

УДК 669.168

**ОПТИМИЗАЦИЯ СОСТАВА МНОГОКОМПОНЕНТНОЙ ШИХТЫ
КАРБОТЕРМИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ПРОИЗВОДСТВА ФЕРРОСПЛАВОВ**© 2019 г. *А. В. Жданов^{а,*}, А. С. Михайликов^а, В. А. Павлов^а, В. Ф. Мысик^а**^аИнститут материаловедения и металлургии Уральского федерального университета
им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия***e-mail: avzhd@mail.ru*

Поступила в редакцию 28.03.2018 г.

После доработки 05.04.2018 г.

Принята к публикации 03.08.2018 г.

В работе представлена постановка задачи стоимостной оптимизации многокомпонентной шихты при известных процентном содержании и степени перехода в сплав элементов шихты, дополненная возможностью использования компонентов с фиксированной долей. Дано краткое описание компьютерной программы, реализующей разработанный алгоритм.

Ключевые слова: ферросплавы, углеродистый ферромарганец, шихта, компоненты, оптимизация, стоимость, алгоритм, программа.

DOI: 10.1134/S0235010619050128

ВВЕДЕНИЕ

В связи с тем, что на практике дефицит одних шихтовых материалов часто сопровождается избытком других, задача стоимостной оптимизации становится вторичной. На первый план выдвигается проблема шихтовки в первую очередь недефицитными компонентами, и уже во вторую очередь оптимизации шихтовки по ее стоимости с использованием дефицитных материалов. Поэтому в настоящей работе стоимостная оптимизация дополнена возможностью использования компонентов с фиксированной долей в шихте.

В настоящее время в мире имеется ряд разработанных вариантов решения проблем оптимизации шихты ферросплавного производства [1–7], а последние работы [4, 7, 8] подтверждают актуальность данного направления. В связи с тем, что различные варианты решения данной задачи предлагаются как ведущими учеными в области ферросплавного производства, включающие условия нечеткого задания исходных данных [2, 6, 8], так и специалистами в смежных областях [3–5], нами в данной статье предпринята попытка предложить одно из решений с учетом опубликованных альтернативных вариантов.

Современные условия конкурентной борьбы ферросплавных предприятий требуют постоянного совершенствования и оптимизации режимов работы ферросплавных печей [9–11], в том числе, за счет применения техногенного сырья ферросплавного производства [12, 13], а также вовлечения в производство относительно дешевых, но бедных отечественных руд [14–16] и выплавки нестандартных ферросплавов, в том числе с несколькими ведущими элементами [16, 17].

Нами предложен алгоритм, позволяющий свести решение задачи поиска стоимостного оптимума многокомпонентной шихты к задаче линейного программирования симплекс-методом.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассматриваем задачу оптимизации состава многокомпонентной шихты по критерию ее минимальной стоимости при ограничениях, обусловленных химическим составом получаемого сплава.

Целевую функцию Z записываем в виде

$$Z = \sum_{i=1}^p C_i x_i \rightarrow \min, \tag{1}$$

где i – индекс шихтового материала; p – количество компонентов шихты; C_i – цена i -ого компонента шихты, условные единицы; x_i – доля i -ого компонента шихты в общей массе шихты.

Чтобы выразить ограничения через доли компонентов в шихте, воспользуемся балансовым уравнением j -ого элемента. При этом принимаем, что процентное содержание и степень перехода в сплав элементов шихты известны.

Количество j -ого элемента, перешедшего из шихты в сплав, равно

$$m_j = \frac{m_{ш}}{100} \sum_{i=1}^p \langle j \rangle_i \eta_{ij} x_i, \tag{2}$$

где j – индекс элемента; m_j – масса j -ого элемента, перешедшего в сплав, кг; $m_{ш}$ – масса шихты, кг; $\langle j \rangle_i$ – содержание j -ого элемента в i -ом компоненте шихты, мас. %; η_{ij} – степень перехода в сплав j -ого элемента из i -ого компонента шихты, доли.

Масса j -ого элемента в сплаве, перешедшего из шихты, равна

$$m_j = \frac{[j]}{100} m_{Ме}, \tag{3}$$

где $m_{Ме}$ – масса сплава, получаемая из $m_{ш}$; $[j]$ – процентное содержание j -ого компонента в сплаве.

