

А.И.Швачка, А.Л.Чайка, В.Г.Зайцев

РАЗВИТИЕ ИНФОРМАЦИОННОЙ БАЗЫ ПРИНЯТИЯ УПРАВЛЯЮЩИХ РЕШЕНИЙ ПО ВЕДЕНИЮ ДОМЕННОЙ ПЛАВКИ

Целью работы является развитие информационно–аналитической базы принятия научно обоснованных управляющих решений по ведению доменной плавкой с использованием методов векторной оптимизации. Показано, что в отличие от ранее используемых данный подход позволяет получить пространство конкурирующих решений, которые являются оптимальны в том или ином отношении. Представлены результаты выполненных исследований по поиску компромиссных решений в области «расход кокса – производительность – расход условного топлива».

доменная плавка, векторная оптимизация, конкурирующие решения, производительность, расход условного топлива

Общая характеристика задачи множественного выбора. При управлении техническими объектами имеется несколько показателей оценки эффективности их работы. Помимо наиболее широко распространенного экономического критерия, могут быть важными энергетические, экологические и др. факторы. Они учитываются обычно путем введения соответствующих ограничений при выборе наиболее экономичных решений. Главные трудности представляют при этом задание минимально необходимых уровней других критериев и определение требующихся для их удовлетворения материальных (экономических) затрат. В редких случаях влияние неэкономических факторов может быть настолько сильным, что характеризующие их показатели должны приниматься как равноправные критерии эффективности наряду с экономическими показателями. Очевидно, что оптимизация по нескольким показателям [1] имеет противоречивый характер.

Наличие нескольких показателей создает неопределенность целей управления [2]. Раскрытие этой неопределенности возможно только с участием человека. Конкретно это могут быть экспертные оценки при соизмерении показателей разной природы (например, экономических и экологических), оценки допустимости компромиссов. Многокритериальность (векторность) и противоречивость интересов должны учитываться при согласовании целей управления подсистем и при комплексной постановке задач управления.

Методология системного анализа в задаче векторной оптимизации. С учетом задач, которые определяют специфику современного доменного производства, учитывая неопределенность показателей дутья, высокие издержки на энергетические ресурсы, а также растущие запросы по производству, необходимо рассматривать вопросы реализации режимов доменной плавки с учетом концепции междомдульного взаимодейст-

вия, естественным образом отражающего специфику комплексной организации и представления разнородных информационных моделей описания сложных технических систем [3].

Системное рассмотрение расхода энергии показывает, что современная доменная печь является по существу энергетически безотходным агрегатом. А снижение «потерь» энергии в доменной печи увеличивает расход энергии в других агрегатах завода, потребляющих энергию [4]. При системном подходе к расходу энергии в масштабах предприятия управление расходом топлива в доменной печи следует производить с учетом возможной замены природного газа другими более дешевыми видами топлива, в топливном балансе цехов, потребляющих это топлива, например, колошниковым газом [5].

Основные принципы доменной плавки с точки зрения системного анализа [6]:

- применение математических моделей и методов;
- учет неопределенности при неполноте исходной информации, многокритериальность;
- иерархическое представление внутренней структуры и процесса управления;
- изучение и учет внешних связей рассматриваемой системы.

Рассмотрим основные принципы организации тепловой работы доменной печи с точки зрения системного подхода – поиска компромиссного решения ведения доменной плавки в области Р-К-Т (рис.1). Применение этого подхода позволяет осуществлять формализованный поиск решений и давать рекомендации по оптимизации материальных и энергетических потоков, иных параметров выплавки чугуна. На начальной стадии работы можно говорить о корректирующем влиянии фактора стабилизации параметров на тепловой режим доменной плавки. В полном же объеме стоит задача нахождения таких оптимальных решений, в которых оценка систем подачи дутья входит как один из основных ограничивающих составляющих расчетов изучаемого объекта.

Математический аппарат решения задачи векторной оптимизации. В задачах векторной оптимизации в большинстве случаев, абсолютно лучшее решение выбрать невозможно, так как при переходе от одного варианта к другому часто значения одних показателей улучшаются, а значения других ухудшаются [7]. Состав таких показателей называется противоречивым, и окончательно выбранное решение всегда будет компромиссным. Поэтому невозможно говорить об объективном единственном решении такой задачи.

