ( $Sok$ ) и коэффициент технологической ценности ( $TVC$ ).

Для расчета показателей качества угольной шихты используется средневзвешенная сумма показателей с добавлением корректирующего коэффициента ( $I$ ). Корректирующий коэффициент отражает среднюю разницу между фактическими лабораторными данными и средневзвешенной суммой показателей качества угольной шихты в соответствии со структурой ее потребления. Показатели качества для каждого поставщика определяются на основе лабораторных анализов.

$$K = \sum_{i=1}^n (k_i \cdot r_i) + k_{corr}, \quad (1)$$

$r_i$  – доля  $i$ -го поставщика в общей поставке;

$k_i$  – показатель качества  $i$ -го поставщика ( $Wr$ ,  $A$ ,  $Vd$ ,  $S$ ,  $Y$ ,  $Ro$ ,  $Sok$ ,  $TVC$ );

$k_{corr}$  – корректирующий коэффициент по одному из показателей;

$K$  – средневзвешенное значение показателя качества угольной шихты;

$n$  – число поставщиков.

К основным показателям качества кокса относятся: прочность по отношению к дробящим усилиям ( $M_{25}$ ), прочность по отношению к истирающим усилиям ( $M_{10}$ ), реакционная способность ( $CRI$ ), горячая прочность ( $CSR$ ), содержание золы ( $Ad$ ), содержание серы ( $Sd$ ).

Показатели качества кокса измеряются несколько раз в день, образуя месячные показатели качества.

Для исследования взаимосвязи между показателями качества кокса и показателями качества угольной шихты использовались методы регрессионно-корреляционного анализа. Изначально, в качестве исходной базы данных для исследования была использована статистика работы коксохимического производства за 2011–2015 года. Ввиду строго регламента работы на коксохимическом производстве, а также большого влияния технологических факторов, таких как погрешность методов отбора проб и проведения замеров показателей, состояние угольных башен и т.д., было решено дополнить базу данными индивидуальных ящичных спеканий, проводимых лабораторией коксохимического производства.

Уравнения зависимостей между показателями качества кокса и показателями качества угольной шихты выглядят следующим образом:

$$Y = \sum_i w_i x^k + w_0, \quad (2)$$

где  $Y$  – показатель качества кокса ( $M_{10}$ ,  $M_{25}$ ,  $Ad$ ,  $Sd$ ,  $CSR$ ,  $CRI$ );

$x$  – показатель качества угольной шихты ( $Wr$ ,  $A$ ,  $Vd$ ,  $S$ ,  $Y$ ,  $Ro$ ,  $Sok$ ,  $TVC$ );

$w_i$  – коэффициент уравнения регрессии, подбираемый с помощью метода наименьших квадратов;

$w_0$  – свободный член уравнения регрессии;

$k$  – степень уравнения регрессии, определяемая эмпирически.

Полученные модели имеют нелинейный характер, обусловленный наличием экстремума по некоторым показателям качества угольной шихты. Степень объясненности уравнений составляет порядка 70–80% для показателей  $M_{10}$ ,  $M_{25}$ ,  $Ad$ ,  $Sd$  и более низкую для показателей  $CSR$ ,  $CRI$ , т.к. статистика по ним менее представительна. Данные показатели были исключены при дальнейшем исследовании. Оставшаяся часть, вероятно, обусловлена человеческим фактором, погодными условиями и состоянием оборудования.

На рис. 2 представлена динамика фактического и рассчитанного по модели показателя  $M_{10}$  на месячных данных за 2016 год. При этом следует учитывать, что прогноз рассчитывается на 1 шаг вперед, а после получения фактических данных уравнения уточняются.

Имея данные уравнения, можно рассчитывать какого качества получится кокс при определенном составе угольной шихты, что открывает возможность к сравнению разных вариантов, в том числе которых ранее не было, и их последующей оптимизации. Тем не менее следует учитывать, что при кардинальном изменении состава угольной шихты необходимо корректировать полученные уравнения, добавляя данные по спеканиям в базу данных лабораторных спеканий, и пересчитывать регрессионные коэффициенты с учетом новой информации.

