

## ОБ ОДНОЙ МОДЕЛИ УПРАВЛЕНИЯ ДОМЕННЫМ ПРОЦЕССОМ

Х. Н. ГИЗАТУЛЛИН

(Свердловск)

Протекание доменного процесса в зависимости от значений отдельных параметров изучено достаточно полно. Первой попыткой системного подхода к доменному процессу следует считать «комплексный» метод расчета шихты доменной плавки и расхода горючего А. Н. Рамма [1]. Сущность этого метода заключается в том, что составляется система уравнений материального баланса, связывающих между собой различные характеристики шихты (выход чугуна, основность шлака, содержание марганца, отношение  $\text{SiO}_2$  к  $\text{Al}_2\text{O}_3$  в шлаке, относительный вес шлака), и уравнения теплового баланса. При этом относительный расход горючего вводится как неизвестная во все уравнения материального баланса, а относительный расход различных руд и флюса — в уравнение теплового баланса.

Указанную систему можно расширить путем составления уравнения по содержанию фосфора, серы и других компонентов в чугуне.

Замена некоторых уравнений А. Н. Рамма неравенствами увеличивает множество допустимых решений подбора шихты для доменной плавки. Для выбора оптимального решения из допустимого множества необходим показатель качества процесса — критерий оптимальности решения. Им является минимум затрат на единицу конечной продукции доменного процесса. Таким образом, «комплексный» метод расчета доменной плавки может быть модифицирован до оптимизационной модели управления доменным процессом.

Другая модель определения оптимальных параметров доменного процесса предложена в [2]. Она построена принципиально на другой основе. Основное отличие ее от модифицированной модели А. Н. Рамма заключается в следующем. Если в первой модели из единицы объема каждого компонента шихты (в том числе флюса и горючего) рассчитывается теоретический выход чугуна, расход тепла и другие необходимые характеристики (избыток или недостаток отдельных элементов чугуна и шлака), то во второй определяется шихта на 1 т чугуна из одного вида руды, флюса и горючего при заданной основности шлака. При этом затраты на тонну такого гипотетического чугуна находятся за вычетом стоимостей реализованной побочной продукции, а расходные коэффициенты (удельный расход руды, флюса и кокса) — путем решения системы уравнений

$$\begin{aligned} e_{\text{r}}p + e_{\text{ф}}\phi + e_{\text{к}}\kappa &= 1, \\ \overline{RO}_{\text{p}} + \overline{RO}_{\text{ф}}\phi + \overline{RO}_{\text{к}}\kappa &= 0, \\ q_{\text{r}}p + q_{\text{ф}}\phi + q_{\text{к}}\kappa &= 0, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $p$ ,  $\phi$ ,  $\kappa$  — соответственно неизвестные расходные коэффициенты руды, флюса и кокса на тонну чугуна;  $\overline{RO}_{\text{p}}$ ,  $\overline{RO}_{\text{ф}}$ ,  $\overline{RO}_{\text{к}}$  — содержание свободных оснований, выражающее избыток (или недостаток) оснований против заданной основности шлака соответственно в руде, флюсе и коксе;  $q_{\text{p}}$ ,  $q_{\text{ф}}$ ,  $q_{\text{к}}$  —

тепловой эквивалент, выражающий приведенную затрату (отдачу) тепла на все химические и физические превращения, которым подвергается в доменной печи соответственно единица веса руды, флюса и кокса.

Методика расчета коэффициентов системы уравнений (1) разработана в [1].

Из структуры модели, описанной в [2], видно, что основное внимание уделено получению чугуна определенного химического состава при заданной основности шлака. Но при этом, выдерживая требуемую основность, можно выйти за пределы допустимого состава шлака, хотя, ограничивая удельный расход некоторых шихтовых материалов, можно управлять составом шлака. Однако такое управление носит субъективный характер. Эта модель не учитывает изменение производительности доменных печей в зависимости от поступающих шихтовых материалов, что очень важно при управлении доменным процессом.