Математический алгоритм выбора компромиссных решений основан на использовании бинарных отношений предпочтения теории принятия решений [8].

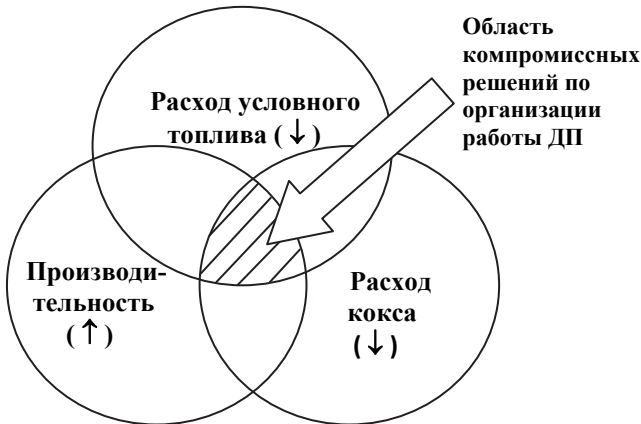


Рис. 1. Комплексная оценка эффективности доменной плавки

Смысл бинарных отношений заключается в последовательном попарном сравнении элементов в соответствии с установленным правилом предпочтения. Для поиска множества компромиссных решений будем использовать отношения предпочтения Парето. Оптимальность по Парето – такое состояние системы, при котором значение каждого частного показателя, описывающего состояние системы, не может быть улучшено без ухудшения значения других показателей. Ситуация, когда достигнута эффективность по Парето — это ситуация, когда все выгоды от обмена исчерпаны.

В отличие от ранее используемых в теории доменной плавки методов векторной оптимизации, которые заключаются в сведении задачи к одно-критериальной и последующее её решение методами скалярной оптимизации, данный метод [9] позволяет получить множество конкурирующих решений, которые оптимальны в том или ином отношении.

Рассмотрим постановку задачи векторной оптимизации по трем показателям: $f_1(x_1, x_2, x_3, x_4)$, $f_2(x_1, x_2, x_3, x_4)$, $f_3(x_1, x_2, x_3, x_4)$. Каждый из показателей желательно сделать как можно меньше:

$$\left(\begin{array}{l} y_1 = f_1(x_1, x_2, x_3, x_4) \\ y_2 = f_2(x_1, x_2, x_3, x_4) \\ y_3 = f_3(x_1, x_2, x_3, x_4) \end{array} \right) \rightarrow \min, x_i \in X \subseteq R_n.$$

Перебор точек пространства и анализ конкурирующих решений выполняется с использованием понятия «конуса» рассмотренного в работе [10] для двухмерного пространства.

Каждой точке пространства множества решений функций y_1, y_2, y_3 поставим в соответствие вектор. Начало вектора соответствует началу координат, конец вектора определяется положением данной точки в про-

странстве. Для обхода множества точек решений и выбора конкурирующих ведено понятие конуса (рис.2). Для этого выбирается первый в рассмотрении вектор из массива множества решений. Задается угол в плоскости (α) относительно указанного вектора и выполняется поворот с помощью прямой, проведенной из начала координат под углом (α) относительно рассматриваемого вектора в пространстве, в результате получаем фигуру вращения – конус.

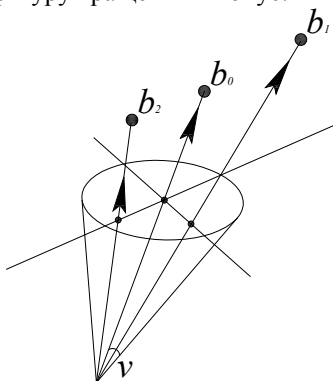


Рис.2. Характеристика понятия «конус» по выбору конкурирующих решений

В результате построения конуса относительно отдельно взятого вектора в рассмотрение принято ряд точек, соответствующим концам векторов из начала координат. Выполняя попарно сравнение модулей векторов внутри конуса, получаем одну точку локального оптимума, которая соответствует вектору с наименьшим модулем. Все рассмотренные в данном конусе точки исключаются из дальнейшего рассмотрения. Выбираем следующую, не охваченную конусом точку и выполняем построения относительно нее конуса, дальнейшая процедура поиска по аналогии с приведенной выше. Таким образом, обходим с использованием понятия «конуса» все пространство решений и выделяем по единственной точке решения внутри каждого конуса, т.е. получаем множество конкурирующих точек.