### Модель привоза и потребления угольного сырья

Как было указано ранее, в процессе принятия решений по закупке угля участвует несколько подразделений. Каждое из этих подразделений имеет собственную цель: научно-техническому центру необходимо получить наилучшее качество кокса, коксохимическое производство стремится к максимизации производства при минимальном расходе угля на кокс, а также обеспечению страхового запаса шихты, коммерческие службы стремятся потратить наименьшее количество денег, а управление экономики заинтересовано в общем снижении затрат. На основе этих целей была разработана следующая модель:

$$F = \sum_{i=1}^n c_i r_i \rightarrow \min; \quad (3)$$



Рис. 1. Логика модели оптимизации потребления угольного сырья в ПАО «ММК»

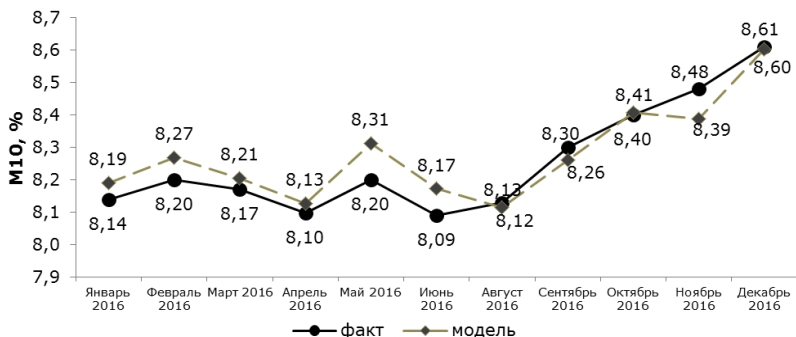


Рис. 2. Динамика фактического и рассчитанного на основе модели показателя истираемости кокса  $M_{10}$

$$\begin{cases}
 M_{10} \leq M_{10}^* & (4) \\
 M_{25} \geq M_{25}^* & (5) \\
 Ad_c \leq Ad_c^* & (6) \\
 Sd_c \leq Sd_c^* & (7) \\
 Vd \leq Vd^* & (8) \\
 V_i^{min} \leq V_i \leq V_i^{max} & (9) \\
 M_{10} \leq M_{10}^* \sum_{i=1}^n f_i \leq f^* & (10) \\
 \sum_{i=1}^n r_i = 1 & (11) \\
 r_i \geq 0 & (12)
 \end{cases}$$

где  $c_i$  – цена одной тонны угольного концентрата  $i$ -го поставщика;

$r_i$  – доля  $i$ -го поставщика в общей поставке;

$n$  – число поставщиков;

$M_{10}$ ,  $M_{25}$ ,  $Ad_c$ ,  $Sd_c$  – основные показатели качества кокса (требуемое качество отмечено звездочкой);

$V_i^{min}$  – минимальное контрактное ограничение для  $i$ -го поставщика;

$V_i^{max}$  – максимальное контрактное ограничение для  $i$ -го поставщика, либо его производственная мощность;

$V_i$  – объем поставки концентрата  $i$ -го поставщика;

$\hat{f}_i$  – доля жирной части в марочной структуре угля, % (требуемое качество отмечено звездочкой).

Целевая функция представляет собой стоимость 1 т угольной шихты (3). Коммерческие службы предоставляют цены для целевой функции на основе проводимых маркетинговых исследований. С этой точки зрения коммерческие службы являются основными пользователями модели, т.к. целевая функция отражает их пожелания.

Первая группа ограничений (4)–(7) исходит от технологов и представляет собой минимально допустимые показатели качества кокса (отмечены звездочкой - \*).