Таким образом, уравнение баланса j -ого элемента принимает вид

$$\frac{m_{ш}}{100} \sum_{i=1}^p \langle j \rangle_i \eta_{ij} x_i = \frac{[j]}{100} m_{Ме}. \tag{4}$$

Сплав формируется за счет элементов шихты и дополнительного перехода элементов, например: из золы кокса, электродной массы, электродного кожуха, – который суммарно учитываем в массовых процентах к конечному количеству сплава P . Тогда масса сплава равна:

$$m_{Ме} = \left(\sum_{i=1}^p x_i \sum_{j=1}^n \frac{\langle j \rangle_i \eta_{ij}}{100} \right) m_{ш} + m_{доп} = \left(\sum_{i=1}^p x_i \sum_{j=1}^n \frac{\langle j \rangle_i \eta_{ij}}{100} \right) m_{ш} + \frac{P}{100} m_{Ме}. \tag{5}$$

Или

$$m_{Ме} = \left(\sum_{i=1}^p x_i \sum_{j=1}^n \frac{\langle j \rangle_i \eta_{ij}}{100 - P} \right) m_{ш}, \tag{6}$$

где n – количество рассматриваемых элементов шихты.

Подстановка m_{Me} из (6) в уравнение (4) дает

$$\frac{m_{ш}}{100} \sum_{i=1}^p \langle j \rangle_i \eta_{ij} x_i = \frac{[j]}{100} \left(\sum_{i=1}^p x_i \sum_{j=1}^n \frac{\langle j \rangle_i \eta_{ij}}{100 - P} \right) m_{ш}. \quad (7)$$

Откуда имеем

$$[j] = \frac{\sum_{i=1}^p \langle j \rangle_i \eta_{ij} x_i}{\sum_{i=1}^p x_i \sum_{j=1}^n \frac{\langle j \rangle_i \eta_{ij}}{100 - P}} = \frac{\sum_{i=1}^p \langle j \rangle_i \eta_{ij} x_i}{\sum_{i=1}^p x_i k_i}, \quad (8)$$

где

$$k_i = \sum_{j=1}^n \frac{\langle j \rangle_i \eta_{ij}}{100 - P}. \quad (9)$$

Перепишем (8) в виде:

$$[j] = \sum_{i=1}^p \frac{\langle j \rangle_i \eta_{ij} x_i k_i}{k_i \sum_{i=1}^p x_i k_i} = \sum_{i=1}^p a_{ij} z_i, \quad (10)$$

где

$$z_i = \frac{x_i k_i}{\sum_{i=1}^p x_i k_i}, \quad (11)$$

$$a_{ij} = \frac{\langle j \rangle_i \eta_{ij}}{k_i}. \quad (12)$$

Ограничения принимают вид:

$$\sum_{i=1}^p a_{ij} z_i \geq [j]_{\text{нип}}, \quad j = \overline{1, n}; \quad \sum_{i=1}^p a_{ij} z_i \leq [j]_{\text{вп}}, \quad j = \overline{1, n}; \quad \sum_{i=1}^p z_i = 1, \quad (13)$$

где $[j]_{\text{нип}}$ и $[j]_{\text{вп}}$ — соответственно нижний и верхний пределы содержания j -ого компонента в сплаве.

Выразим долю i -ого компонента шихты x_i через значение введенной в (11) переменной z . Из (11) получаем систему уравнений

$$\begin{cases} \frac{x_1 k_1}{z_1} = \frac{x_2 k_2}{z_2} = \frac{x_3 k_3}{z_3} = \dots = \frac{x_p k_p}{z_p} \\ \sum_{i=1}^p x_i = 1 \end{cases}, \quad (14)$$

аналитическим решением которой является

$$x_i = \frac{z_i}{k_i \sum_{i=1}^p \frac{z_i}{k_i}}. \tag{15}$$

Тогда целевая функция стоимости, выраженная через переменную z_i , принимает вид дробно-линейной функции:

$$Z = \sum_{i=1}^p C_i x_i = \sum_{i=1}^p C_i \frac{z_i}{k_i \sum_{i=1}^p \frac{z_i}{k_i}} = \frac{\sum_{i=1}^p C_i \frac{z_i}{k_i}}{\sum_{i=1}^p \frac{z_i}{k_i}} \rightarrow \min. \tag{16}$$