Выполнение исследования на объекте в области трех параметров

В качестве объекта управления принята доменная печь №9 (5000м^3) в условиях ПАТ «Арселор Миттал Кривой Рог». В соответствии с разработанной статической оптимизационной моделью по одному показателю приняты такие целевые функции:

$P(T_d, O_2, m, n)$ - производительность, $t/\text{час}$ ($P \rightarrow \max$),

$K(T_d, O_2, m, n)$ - расход кокса, $\text{кг}/t \text{ чугу}$ ($K \rightarrow \min$),

$T(T_d, O_2, m, n)$ - расход условного топлива, $\text{кг}/t \text{ чугу}$ ($T \rightarrow \min$),

где T_d - температура дутья, $^{\circ}\text{C}$; O_2 - содержание кислорода в дутье. %; m - доля углерода природного газа; n - доля углерода пылеугольного топлива.

Ограничения на параметры дутья (независимые переменные):

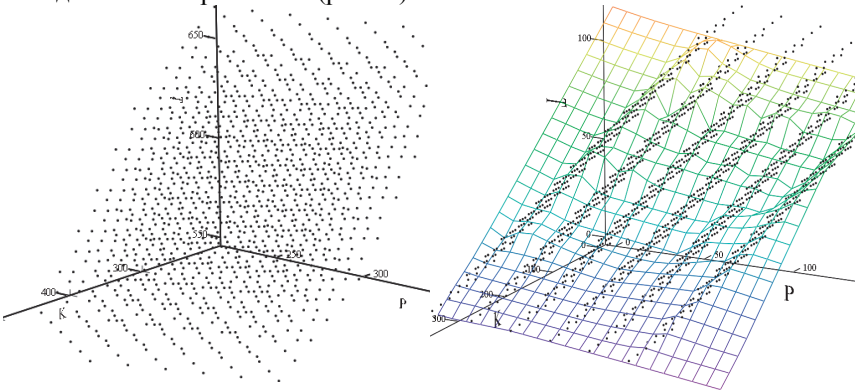
$$1000 \text{ } ^{\circ}\text{C} \leq T_d \leq 1200 \text{ } ^{\circ}\text{C},$$

$$21 \% \leq O_2 \leq 31 \%,$$

$$0 \leq m \leq 0,36, 0 \leq n \leq 0,4$$

Формируем массив (рис.3а) множества точек решений функций (P, K, T) при варьировании независимых переменных $(T_{\text{д}}, O_2, m, n)$.

Выполняя обход поверхности множества точек решений с использованием понятия конуса, получаем компромиссные решения задачи (рис.3а), которые для более наглядного представления решения задачи объединены поверхностью (рис.3б).



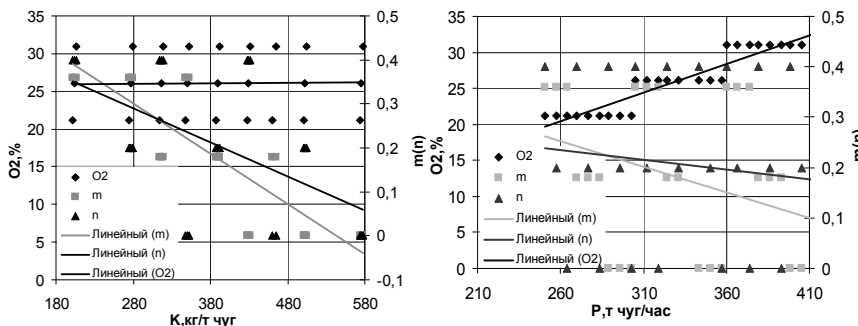
б) множество точек решений

а) компромиссные решения (поверхность)

Рис.3. Решение задачи векторной оптимизации в области поиска «P-K-T»

В результате анализа характеристик дутьевого режима компромиссных решений были определены точки локального оптимума по каждой из целевой функции. Расход кокса ($K=201,8$ кг/т чугуна) был достигнут при максимальной температуре дутья и значении топливных добавок и минимальном содержании кислорода в дутье. Значение производства ($P=412,1$ т чугуна/час) соответствует полному отсутствию топливных добавок и максимальному содержанию кислорода в дутье и его температуры. По расходу условного топлива ($T=646,4$ кг/т чугуна) максимальное использование ПУТ и кислорода, показатели по ПГ и температуре дутья находятся на средних отметках.