В группу технологических ограничений также входят ограничения на марочный состав угольной шихты (10). Необходимо сохранять

определенные пропорции газово-жирной и коксующейся частей, чтобы технологический процесс протекал в штатном режиме и не приводил к авариям и поломкам оборудования. Научно-технический центр предоставляет данные лабораторных анализов входящего сырья по поставщикам, необходимые для расчета средневзвешенных показателей качества угольной шихты.

Вторая группа (9) представляет собой контрактные ограничения возникающих вследствие ограниченности возможностей поставок различных продавцов угольного сырья. В эту группу входят также долгосрочные договорные обязательства, предписывающие ПАО «ММК» приобретать определенное количество какого-либо концентрата ежемесячно. Данные ограничения предоставляет управление материально-технических и энергетических ресурсов.

Коксохимическое производство требует обеспечивать определенное содержание летучих веществ в шихте (8) для безопасности процесса и производства определенного количества продукции.

Требования управления экономики заключаются в экономической эффективности оптимизированного расчета по сравнению с вариантом, рассчитанным вручную.

Так как бюджет ПАО «ММК» в части закупок угольного сырья утверждается на месяц, то и план закупок и соответствующие ему планы поставок должны актуализироваться ежемесячно. Цены актуализируются управлением материально-технического и энергетических ресурсов тоже ежемесячно. Тем не менее задача оптимизации закупки угольного сырья может решаться в трех временных интервалах:

- на месячном интервале, для небольших корректировок бюджета;
- на квартальном интервале, в виде советчика управлению материально-технических и энергетических ресурсов для заключения новых контрактов с поставщиками;
- на годовом интервале для определения стратегических приоритетов ПАО «ММК» на рынке угольного сырья.

На рис. 3 представлена упрощенная схема бизнес-процесса. Наиболее важной частью данного бизнес-процесса является анализ результатов. На этом этапе каждый отдел должен либо принять результаты расчета, либо предоставить замечания и изменить входные данные или условия расчета. Таким образом, процесс остается итеративным, однако не требует большого количества совещаний. Расчет гарантирует, что все пожелания будут выполнены. Однако иногда

возникает ситуация, при которой область ограничений представляют собой пустое множество, т.к. цели отделов противоположны.

### Реализация модели и возникающие проблемы

Выполнение аналитических расчетов и оптимизация долевого участия поставщиков осуществлялась на основе языка программирования для статистической обработки данных и работы с графикой «R» [9, 10].

Входные данные поступают со всех отделов, вовлеченных в процесс. Так как уравнения (2) являются статистическими, необходимо уточнять их по мере поступления новых данных. Более того, в данной задаче область технологических ограничений является невыпуклой, так как уравнению зависимости качества кокса от качества угольной шихты (2) являются нелинейными. При оптимизации невозможно использовать классические методы линейного математического программирования. Следовательно, необходимо либо использовать градиентные методы локальной оптимизации, которые быстро дают результат, но не гарантируют приближения к глобальному решению, либо использовать эволюционные глобальные методы оптимизации, которые требуют значительных затрат времени на оптимизацию и в принципе тоже не гарантируют превосходного результата. Комбинация этих двух подходов может существенно улучшить результат, однако по-прежнему глобальный минимум может и не быть достигнут.

Было решено использовать усеченный алгоритм Ньютона (preconditioned truncated Newton algorithm) из открытой библиотеки для нелинейной оптимизации «NLOpt» [11], т.к. он давал наилучшие результаты при тестировании. Так как данный алгоритм предполагает безусловную оптимизацию, ограничения были переделаны в штрафы целевой функции расширенным алгоритмом Лагранжа.

Второй математической проблемой является несовместность ограничений, накладываемых одновременно различными службами. В данном случае область допустимых значений не имеет даже невыпуклой площади и решение задачи не существует как таковое. Данную проблему можно решить, преобразовывая ограничения в штрафные части целевой функции. Затем можно проводить уже безусловную оптимизацию, при этом часть ограничений может оказаться невыполненными. Правомерность отказа от части ограничений в определенной мере должно опре-

деляться службой, поставившей данное ограничение, при предъявлении результатов расчета. Например, если допустить, что качество кокса не достигает требуемого уровня, но стоимость существенно снижается, то возможно следует принять такой вариант, разумеется, если это не скажется на качестве дальнейших переделов, а лишь на удельных показателях расходных коэффициентов.