Как известно, задачу дробно-линейного программирования можно свести к задаче линейного программирования вводом новой переменной, в нашем случае равной

$$y_o = \frac{1}{\sum_{i=1}^p \frac{z_i}{k_i}}. \tag{17}$$

Исходная задача преобразуется к виду

$$Z = \sum_{i=1}^p \frac{C_i}{k_i} y_i \rightarrow \min. \tag{18}$$

При ограничениях

$$\sum_{i=1}^p a_{ij} y_i - [j]_{\text{нп}} y_o \geq 0, \quad j = \overline{1, n}, \quad \sum_{i=1}^p a_{ij} y_i - [j]_{\text{вп}} y_o \leq 0, \quad j = \overline{1, n}, \tag{19}$$

$$\sum_{i=1}^p \frac{1}{k_i} y_i = 1, \quad \sum_{i=1}^p y_i - y_o = 0,$$

где

$$y_i = y_o z_i. \tag{20}$$

Первое из последних двух равенств в (19) вытекает из (17), второе – из равенства единице суммы z_i .

После решения (18), (19) определение искомых величин долей компонентов шихты x_i производим, используя (20) и далее (15).

Интересующее технологов массовое количество компонентов шихты на 1000 кг сплава m_i^{1000} получаем из (6) с учетом (9), равным

$$m_i^{1000} = x_i m_{\text{ш}}^{1000} = 1000 \frac{x_i}{\sum_{i=1}^p k_i x_i}. \tag{21}$$

Представляет интерес задача стоимостной оптимизации при фиксированной доле отдельных компонентов шихты. В этом случае ограничения (19) преобразуются к виду

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^p a_{ij} y_i - \left([j]_{\text{нп}} - \sum_{i=p+1}^{p+r} a_{ij} \zeta_l \right) y_0 &\geq 0, \quad j = \overline{1, n}; \quad l = i - p, \\ \sum_{i=1}^p a_{ij} y_i - \left([j]_{\text{вп}} - \sum_{l=1}^r a_{ij} \zeta_l \right) y_0 &\leq 0, \quad j = \overline{1, n}; \quad l = i - p, \\ \sum_{i=1}^p \frac{1}{k_i} y_i = 1, \quad \sum_{i=1}^p y_i - \left(1 - \sum_{l=1}^r \zeta_l \right) y_0 &= 0, \end{aligned} \quad (22)$$

где r, ζ, l – соответственно количество компонентов шихты, аналог z из (11) для компонента и индекс материала с фиксированной долей в шихте.

Выражаем задаваемую фиксированную долю q_l из (15):

$$q_l = \frac{\zeta_l}{k_l \left(\sum_{i=1}^p \frac{z_i}{k_i} + \sum_{i=p+1}^{p+r} \frac{\zeta_l}{k_i} \right)}, \quad l = i - p; \quad l = \overline{1, r}. \quad (23)$$

Таким образом, задача нахождения стоимостного минимума при фиксированных долях отдельных компонентов шихты сводится к совместному решению системы уравнений (23) и модели линейного программирования (18), (22).

Система уравнений (23) может быть сведена к одному уравнению. В самом деле, из (23) можно получить

$$\zeta_l = \frac{q_l k_{l+p}}{q_s k_{s+p}} \zeta_s, \quad l = \overline{1, r}, \quad (24)$$

где s – индекс какого-то выбранного фиксированного компонента шихты.

Тогда правую сумму знаменателя (23) можно записать в виде

$$\sum_{i=p+1}^{p+r} \frac{\zeta_l}{k_i} = \frac{\zeta_s}{q_s k_{s+p}} \sum_{l=1}^r q_l, \quad l = i - p. \quad (25)$$

Подстановка в (23) дает

$$q_s = \frac{\zeta_s}{k_{s+p} \left(\sum_{i=1}^p \frac{z_i}{k_i} + \frac{\zeta_s}{q_s k_{s+p}} \sum_{l=1}^r q_l \right)}. \quad (26)$$

Откуда получаем новое ограничение модели линейного программирования:

$$\sum_{i=1}^p \frac{z_i}{k_i} - \frac{\zeta_s}{q_s k_{s+p}} \left(1 - \sum_{l=1}^r q_l \right) = 0. \quad (27)$$