Характеристика дутьевого режима в области решений задачи векторной оптимизации представлена (рис.4) относительно основных параметров: расход кокса, производительность. Для этого отобраны наиболее перспективные точки решений. В частности, рассмотрен дутьевой режим при максимальной, в ограничениях, температуре дутья (1200°C).



а) относительно расхода кокса б) относительно производительности
Рис.4. Характеристика дутьевого режима в области решений К–Р–Т при постоянной температуре дутья (1200⁰С)

В результате решения задачи векторной оптимизации получены данные, определяющие целевые функции при заданных наборах дутьевых режимов по принятым условиям предпочтения. Причем, нет четкой закономерности по изменению параметров дутья в данных режимах, она может быть отображена по статистической обработке информации. Например, увеличение производительности сопровождается ростом содержания кислорода в дутье от 20 до 32% и снижением доли углерода ПГ до 0,1 и доли ПУТ– до 0,17.

Выполнение исследования на объекте в области двух параметров.

В условиях изменения конъюнктуры рынка сбыта металлопродукции и постоянного роста стоимости энергоресурсов, как правило, возникают задачи, требующие поиска компромисса между двумя параметрами, зачастую имеющих противоречивый характер изменения, среди них:

1) превышение стоимости кокса стоимости природного газа определяет необходимость решения задачи в пространстве T_{min} – P_{max} (минимум расхода условного топлива обеспечивающего максимум производства);

2) переход на ПУТ определяет целесообразность рассмотрения задачи векторной оптимизации в пространстве K_{min} – P_{max} (минимум расхода кокса обеспечивающий максимум производительности);

3) при отсутствии спроса на чугун целесообразно решение задачи в пространстве T_{min} – K_{min} (минимум использования сырья и энергии).

Решение задач векторной оптимизации в указанной постановке должно обеспечить проверку адекватности принимаемых решений и их согласованность при различных показателях оптимальности, а также возможность анализа решений в задачах оптимизации по трем параметрам и обоснованность принимаемых на их основании решений. Множество точек решений в области поиска Р–К а также область компромиссных решений (точки огибающие множество) представлена на рис.5.

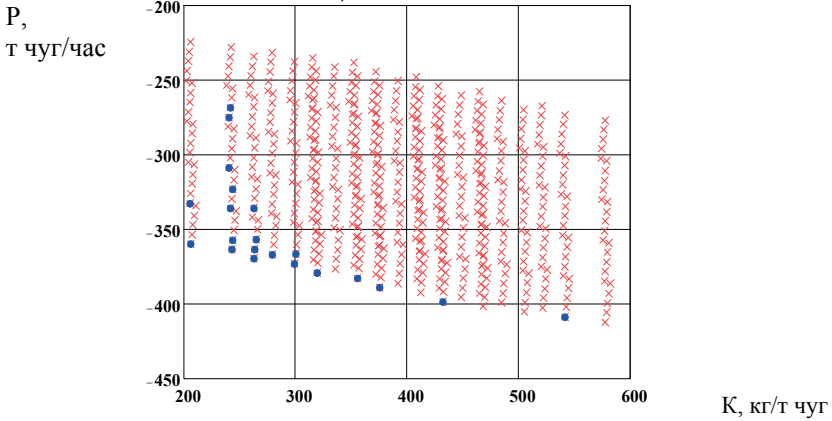


Рис.5. Компромиссные решения в области поиска «расход кокса - производительность»

Множество точек решений в области поиска К–Т а также область компромиссных решений (точки огибающие множество) представлена на рис.6.