### Основные выводы и результаты

Решение задачи определения структуры закупа угольной шихты в ПАО «ММК» в настоящее время осуществляется в ручном режиме. Структура подбирается во взаимодействии различных служб, причем каждая из них преследует свои цели, которые в большинстве случаев противоположны. Разработанная модель оптимизации потребления угольной шихты позволяет в

автоматизированном режиме подбирать оптимальный состав, учитывая пожелания всех служб и максимизируя экономический эффект.

Для оценки результатов решения используется 2 сравнительные таблицы. В первой отражено долевое участие поставщиков до оптимизации, т.е. рассчитанное вручную, и после оптимизации (табл. 1).

Как видно из таблицы, отличие не очень большое из-за строгих контрактных ограничений. Однако экономический эффект является значительным, т.к. закупается большее количество угля.

Таблицы 2, 3, 4 отражают ожидаемое изменение технологических и экономических показателей. Показатели разбиты на группы: показатели качества шихты, показатели качества кокса и общие технико-экономические показатели.

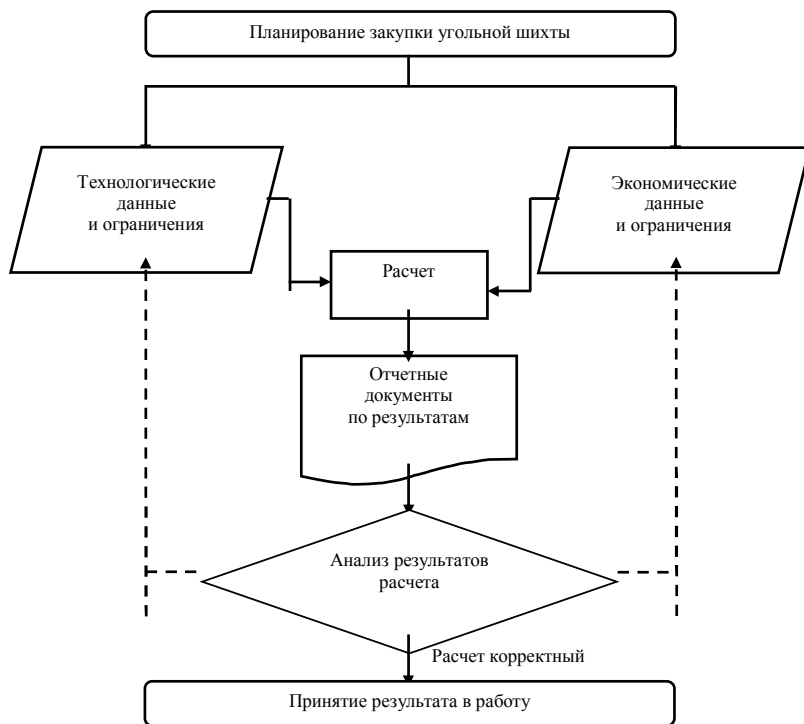


Рис. 3. Упрощенная схема бизнес-процесса планирования закупки угольной шихты с использованием модели оптимизации потребления угольного сырья в ПАО «ММК»

Таблица 1

Сравнение базового и оптимального вариантов

Поставщики	Марка угля	Базовый вариант, %	Оптимальный вариант, %	Разница, %
Поставщик А	Ж+КС	31,2	30,7	-0,5
Поставщик В	ГЖО+Ж	5,0	4,4	-0,6
Поставщик С	ГЖ	17,8	18,2	0,3
Поставщик D	ГЖО +ГЖ	-	1,5	1,5
Поставщик Е	ГЖ+Ж	-	1,5	1,5
Поставщик F	К+КО	4,3	2,0	-2,3
Поставщик G	КС	5,1	5,0	-0,2
Поставщик H	ОС	5,2	3,0	-2,2
Поставщик I	КО	4,2	-	-4,2
Поставщик J	ОС	0,1	-	-0,1
Поставщик K	КС+ОС	-	3,0	3,0
Поставщик L	К	2,8	0,8	-2,0
Итого		100%	100%	0