Автором настоящей работы отмеченные недостатки модели [2] были устранены путем введения дополнительных ограничений на выход и состав шлака [3]. С помощью такой модифицированной модели была решена задача оптимальной загрузки доменных печей черной металлургии Урала [4]. В последней модели производительность доменной печи учитывалась косвенно через выход шлака (чем больше выхода шлака на тонну чугуна, тем производительность печи меньше).

Во всех упомянутых моделях следует отметить существенный недостаток — отсутствие в них объективного ограничения на производительность доменной печи. Кроме этого, имеется еще один недостаток. Как известно, доменный процесс характеризуется не только шлаковым режимом, но и газовым режимом доменной печи. Есть такой состав доменного газа, при котором доменный процесс будет протекать неудовлетворительно. Например, одним из основных параметров доменного газа является содержание  $\text{CO}_2$  и  $\text{CO}$  (точнее  $\text{CO}_2/\text{CO}$ ). Для нормального протекания доменного процесса  $\text{CO}_2/\text{CO}$  должно поддерживаться в определенных пределах. Это обстоятельство говорит о том, что для более полного описания доменного процесса необходимы еще ограничения на состав доменного газа.

В данной работе предлагается новая оптимизационная модель управления доменным процессом, в которой сделана попытка устранить основные недостатки известных моделей.

Для характеристики работы доменной печи существует несколько показателей: коэффициент использования полезного объема (КИПО) печей, индекс интенсивности плавки, среднее время пребывания шихтовых материалов в печи и т. д. Все эти показатели отражают суточную работу печи. Это не случайно. Отмеченные показатели печи характеризуют степень использования основного постоянного параметра ее — полезного объема доменной печи в течение суток.

В основе построения новой модели определения оптимальных параметров печи лежит идея оптимальной загрузки печи в течение суток при наличии основного ограничения на ее мощность — на полезный объем печи. При этом суточная производительность печи как неизвестная величина находится в результате решения оптимизационной задачи.

Итак, пусть имеется  $n$  железосодержащих шихтовых материалов (в это число не входит флюс и кокс), различающихся по химическому составу и себестоимости,  $j$  — номер произвольного шихтового материала. Требуется оптимально (по заданному критерию) загрузить доменную печь с полезным объемом, равным  $V$ , в течение суток. Будем считать, что такие технологические параметры, как температура и давление дутья, доля использования кислорода и природного газа, остаются постоянными и не зависят от поступающего сырья.