Тогда окончательно ограничения (22) задачи принимают вид:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^p a_{ij}y_i - \left([j]_{\text{нп}} - C_s \sum_{i=p+1}^{p+r} a_{ij}q_l k_i \right) y_o &\geq 0, \quad j = \overline{1, n}, \quad l = i - p, \\ \sum_{i=1}^p a_{ij}y_i - \left([j]_{\text{вп}} - C_s \sum_{i=p+1}^{p+r} a_{ij}q_l k_i \right) y_o &\leq 0, \quad j = \overline{1, n}, \quad l = i - p, \\ \sum_{i=1}^p \frac{1}{k_i} y_i = 1, \quad \sum_{i=1}^p y_i - \left(1 - C_s \sum_{l=1}^r q_l k_{l+p} \right) y_o = 0, \quad \sum_{i=1}^p \frac{1}{k_i} y_i - C_s \left(1 - \sum_{l=1}^r q_l \right) y_o = 0, \end{aligned} \tag{28}$$

где

$$C_s = \frac{\zeta_s}{q_s k_{s+p}}. \tag{29}$$

Анализ (28) показывает, что в последнем равенстве с учетом третьего равенства с конца первое слагаемое можно приравнять единице. Тогда (28) принимает вид:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^p a_{ij}y_i - \left([j]_{\text{нп}} - C_s \sum_{i=p+1}^{p+r} a_{ij}q_l k_i \right) y_o &\geq 0, \quad j = \overline{1, n}, \quad l = i - p, \\ \sum_{i=1}^p a_{ij}y_i - \left([j]_{\text{вп}} - C_s \sum_{i=p+1}^{p+r} a_{ij}q_l k_i \right) y_o &\leq 0, \quad j = \overline{1, n}, \quad l = i - p, \\ \sum_{i=1}^p \frac{1}{k_i} y_i = 1, \quad \sum_{i=1}^p y_i - \left(1 - C_s \sum_{l=1}^r q_l k_{l+p} \right) y_o = 0, \quad C_s \left(1 - \sum_{l=1}^r q_l \right) y_o = R, \end{aligned} \tag{30}$$

где $R = 0$ при $C_s = 0$ и $R = 1$ при $C_s \neq 0$.

Из ограничений (30) можно видеть, что целевая функция зависит не только от y_i , но и от значения C_s .

Для представленной задачи разработаны алгоритм решения и компьютерная программа. В частности, для решения задачи линейного программирования (18), (30) в программе реализован двухстадийный симплекс-метод. Последовательность решения следующая. Увеличивая значение C_s от нуля до значения, полученного из (29) при $\zeta_s = 1$, находим сначала нижнюю границу существования решения, а затем верхнюю. Уточняем каждую границу методом половинного деления, а далее находим в этом диапазоне минимум целевой функции, как функции одного переменного C_s , методом дихотомического поиска.

РАБОТА ПРОГРАММЫ

Начальным этапом использования программы является создание таблицы определенной структуры с исходной информацией о рассматриваемых компонентах шихты с указанием содержания и степени перехода в сплав элементов шихты. Количество компонентов шихты и ее элементов не ограничено. Перед расчетом пользователь производит выбор рассматриваемых компонентов шихты, указывая, если требуется, долю компонентов с фиксированной долей. В случае пустого пространства допустимых решений выдается сообщение о неравенстве, которое вызывает несовместность ограничений.

При отсутствии решения и наличии компонентов с фиксированной долей в программе предусмотрена коррекция фиксированной доли как отдельного компонента, так и фиксированных долей совокупности компонентов по задаваемому пользователем

Оформление исходной информации программы оптимизации состава многокомпонентной шихты