Таблица 2

Изменение качества кокса

Индикатор	Базовый вариант	Оптимальный вариант	Разница
M <sub>10</sub> , %	8,19	8,19	0,00
M <sub>25</sub> , %	88,64	88,65	0,02
Ad, %	12,91	12,86	-0,06
Sd, %	0,51	0,50	-0,01

Таблица 3

Изменение качества угля

Индикатор	Базовый вариант	Оптимальный вариант	Разница
W, %	8,42	8,36	-0,06
Ad, %	9,81	9,75	-0,06
Vdaf, %	28,75	28,72	-0,03
Sd, %	0,59	0,58	-0,01
Y, мм	19,24	19,07	-0,17
Ro	1,07	1,08	0,01
Sok, %	34,40	33,13	-1,28

В качестве требуемых показателей качества кокса использовались показатели качества базового варианта. Все показатели оказались лучше базовых. M<sub>10</sub> остался тем же, т.к. это наиболее критичный показатель.

В режиме опытно-промышленной эксплуатации экономический эффект от модели составляет около 50–70 млн руб. в месяц без снижения качества кокса.

К основным достоинствам модели можно отнести:

- интеграцию знаний различных служб в виде ограничений модели;
- допуски ослаблений на ограничения при несовместности области допустимых решений;
- снижение доли человеческого фактора в процессе принятия решений;
- применение модели не требует каких-либо изменений в технической или технологической составляющей процесса, а затрагивает лишь организационную его часть;
- комплексный подход к решению задачи закупки угольной шихты.

Таблица 4

Изменение общих технико-экономических параметров

Параметр	Базовый вариант	Оптимальный вариант	Разница
Удельный расход кокса, кг/т	441,0	440,3	-0,7
Производительность доменной печи в месяц, т	893 000	894 270	1 270
Цена, руб./т (на момент тестирования)	5771	5618,7	-152,25
Общие затраты, млн руб.	3803,4	3736,7	-66,7

Следующим этапом развития модели является ее опытно-промышленная эксплуатация в виде пилотного проекта. Для этого этапа необходимо



димо разработать базовый программный интерфейс, формы ввода и вывода информации для различных служб, настроить интеграцию с базами данных и корпоративными информационными системами ПАО «ММК». Следовательно, дальнейшее развитие модели состоит в разработке программной ее части. Завершающим этапом разработки модели станет описание бизнес-процесса, отражающего взаимодействие различных служб для успешного и своевременного функционирования модели.

#### Список литературы

1. Abdullin V.V., Shnayder D.A., Kazarinov L.S. Method of Building Thermal Performance Identification Based on Exponential Filtration // Lecture Notes in Engineering and Computer Science: Proceedings of The World Congress on Engineering 2013, WCE 2013, 3–5 July, 2013, London, U.K., pp. 2226–2230.
2. Казаринов Л.С., Барбасова Т.А., Захарова А.А. Метод прогнозирующего управления энергетической эффективностью промышленного предприятия // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. 2013. Т. 13. № 2. С. 12–24.
3. Shnayder D.A., Abdullin V.V. A WSN-based system for heat allocating in multiflat buildings, 2013 36th International