Введем следующие обозначения:  $t$  — среднее время пребывания шихтовых материалов в печи, час.;  $V$  — объем проплавляемых шихтовых материалов (руды, флюса, кокса) на гипотетический чугун, получаемый из 1 т  $j$ -го шихтового материала \*,  $\text{м}^3/\text{т}$  руды;  $X$  — неизвестная суточная производительность печи, т;  $x_j$  — суточный расход  $j$ -го шихтового материала, т;  $w_j$  — выход чугуна из 1 т  $j$ -го шихтового материала с учетом соответствующих удельных расходов флюса и кокса,  $\text{т}/\text{т}$  руды;  $w_{ij}$  — содержание  $i$ -го компонента чугуна (Mn, S, P и др.) в чугуне, равном  $w_j$ ,  $\text{кг}/\text{т}$  руды;  $b_j$  — выход шлака на чугун, равный  $w_j$ ,  $\text{т}/\text{т}$  руды;  $b_{\alpha j}$  — количество  $\alpha$ -го шлакообразующего ( $\text{SiO}_2$ , CaO,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , MgO) в шлаке, равном  $b_j$ ,  $\text{т}/\text{т}$  руды;  $a_i$ ,  $\bar{a}_i$  — соответственно наименьшее и наибольшее содержание  $i$ -го компонента в чугуне,  $\text{кг}/\text{т}$  чугуна;  $u_\alpha$ ,  $\bar{u}_\alpha$  — соответственно наименьшее и наибольшее содержание  $\alpha$ -го шлакообразующего в шлаке, доли единицы;  $u$  — суточный выход шлака, т;  $T_j$  — выход доменного газа на чугун, равный  $w_j$ , тыс.  $\text{м}^3/\text{т}$  руды;  $y$  — суточный выход доменного газа, тыс.  $\text{м}^3$ ;  $T_{vj}$  — содержание  $v$ -го компонента доменного газа, равное  $T_j$ , тыс.  $\text{м}^3/\text{т}$  руды;  $m_v$ ,  $\bar{m}_v$  — соответственно наименьшее и наибольшее содержание  $v$ -го компонента доменного газа, доли единицы;  $d_j$ ,  $D_j$  — соответственно наименьшее и наибольшее возможное использование в течение суток  $j$ -го шихтового материала, т;  $c_j$  — затраты на гипотетический чугун, полученный из 1 т  $j$ -го шихтового материала при соответствующих расходах флюса и кокса (без учета стоимостей используемого доменного газа и шлака),  $\text{руб}/\text{т}$  руды;  $P$  — цена чугуна,  $\text{руб}/\text{т}$ ;  $P_{\text{ш}}$  — цена шлака,  $\text{руб}/\text{т}$ ;  $P_r$  — цена доменного газа,  $\text{руб}/\text{тыс. м}^3$ ;  $\alpha$ ,  $\beta$  — соответственно доли использования шлака и газа.

Основное ограничение на мощность доменной печи описывается уравнением

$$\xi \sum V_j x_j = V_a \frac{24}{t},$$

где  $V_a$  — активный объем печи,  $\text{м}^3$ ,  $\xi$  — коэффициент уминки шихты в печи (для коксовых печей  $\xi = 7/8$ ). Однако для практических расчетов достаточно ограничиться уравнением

$$\sum V_j x_j = V \frac{24}{t},$$

либо  $V \approx V_a 1/\xi$ .

Основное ограничение на мощность доменной печи означает, что общий объем проплавляемой массы шихтовых материалов в течение суток должен равняться объему печи, умноженному на среднее количество циклов прохождения шихтовых материалов через доменную печь в то же время.

Математически модель управления доменным процессом имеет вид

$$\max \{L = PX + \alpha P_{\text{ш}} u + \beta P_r y - \sum c_j x_j\} \quad (2)$$

при условиях

$$\sum V_j x_j = V \frac{24}{t}, \quad (3)$$

$$\sum w_j x_j - X = 0, \quad (4)$$

$$a_i X \leq \sum w_{ij} x_j \leq \bar{a}_i X, \quad i = 1, 2, \dots, r, \quad (5)$$

$$\sum b_j x_j - u = 0, \quad (6)$$

\* Для железорудного концентрата эта величина определяется с учетом потерь при спекании.

$$\underline{u}_\alpha u \leq \sum b_{\alpha j} x_j \leq \bar{u}_\alpha u, \quad \alpha = 1, 2, \dots, l, \quad (7)$$

$$\sum T_j x_j - y = 0, \quad (8)$$

$$\underline{m}_v y \leq \sum T_{vj} x_j \leq \bar{m}_v y, \quad v = 1, 2, \dots, N, \quad (9)$$

$$d_j \leq x_j \leq D_j, \quad j = 1, 2, \dots, n. \quad (10)$$

В модели (2) — (10) отдельные условия имеют следующий смысл. Целевая функция (2) выражает максимизацию прибыли. Отметим, что при введенных ограничениях (3) — (10) данную задачу нельзя решать на минимум затрат, так как в модели конечная продукция не фиксирована. Уравнение (4) показывает баланс выпуска чугуна, а неравенства (5) описывают качество выпускаемого чугуна; (6) определяет суточный выход шлака; (7) описывают ограничения на состав шлака; (8) выражает суточный выход доменного газа допустимого состава, описываемого (9); (10) показывает на ограниченные возможности потребления отдельных шихтовых материалов.