Исходная информация											
включить компонент в шихту	компонент шихты	P		Mn		Si		Fe		стоимость, усл. ед.	фиксированная доля компонента шихты
		мас. %	η								
Нет	МФШ	0.017	0.9	40.5	0.8	13.8	0.4	0.2	0.95	236.6	—
Нет	АМнВ-2	0.220	0.9	39.8	0.8	11.4	0.4	2.6	0.95	144.0	—
Да	Кварцит	0.0004	0.9	0.0	0.8	44.3	0.4	0.0	0.95	21.1	—
Нет	АМнВ-1	0.220	0.9	47.4	0.8	9.3	0.4	2.3	0.95	146.0	—
Нет	БАФ	0.190	0.9	42.4	0.8	12.5	0.4	1.6	0.95	149.5	—
Да	АМнШ	0.100	0.9	38.0	0.8	13.0	0.4	2.5	0.95	143.6	0.2
Да	Мп-концентрат	0.060	0.9	47.5	0.8	2.0	0.4	6.5	0.95	35.0	—
Да	Отходы	0.400	0.9	28.0	0.8	10.1	0.4	1.5	0.95	2.0	—
Нет	Fe-ока-тыши	0.100	0.9	0.5	0.8	2.3	0.4	48.4	0.95	70.0	—

Содержание в сплаве							
Н. предел	В. предел	Н. предел	В. предел	Н. предел	В. предел	Н. предел	В. предел
0.05	0.7	65	75	17	21	0	100

Дополнительный переход элементов в сплав, мас. %			
C	Ca	Al	Fe
1.5	0.3	0.5	2.7

лем соотношению между ними. Максимально возможное количество данного компонента в первом случае и компонентов, обусловленное заданным их соотношением во втором случае, при которых задача получает область допустимых значений, находим методом половинного деления.

Исходная информация оформляется на рабочем листе книги MS Excel в виде таблиц определенной структуры (табл. 1). Первая колонка таблицы “Исходная информация” указывает на включение в рассмотрение соответствующего компонента шихты, стоящего справа во второй колонке. Далее следуют колонки с химическими элементами, для каждого из которых указывается процентное содержание в шихте и степень извлечения. Количество рассматриваемых элементов произвольно.

Таблица 2

Расчетная шихтовка и прогнозируемый состав сплава

	Доля в шихте	Масса на 1000 кг сплава, кг
Кварцит	0.22645	734.512
Мп-концентрат	0.20482	664.354
Отходы	0.56874	1844.791

Прогнозируемый состав сплава, мас. %

P	Mn	Si	Fe	C	Ca	Al
0.700	66.569	21.000	9.431	1.500	0.300	0.500

Предпоследняя колонка показывает стоимость компонента шихты в условных единицах, и последняя – желаемую долю компонента в шихте. Последующие таблицы располагаются через строку от предыдущей.

Следующая таблица показывает диапазон содержания в сплаве соответствующего элемента, указанного в таблице “Исходная информация”.

Последняя таблица показывает дополнительный переход элементов в сплав. Важно соблюсти при оформлении таблиц указанные требования, чтобы исходная информация задачи была считана корректно. Рассмотрим пример расчета оптимального состава шихты для выплавки силикомарганца (ГОСТ 4756-77 изм. от 1.01.90).

Пусть набор компонентов шихты соответствует таблице “Исходная информация” (табл. 1) то есть, составляющие шихты – это Мп-концентрат, отходы и кварцит. Запуская программу на счет, получаем результат в следующем виде (табл. 2).

Второй вариант использования программы может быть полезен, когда в составе шихты необходимо зафиксировать наличие того или иного компонента. В этом случае в последней колонке таблицы “Исходная информация” указывается требуемая доля данного компонента в шихте (табл. 3).

Соответственное решение имеет вид (табл. 4).

Для случая, когда при заданных начальных условиях решение задачи оптимизации отсутствует, предусмотрена его корректировка за счет отдельных компонентов шихты и всех фиксированных компонентов, с изменением последних в пропорции задаваемой пользователем программы. Например, решение не существует, если в условии последней задачи потребовать заданную долю отходов, равной 0.6. После корректировки доли отходов в шихте получаем результат (табл. 5).

Возможность оперативного расчета состава шихты для ряда граничных условий, соответствующих реальным задачам оптимизации в промышленности, позволяет существенно ускорить процесс принятия решений и повысить эффективность работы технологов предприятия. Данный метод позволяет учесть необходимость использования отдельного материала, имеющегося на складе; вовлечение техногенного сырья, содер-

Таблица 3

Исходная информация для варианта расчета с фиксированным количеством некоторых компонентов шихты