- Conference on Telecommunications and Signal Processing Proceedings, TSP 2013, 2–4 July, 2013, Rome, Italy, Article number 6613915, pp. 181–185.
4. Díez M.A., Alvarez R., Barriocanal C. Coal for metallurgical coke production: predictions of coke quality and future requirements for coking // International Journal of Coal Geology 50 (2002) 389–412.
  5. Valia H. S. Coke Production for Blast Furnace Ironmaking // American Iron and Steel Institute. 2014.
  6. Исследование изменения физико-химических и прочностных свойств скипового и фурменного кокса (ПАО «ММК») / Степанов Е.Н., Мельников И.И., Гридасов В.П., Степанова А.А. // Сталь. 2009. № 4. С. 2–4.
  7. Прогноз качества кокса на основе экспертной оценки работы доменных печей / Степанов Е.Н., Моисеенко А.С., Тарасов Н.А., Нефедов С.Н., Верблюденко А.П. // Металлург. 2002. № 1. С. 40–42.
  8. Степанова А.Е., Иванова Т.А., Степанов Е.Н. Оптимизация подбора угольной шихты и ее влияние на снижение расхода кокса в доменном цехе // Совершенствование технологии в ПАО «ММК»: Сб. тр. Центральной лаб. ПАО «ММК». Вып. 11. Магнитогорск, 2007. С. 37–41.
  9. Липатников А.В. Эконометрика в «R»: практикум. Магнитогорск: МГТУ, 2014. 76 с.
  10. Crawley M.J., The R Book. Wiley, 2013, 1076 p.
  11. Официальный сайт библиотеки «NLOpt»: [ab-initio.mit.edu/wiki/index.php/NLOpt\\_Algorithms](http://ab-initio.mit.edu/wiki/index.php/NLOpt_Algorithms).

Поступила 14.11.18

Принята в печать 03.12.18

#### INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2018-16-3-30-38>

### MATHEMATICAL MODELING AND OPTIMIZATION OF RAW COAL CONSUMPTION IN PJSC «MMK»

**Andrei V. Lipatnikov** – Senior Specialist, Group of Mathematical Modeling and System and Analytical Research, R&D Center, PJSC Magnitogorsk Iron and Steel Works, Magnitogorsk, Russia. E-mail: [lipatnikov.av@mmk.ru](mailto:lipatnikov.av@mmk.ru)

**Anna E. Shmelyova** – Senior Economist, Group of Mathematical Modeling and System and Analytical Research, R&D Center, PJSC Magnitogorsk Iron and Steel Works, Magnitogorsk, Russia. E-mail: [stepanova.ae@mmk.ru](mailto:stepanova.ae@mmk.ru)

**Evgeny N. Stepanov** – PhD (Eng.), Senior Specialist, Group of Sintering, Coking, and Blast Furnace Processes, R&D Center, PJSC Magnitogorsk Iron and Steel Works, Magnitogorsk, Russia. E-mail: [stepanov.en@mmk.ru](mailto:stepanov.en@mmk.ru)

**Dmitry A. Shnayder** – DSc (Eng.), Professor, Automation and Control Department South Ural State University (National Research University), Chelyabinsk, Russia. E-mail: [shnayder.da@mmk.ru](mailto:shnayder.da@mmk.ru)

**Abstract.** The Magnitogorsk Iron and Steel Works (MMK) is one of the world's largest steel producers and a leading Russian steelmaking company. MMK is a fully integrated production complex beginning with the iron ore preparation process through the ferrous metals downstream production. It focuses on increasing competitiveness of its products and reducing production costs, which are directly attributed to the blast furnace shop operation. The blast furnace shop performance indicators significantly determine business economics in general; therefore, cutting pig iron production costs is an important

current task. Coke expenses take about 30% of a total cast iron cost structure. Thus, the paper aims at undertaking a task of reducing cast iron cost by cutting coke consumption in the blast furnace shop as a result of the coal concentrate procurement optimization. The coal concentrate procurement may be optimized by selecting the suppliers' share that provides a minimum coal concentrate price and the coke quality required by the process. The results of the research are as follows: developing an optimum coal concentrate consumption method; determining nonlinear statistical relations between coal concentrate quality indi-



cators and resulting coke quality indicators, between coke quality indicators and specific coke consumption at 70–80%; determining a possibility to create a model for optimizing delivery and consumption of coal concentrate at PJSC MMK, using available statistical data; reducing the coal concentrate price, while keeping the same coke quality or improving the coke quality without changing the price, based on a developed model. Further development of the model lies in developing an automated system for planning delivery and consumption of coal concentrate, and for forecasting the coke quality considering actually delivered materials.