**Примечание.** На практике часто учитывают свойство газа по суммарному содержанию  $\text{CO}_2$  и  $\text{CO}$ . Это вызвано тем, что суммарное содержание  $\text{CO}_2$  и  $\text{CO}$  практически постоянно для всех доменных печей (например, при работе на коксе содержание  $\text{CO}_2 + \text{CO}$  изменяется от 38 до 42%), а содержание  $\text{CO}_2$  колеблется от 8 до 16%. Эти условия запишутся

$$0,38 y \leq \sum (T_{1j} + T_{2j}) x_j \leq 0,42 y, \quad 0,08 y \leq \sum T_{1j} x_j \leq 0,16 y,$$

где  $T_{1j}$ ,  $T_{2j}$  — соответственно содержание  $\text{CO}_2$  и  $\text{CO}$  в доменном газе  $j$ -го гипотетического чугуна.

Форма учета свойства доменного газа зависит от конкретных условий для каждого доменного цеха.

**Пример\*.** Найти основные параметры управления доменной плавкой по модели (2) — (10) для печи с объемом  $V = 1033 \text{ м}^3$ . Среднее время пребывания шихты в печи  $t = 6,5$  час. Состав передельного чугуна: 0,78% Si, S не более 0,07%, P не более 0,2%. Состав шлака:  $\text{SiO}_2$  не более 43%, CaO не более 44%,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  не менее 10%, MgO не более 12%. Состав доменного газа: ( $\text{CO}_2 + \text{CO}$ ) не более 42%, содержание  $\text{CO}_2$  от 8 до 16%.

Средние затраты на доменный передел 3 руб/т чугуна. Характеристики шихтовых материалов дана в табл. 1 (химический состав — в %). В себестоимость шихтовых материалов включены также затраты на агломерационный передел.

Примем следующие показатели: отпускная цена чугуна 56 руб/т, коэффициент использования шлака  $\alpha = 0,85$  по цене  $P_{\text{ш}} = 0,15$  руб/т, коэффициент использования доменного газа  $\beta = 0,8$  по цене  $P_{\text{г}} = 1,10$  руб/тыс.  $\text{м}^3$ .

Необходимые расходные коэффициенты, определенные путем восьми полных расчетов шихты доменной плавки по модели (1), представлены в табл. 2\*\*.

Варианты ограничений на использование отдельных шихтовых материалов, т. е. двухсторонние ограничения на переменные  $x_j$ , приведены в табл. 3.

\* При расчете коэффициентов системы уравнений (1) используется много вне-модельных технологических параметров (температура и давление дутья, давление под колошником, тепловые постоянные и др.), которые для каждого доменного цеха имеют вполне определенные значения.

\*\* Расчеты проводились на машине М-20 по программе, составленной Л. Т. Коротавой.