Исходная информация											
включить компонент в шихту	компонент шихты	P		Mn		Si		Fe		стоимость, усл. ед.	фиксированная доля компонента шихты
		мас. %	η	мас. %	η	мас. %	η	% мас.	η		
Нет	МФШ	0.017	0.9	40.5	0.8	13.8	0.4	0.2	0.95	236.6	—
Да	АМнВ-2	0.220	0.9	39.8	0.8	11.4	0.4	2.6	0.95	144.0	—
Да	Кварцит	0.0004	0.9	0.0	0.8	44.3	0.4	0.0	0.95	21.1	—
Нет	АМнВ-1	0.220	0.9	47.4	0.8	9.3	0.4	2.3	0.95	146.0	—
Нет	БАФ	0.190	0.9	42.4	0.8	12.5	0.4	1.6	0.95	149.5	—
Да	АМнШ	0.100	0.9	38.0	0.8	13.0	0.4	2.5	0.95	143.6	0.2
Да	Мп-концентрат	0.060	0.9	47.5	0.8	2.0	0.4	6.5	0.95	35.0	0.1
Да	Отходы	0.400	0.9	28.0	0.8	10.1	0.4	1.5	0.95	2.0	0.3
Нет	Fe-ока-тыши	0.100	0.9	0.5	0.8	2.3	0.4	48.4	0.95	70.0	—
Содержание в сплаве											
Н.предел	В.предел	Н.предел		В.предел		Н.предел		В.предел		Н.предел	В.предел
0.05	0.7	65		75		17		21		0	100
Дополнительный переход элементов в сплав, масс. %											
C		Ca				Al		Fe			
1.5		0.3				0.5		2.7			

Таблица 4

Результат расчета варианта с фиксированным количеством некоторых компонентов шихты

		Доля в шихте				Масса на 1000 кг сплава, кг	
АМнВ-2		0.26315				750.966	
Кварцит		0.13685				390.551	
АМнШ		0.20000				570.758	
Мп-концентрат		0.10000				285.379	
Отходы		0.30000				856.137	
Прогнозируемый состав сплава, мас. %							
P	Mn	Si	Fe	C	Ca	Al	
0.524	71.284	17.000	8.893	1.500	0.300	0.500	

Таблица 5

Результат корректировки расчета при начальной заданной доле отходов в шихте, равной 0.6

	Доля в шихте		Масса на 1000 кг сплава, кг			
АМнВ-2	0.00000		0.000			
Кварцит	0.14549		455.491			
АМнШ	0.20000		626.133			
Мп-концентрат	0.10000		313.066			
Отходы	0.55451		1735.975			
Прогнозируемый состав сплава, мас. %						
P	Mn	Si	Fe	C	Ca	Al
0.697	69.817	18.591	8.594	1.500	0.300	0.500

жащего значительное количество вредных примесей; подбор соотношения материалов для получения сплава заданного состава и ряд других.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жолобов Д.А. Введение в математическое программирование Учеб. пособие. М.: МИФИ, 2008.
2. Гасик М.И., Гладких В.А., Михалев А.И., Дедов Ю.Б., Лысенко В.Ф., Лысая Н.В., Лях Д.А. Оптимизация состава многокомпонентной шихты углеродовосстановительной плавки ферросплавов // *Электротехнология*. 1999. № 3. С. 35–40.
3. Хазан Г.Л. Поиск компромиссов при расчете оптимальной многокомпонентной шихты для металлургического расплава // *Расплавы*. 1994. № 1. С. 67–72.
4. Хазан Г.Л., Лисиенко В.Г., Бабенко А.Г., Бажин В.Ю. Альтернативные методы диагностики многофакторного процесса // *Расплавы*. 2006. № 4. С. 77–81.
5. Хазан Г.Л., Кузнецов И.А. Идентификация многомерных объектов металлургического эксперимента // *Расплавы*. 2015. № 3. С. 85–96.
6. Михалев А.И., Гладких В.А., Лысая Н.В., Лысенко В.Ф. Оптимизация состава многокомпонентной шихты при выплавке ферросплавов в условиях нечеткого задания исходных данных // *Современные проблемы электротехнологии*. Сб. тр., Современные энерго- и ресурсосберегающие технологии и методы в электротехнологии ферросплавов. Днепропетровск: Системные технологии. 2003. 6. С. 183–185.
7. Михалев А.И., Лысая Н.В., Лысый Д.А., Гладких В.А., Лысенко В.Ф. Оптимизация параметров процессов ферросплавного производства с использованием методов нечеткого вывода. Днепропетровск: Системные технологии. 2008.
8. Jipnang E., Monheim P., Oterdoom H. Process optimization model for FeMn and SiMn production // *Proceedings of INFACON XIII. The Thirteenth International Ferro Alloy Congress. Efficient technologies in ferroalloy industry*. Almaty. 2013. 2. P. 811–819.
9. Гаврилов В.А., Поляков И.И., Поляков О.И. Оптимизация режимов работы ферросплавных печей. М.: Металлургия, 1996.
10. Gasik M. M. *Handbook of Ferroalloys: Theory and Technology*. The Boulevard. Landford Lane, Kidlington, Oxford, OX5 1Gb 225 Wyman Street, Wallingham, MA02451, USA, 2013.
11. Olsen S.E., Tangstad M., Linstad T. *Production of manganese ferroalloys // SINTEF and Tapir Scademic Press, Trondheim, 2007.*