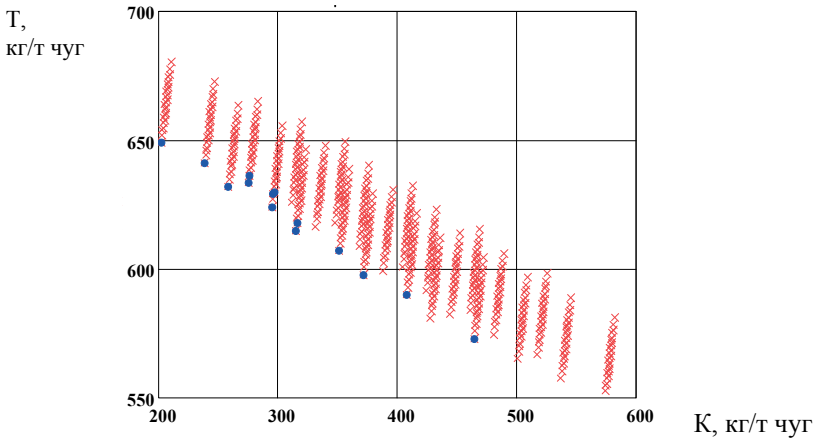


Рис.6. Компромиссные решения в области поиска «расход кокса – расход условного топлива»

Множество точек решений в области поиска P–T а также область компромиссных решений (точки огибающие множество) представлена на рис.7.

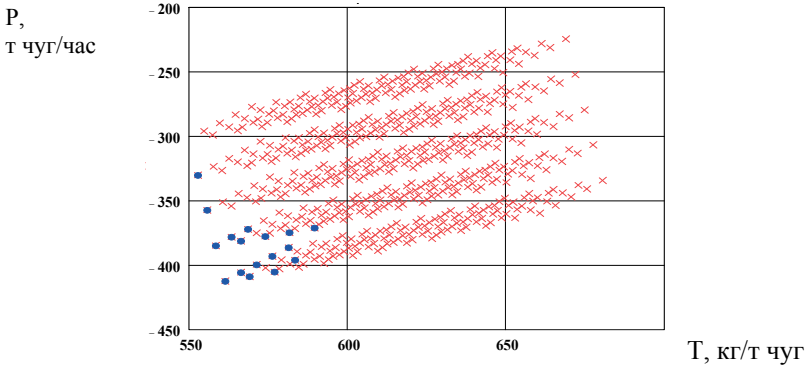


Рис.7. Компромиссные решения в области поиска «расход усл. топлива - производительность»

По результатам решения оптимизационных задач по двум показателям эффективности были проанализированы рациональные параметры и состав дутья (таблица):

- компромиссным вариантом для достижения максимального объема производства и минимального расхода кокса является увеличение температуры дутья и концентрации кислорода в нем, совместное использование ПУТ и природного газа;
- компромиссным вариантом для достижения максимального объема производства и минимального расхода условного топлива является увеличение температуры дутья и концентрации кислорода в нем, минимальное использование ПУТ и природного газа;
- компромиссным вариантом для достижения минимального расхода кокса и условного топлива является увеличение температуры дутья, уменьшение до минимума концентрации кислорода в нем, совместное использование ПУТ и природного газа.

Таблица. Результаты сравнительного анализа задачи векторной оптимизации в области двух параметров

Варианты задачи векторной оптимизации относительно ведущей функции	Характер изменения параметров дутья				
	Тд, °С	О ₂ , %	m	n	
К	Р	max (1200)	max (31)	max (0,36)	max (0,4)
	Т	max (1200)	min (21)	max (0,36)	max (0,4)
Р	К	max (1200)	max (31)	max (0,36)	max (0,4)
	Т	max (1200)	max (31)	min (0)	min (0)
Т	К	max (1200)	min (21)	max (0,36)	max (0,4)
	Р	max (1200)	max (31)	min (0)	min (0)

Полученные результаты свидетельствуют о взаимном контроле решений в разных постановках задач, а также совпадений основных тенденций по потреблению энергоресурсов:

Информационное поле, полученное в результате решения задач векторной оптимизации, может быть полезным в условиях изменения требований по производству. То есть, имеется возможность оперативно спрогнозировать технологический режим и перспективные параметры дутья, определить диапазон ожидаемых значения целевых функций по производительности, расходу кокса и условного топлива.