Таблица 1

## Характеристика шихтовых материалов

| Химические элементы                          | Железорудные шихтовые материалы |       |       |       |       |       |      |      | Флюс | Кокс |
|----------------------------------------------|---------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|------|
|                                              | 1                               | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7    | 8    |      |      |
| Fe                                           | 65,0                            | 65,4  | 62,5  | 64,0  | 61,78 | 54,7  | 56,7 | 51,3 | 0,5  | 0,77 |
| Mn                                           | —                               | 0,1   | 0,1   | 0,02  | 0,11  | 0,02  | 0,14 | 0,50 | —    | —    |
| P                                            | 0,1                             | 0,02  | 0,04  | —     | 0,02  | —     | 0,16 | 0,25 | —    | —    |
| S                                            | 1,0                             | 0,78  | 0,12  | —     | 0,19  | —     | 0,51 | 0,02 | 0,12 | 0,5  |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>               | 62,91                           | 61,0  | 60,0  | 58,56 | 81,59 | 58,8  | 62,0 | —    | 0,71 | —    |
| FeO                                          | 25,0                            | 28,0  | 24,0  | 25,73 | 6,00  | 17,4  | 18,0 | 65,0 | —    | 0,65 |
| MnO                                          | —                               | 0,13  | 0,13  | 0,026 | 0,13  | 0,026 | 0,18 | 0,64 | —    | —    |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>                | 0,229                           | 0,046 | 0,092 | —     | 0,046 | —     | 0,36 | 0,57 | —    | —    |
| Fe <sub>мет</sub>                            | 1,51                            | 0,9   | 1,83  | 2,09  | —     | —     | —    | 0,8  | —    | 0,26 |
| SO <sub>3</sub>                              | 2,5                             | 1,95  | 0,3   | —     | 0,5   | —     | 1,27 | 0,05 | 0,3  | 1,25 |
| SiO <sub>2</sub>                             | 8,11                            | 4,0   | 10,3  | 12,0  | 4,0   | 7,66  | 11,9 | 30,0 | 1,3  | 5,0  |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>               | 2,20                            | 1,65  | 1,50  | 1,50  | 1,06  | 2,43  | 2,53 | 0,50 | 0,99 | 2,4  |
| CaO                                          | 4,00                            | 1,56  | 1,70  | 1,70  | 5,80  | 10,95 | 3,69 | 0,50 | 52,0 | 0,55 |
| MgO                                          | 0,88                            | 0,99  | 1,30  | 1,30  | 0,85  | 2,02  | 2,03 | 0,20 | 3,1  | 0,28 |
| C <sub>пел</sub>                             | —                               | —     | —     | —     | —     | —     | —    | —    | —    | 88,5 |
| Себестоимость материалов, руб/т              | 9,95                            | 12,50 | 10,40 | 11,60 | 13,95 | 9,22  | 7,74 | 4,00 | 0,77 | 31,5 |
| Удельный объем материалов, м <sup>3</sup> /т | 0,50                            | 0,45  | 0,50  | 0,55  | 0,65  | 0,65  | 0,65 | 0,60 | 0,66 | 1,00 |

Таблица 2

## Результаты расчетов моношихт из различных материалов на 1 т железорудного сырья

| Показатели                                               | Номера железорудного сырья |       |       |       |        |        |       |       |
|----------------------------------------------------------|----------------------------|-------|-------|-------|--------|--------|-------|-------|
|                                                          | 1                          | 2     | 3     | 4     | 5      | 6      | 7     | 8     |
| Затраты на чугун, руб/т руды                             | 22,55                      | 24,52 | 23,18 | 24,23 | 26,19  | 20,32  | 21,13 | 20,13 |
| Объем проплавляемых материалов, м <sup>3</sup> /т руды   | 0,849                      | 0,752 | 0,896 | 0,957 | 0,909  | 0,874  | 1,112 | 1,440 |
| Чугун                                                    | 0,703                      | 0,700 | 0,680 | 0,698 | 0,651  | 0,576  | 0,601 | 0,550 |
| Выход, т/т руды                                          | 0,206                      | 0,127 | 0,094 | 0,085 | 0,193  | 0,077  | 0,400 | 0,149 |
| Содержание серы, кг/т руды                               | 1,685                      | 0,370 | 0,600 | 0,198 | 0,326  | 0,119  | 1,779 | 1,791 |
| Содержание фосфора, кг/т руды                            | —                          | —     | —     | —     | —      | —      | —     | —     |
| Шлак                                                     | 0,218                      | 0,122 | 0,250 | 0,293 | 0,108  | 0,192  | 0,323 | 0,686 |
| Выход, т/т руды                                          | 0,084                      | 0,052 | 0,100 | 0,134 | 0,040  | 0,083  | 0,121 | 0,300 |
| Количество SiO <sub>2</sub> , т/т руды                   | 0,033                      | 0,027 | 0,026 | 0,026 | 0,017  | 0,031  | 0,034 | 0,017 |
| Количество Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , т/т руды     | 0,077                      | 0,029 | 0,086 | 0,100 | 0,033  | 0,058  | 0,132 | 0,292 |
| Количество CaO, т/т руды                                 | 0,011                      | 0,012 | 0,018 | 0,019 | 0,008  | 0,018  | 0,027 | 0,020 |
| Количество MgO, т/т руды                                 | —                          | —     | —     | —     | —      | —      | —     | —     |
| Доменный газ                                             | —                          | —     | —     | —     | —      | —      | —     | —     |
| Выход, тыс. м <sup>3</sup> /т руды                       | 1,129                      | 1,042 | 1,169 | 1,143 | 1,045  | 1,059  | 1,365 | 2,115 |
| Количество CO <sub>2</sub> , тыс. м <sup>3</sup> /т руды | 0,169                      | 0,184 | 0,162 | 0,166 | 0,164  | 0,129  | 0,205 | 0,162 |
| Количество CO, тыс. м <sup>3</sup> /т руды               | 0,300                      | 0,266 | 0,301 | 0,224 | 0,255  | 0,229  | 0,324 | 0,792 |
| Расход кокса, т/т руды                                   | 0,304                      | 0,288 | 0,312 | 0,304 | 0,303  | 0,278  | 0,341 | 0,425 |
| Расход флюса, т/т руды                                   | 0,068                      | 0,021 | 0,128 | 0,156 | —0,052 | —0,104 | 0,179 | 0,548 |