12. Shen R., Zhang G., Dell'Amico M., Brown P., Ostrovski O. A feasibility study of recycling of manganese furnace dust // Proceedings of The XI International Ferroalloys Congress. Innovations in Ferro Alloy Industry. 2007. P. 507–519.

13. Zhdanov A.V., Zhuchkov V.I., Dashevskii V.Ya., Leont'ev L.I. // Steel in Translation, 2014. 44. № 3. P. 236–242.
<https://doi.org/10.3103/S0967091214030206>

14. Dashevskiy V.Ya., Zhuchkov V.I., Zhdanov A.V., Leontyev L.I. Manganese ferroalloys production from Russian manganese ores // Proceedings of INFACON XIV – The XIV International Ferro Alloy Congress. Energy efficiency and environmental friendliness are the future of the global Ferro-alloy industry. Kiev. 2015. 1. P. 73–80.

15. Чернобровин В.П., Мизин В.Г., Сирина Т.П., Дашевский В.Я. Комплексная переработка карбонатного марганцевого сырья: химия и технология: монография. Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2009.

16. Жучков В.И., Смирнов Л.А., Зайко В.П., Воронов Ю.И. Технология марганцевых ферросплавов. Ч.1. Высокоуглеродистый ферромарганец. Екатеринбург: УрО РАН, 2007.

17. Друинский М.И., Жучков В.И. Получение комплексных ферросплавов из минерального сырья Казахстана. Алма-Ата: Наука, 1988.

Optimization of the Composition of a Multicomponent Charge of the Carbothermic Process of Production of Ferroalloy

A. V. Zhdanov¹, A. S. Mikhaylikov¹, V. A. Pavlov¹, V. F. Mysik¹

¹Institute of Materials Science and Metallurgy of the Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia

A solution of price optimization of multicomponent charge mixture for ferroalloy production is presented in the article. Optimization includes such options as extraction values of elements and fixed consumption coefficients for one or several charge components. A brief description of a program and an algorithm are given.

Keywords: ferroalloys, high-carbon ferromanganese, charge mixture, components, optimization, price, algorithm, program

REFERENCES

1. Zholobov D.A. Vvedeniye v matematicheskoye programmirovaniye Ucheb. posobiye [Introduction to Mathematical Programming Textbook. Allowance]. M.: MIFI, 2008. (in Russian).

2. Gasik M.I., Gladkikh V.A., Mikhalev A.I., Dedov Yu.B., Lysenko V.F., Lysaya N.V., Lyakh D.A. Optimizatsiya sostava mnogokomponentnoy shikhty uglerodovosstanovitel'noy plavki ferrosplavov [Optimization of the composition of a multicomponent mixture of carbon-reducing melting of ferroalloys] // Elektrometallurgiya. 1999. № 3. P. 35–40. (in Russian).

3. Khazan G.L. Poisk kompromissov pri raschete optimal'noy mnogokomponentnoy shikhty dlya metallurgicheskogo raspava [The search for compromises in the calculation of the optimal multicomponent charge for a metallurgical melt] // Rasplavy. 1994. № 1. P. 67–72. (in Russian).

4. Khazan G.L., Lisiyenko V.G., Babenko A.G., Bazhin V.Yu. Al'ternativnyye metody diagnostiki mnogofaktornogo protsessa [Alternative methods for diagnosing a multifactor process] // Rasplavy. 2006. № 4. P. 77–81. (in Russian).