Основные выводы по результатам исследования

1. Разработан и предложен алгоритм решения задачи векторной оптимизации, расширяющий информационно–аналитическую базу принятия научно-обоснованных решений по ведению доменной плавки в условиях наличия нескольких показателей оптимизации, имеющих противоречивый характер, и достижения рационального режима процесса плавки путем изменения параметров и состава дутья.

2. Показано, что полученное множество тепловых режимов не являются оптимальными в классической постановке оптимизационной задачи по одному параметру (показателю), а представляет собой компромисс между рассматриваемыми функциями.

3. С использованием методологии теории векторной оптимизации разработан метод поиска компромиссных решений рациональных режимов доменной плавки, определено пространство области компромиссов, позволяющее оценить при текущих затратах на производство какие потери имеет система при переходе в одну из точек компромиссных решений.

4. Установлена динамика взаимного влияния вариантов конкурирующих решений в задаче векторной оптимизации по двум показателям оптимизации, а также диапазон их изменения:

5. Установлено, что совместное применение ПУТ и природного газа является компромиссным вариантом: для достижения максимального объема производства и минимального расхода кокса; для достижения минимального расхода кокса и условного топлива.

6. Использование алгоритма решения задачи векторной оптимизации в составе АСУ ТП позволит дополнить информационно–управляющую систему производственного процесса формализованными методами поддержки выбора управляющих решений по изменению параметров и состава дутья при наличии двух и более показателей оптимальности.

1. Кини Р.Л., Райфа Х. Принятие решений при многих критериях: предпочтения и замещения. – М: Радио и связь, 1981. – 560 с.
2. Товаровский И.Г. Совершенствование и оптимизация параметров доменного процесса/ И.Г. Товаровский. М.: Металлургия, 1987. – 192с.
3. Доменное производство «Криворожстали». / В.И.Большаков, А.В.Бородулин,

- Н.А.Гладков и др. – Кривой Рог: Издательство СП «Мира», 2004г. –376 с.
4. *Високотемпературні теплотехнічні процеси та установки в металургії*. Навч. Посіб. / М.П.Ревун, Б.Б.Потапов, В.М.Ольшанський, О.В.Бородулін. – Запоріжжя: ЗДІА, 2002. – 438с.
 5. *Периодические процессы при продувании слоя дисперсных материалов*. / Н.Н.Сажнев, Е.В.Торопов, М.А.Стефанович, Н.И.Иванов. // Проблемы автоматизированного управления доменным производством. – Киев: Наукова думка, 1974. – С.124-126.
 6. *Системный подход к процессам в фурменной зоны доменной печи: становление и развитие*. / Ю.А.Абраменков, А.Г.Байбуз, А.В.Бородулин, А.Л.Чайка, Г.Т.Цыганков // Металлургическая теплотехника. Национальная металлургическая Академия Украины. Сб. научных трудов. – Т.3. Днепропетровск, 2000. – С.3 – 20.
 7. *Теория выбора и принятия решений*. / И.М.Макаров, Т.М.Винорадов, А.А.Рубинский, В.Б.Соколов. – М.: Наука, 1982. – 327с.
 8. *В.Д. Ногин*. Принятие решений в многокритериальной среде: количественный подход. – М.: Физмат, 2002. – 144с.
 9. *Кини Р.Л., Райфа Х.* Принятие решений при многих критериях: предпочтения и замещения: Пер. С англ. / Под ред.. И.Ф. Шахнова. – М.: Радио и связь, 1981. – 560 с.
 10. *А.А. Босов, Г.Н. Кодола*. Векторная оптимизация по двум показателям. // Вісник ДНУЗТ. – №17. – 2007.

*Статья рекомендована к печати
канд.техн.наук Н.М.Можаренко*

О.І.Швачка, О.Л. Чайка, В.Г.Зайцев

Розвиток інформаційно-аналітичної бази прийняття рішень з управління веденням доменної плавки

Метою роботи є розвиток інформаційно–аналітичної бази прийняття науково обґрунтованих рішень з управління веденням доменної плавки з використанням методів векторної оптимізації. Показано, що на відміну від раніше прийнятих, даний метод дозволяє одержати простір конкуруючих рішень, що є оптимальними в тому чи іншому відношенні. Представлено результати виконаних досліджень з пошуку компромісних рішень у просторі «витрата коксу – продуктивність – витрата умовного палива».