**Keywords:** Coke, coking coal, coal procurement, decision support systems, industrial optimization, business process automation.

### References

1. Abdullin V.V., Shnayder D.A., Kazarinov L.S. Method of building thermal performance identification based on exponential filtration. *Lecture Notes in Engineering and Computer Science: Proceedings of the World Congress on Engineering 2013, WCE 2013*, July 3–5, 2013, London, U.K., pp. 2226–2230.
2. Kazarinov L.S., Barbasova T.A., Zakharova A.A. Method of energy efficiency predictive control of industrial facilities. *Vestnik Yuzhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Kompyuternye tekhnologii, upravlenie, radioelektronika* [Bulletin of the South Ural State University. Series: Computer Technologies, Control, Radio Electronics], 2013, vol. 13, no. 2, pp. 12–24. (In Russ.)
3. Shnayder D. A., Abdullin V. V. A WSN-based system for heat allocating in multi-flat buildings. *The 36th International Conference on Telecommunications and Signal Processing Proceedings, TSP 2013*, July 2–4, 2013, Rome, Italy, paper number 6613915, pp. 181–185.
4. M.A. Diez, R. Alvarez, C. Barriocanal. Coal for metallurgical coke production: predictions of coke quality and future requirements for cokemaking. *International Journal of Coal Geology*, 50 (2002), pp. 389–412.
5. Valia H. S. Coke production for blast furnace ironmaking. American Iron and Steel Institute, 2014.
6. Stepanov E.N., Melnikov I.I., Gridasov V.P., Stepanova A.A. Studies on changes in physical and chemical and strength properties of skip and tuyere coke (PJSC MMK). *Stal* [Steel], 2009, no. 4, pp. 2–4. (In Russ.)
7. Stepanov E.N., Moiseenko A.S., Tarasov N.A., Nefedov S.N., Verbyudenko A.P. Predicting coke quality, applying an expert evaluation of the blast furnace operation. *Metalurg* [Metallurgist], 2002, no. 1, pp. 40–42. (In Russ.)
8. Stepanova A.E., Ivanova T.A., Stepanov E.N. Optimizing a selection procedure for coal charge and its influence on a reduction of coke consumption at the blast furnace shop. *Sovershenstvovanie tekhnologii v PAO MMK: Sb. tr. Tsentralnoy lab. PAO MMK* [Improving process engineering at PJSC MMK: Collection of papers of the PJSC MMK Central Laboratory], issue 11, Magnitogorsk, 2007, pp. 37–41. (In Russ.)
9. Lipatnikov A.V. *Ekonometrika v "R": praktikum* [Econometrics with R: practical course]. Magnitogorsk: NMSTU, 2014, 76 p. (In Russ.)
10. M.J. Crawley. *The R Book*, Wiley, 2013, 1076 p.
11. Available at: ab-initio.mit.edu/wiki/index.php/NLopt\_Algorithms. An official web-site of the NLopt library.

Received 14/11/18  
Accepted 03/12/18

### Образец для цитирования

Оптимизация потребления угольного сырья в ПАО «ММК» на основе математического моделирования / Липатников А.В., Шмельёва А.Е., Степанов Е.Н., Шнайдер Д.А. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2018. Т.16. №4. С. 30–38. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2018-16-3-30-38>

### For citation

Lipatnikov A.V., Shmelyova A.E., Stepanov E.N., Shnayder D.A. Mathematical modeling and optimization of raw coal consumption in PJSC «MMK». *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2018, vol. 16, no. 4, pp. 30–38. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2018-16-3-30-38>