5. Khazan G.L., Kuznetsov I.A. Identifikatsiya mnogomernykh ob'yektov metallurgicheskogo eksperimenta [Identification of multidimensional objects of a metallurgical experiment] // Rasplavy. 2015. № 3. P. 85–96. (in Russian).

6. Mikhalev A.I., Gladkikh V.A., Lysaya N.V., Lysenko V.F. Optimizatsiya sostava mnogokomponentnoy shikhty pri vyplavke ferrosplavov v usloviyakh nechetkogo zadaniya iskhodnykh dannykh [Optimization of the composition of a multicomponent mixture in the smelting of ferroalloys under conditions of fuzzy assignment of source data] // Sovremennyye problemy elektrometallurgii. Sb. tr., Sovremennyye energo- i resursosberegayushchiye tekhnologii i metody v elektrometallurgii ferrosplavov. Dnepropetrovsk: Sistemnyye tekhnologii. 2003. 6. P. 183–185. (in Russian).

7. Mikhalev A.I., Lysaya N.V., Lysyy D.A., Gladkikh V.A., Lysenko V.F. Optimizatsiya parametrov protsessov ferrosplavnogo proizvodstva s ispol'zovaniyem metodov nechetkogo vyvoda [Optimization of parameters of ferroalloy production processes using fuzzy inference methods]. Dnepropetrovsk: Sistemnyye tekhnologii. 2008. (in Russian).

8. Jipnang E., Monheim P., Oterdoom H. Process optimization model for FeMn and SiMn production // Proceedings of INFACON XIII. The Thirteenth International Ferro Alloy Congress. Efficient technologies in ferroalloy industry. Almaty. 2013. 2. P. 811–819.

9. Gavrilov V.A., Polyakov I.I., Polyakov O.I. Optimizatsiya rezhimov raboty ferrosplavnykh pechey [Optimization of operating modes of ferroalloy furnaces]. M.: Metallurgiya, 1996. (in Russian).

10. Gasik M.M. Handbook of Ferroalloys: Theory and Technology. The Boulevard. Landford Lane, Kidlington, Oxford, OX5 1Gb 225 Wyman Street, Wallingford, MA02451, USA, 2013.

11. Olsen S.E., Tangstad M., Linstad T. Production of manganese ferroalloys // SINTEF and Tapir Scademic Press, Trondheim, 2007.

12. Shen R., Zhang G., Dell'Amico M., Brown P., Ostrovski O. A feasibility study of recycling of manganese furnace dust // Proceedings of The XI International Ferroalloys Congress. Innovations in Ferro Alloy Industry. 2007. P. 507–519.

13. Zhdanov A.V., Zhuchkov V.I., Dashevskii V.Ya., Leont'ev L.I. // Steel in Translation, 2014. 44. № 3. P. 236–242.

<https://doi.org/10.3103/S0967091214030206>

14. Dashevskiy V.Ya., Zhuchkov V.I., Zhdanov A.V., Leontyev L.I. Manganese ferroalloys production from Russian manganese ores // Proceedings of INFACON XIV – The XIV International Ferro Alloy Congress. Energy efficiency and environmental friendliness are the future of the global Ferro-alloy industry. Kiev. 2015. 1. P. 73–80.

15. Chernobrovin V.P., Mizin V.G., Sirina T.P., Dashevskiy V.Ya. Kompleksnaya pererabotka karbonatnogo margantsevoogo syr'ya: khimiya i tekhnologiya: monografiya [Complex processing of carbonate manganese raw materials: chemistry and technology: monograph] Chelyabinsk: Izdatel'skiy tsentr YuUrGU, 2009. (in Russian).

16. Zhuchkov V.I., Smirnov L.A., Zayko V.P., Voronov Yu.I. Tekhnologiya margantsevykh ferrosplavov. Ch. I. Vysokouglerodisty ferromanganets [Ravens Technology of manganese ferroalloys. Part I High carbon ferromanganese.]. Yekaterinburg: UrO RAN, 2007. (in Russian).

17. Druinskiy M.I., Zhuchkov V.I. Polucheniye kompleksnykh ferrosplavov iz mineral'nogo syr'ya Kazakhstana [Production of complex ferroalloys from mineral raw materials of Kazakhstan]. Almaty: Nauka, 1988. (in Russian).