Таблица 3

Варианты ограничений на использование отдельных шихтовых материалов,  $\tau$ 

| Вариант |       | Шихтовые материалы |     |      |      |     |     |     |    |
|---------|-------|--------------------|-----|------|------|-----|-----|-----|----|
|         |       | 1                  | 2   | 3    | 4    | 5   | 6   | 7   | 8  |
| I       | $d_j$ | 400                | 600 | 0    | 0    | 0   | 500 | 0   | 25 |
|         | $D_j$ | 1500               | 900 | 800  | 2000 | 600 | 900 | 500 | 50 |
| II      | $d_j$ | 400                | 600 | 0    | 0    | 0   | 500 | 0   | 25 |
|         | $D_j$ | 700                | 600 | 2000 | 500  | 600 | 900 | 800 | 50 |
| III     | $d_j$ | 400                | 600 | 0    | 0    | 0   | 500 | 0   | 25 |
|         | $D_j$ | 2300               | 900 | 800  | 1600 | 600 | 900 | 400 | 50 |

Таблица 4

Результаты решения задачи (2) — (10) симплексным методом (значения переменных,  $\tau$ )

| Вариант | Управляющие параметры |       |       |       |       |       |       |       |      | $L_{\text{опт}}$ ,<br>тыс. руб. | Оценка по-<br>льзова-<br>ния объе-<br>ма печи в<br>сутки,<br>руб/м <sup>3</sup> |
|---------|-----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|---------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|
|         | $x_1$                 | $x_2$ | $x_3$ | $x_4$ | $x_5$ | $x_6$ | $x_7$ | $x_8$ | $X$  |                                 |                                                                                 |
| I       | 1500                  | 900   | 800   | 704   | 0     | 500   | 0     | 25    | 3022 | 71,636                          | 16,61                                                                           |
| II      | 700                   | 600   | 2000  | 500   | 0     | 529   | 0     | 25    | 2939 | 68,832                          | 14,32                                                                           |
| III     | 2300                  | 900   | 794   | 0     | 0     | 500   | 0     | 25    | 3089 | 74,541                          | 17,81                                                                           |

Нижняя граница (значения  $d_j$ ) использования отдельных шихтовых материалов во всех трех вариантах одинакова. Эти величины определяются как технологическими соображениями (например, материал № 8 — сварочный шлак), так и технико-экономическими условиями, не учтенными в модели.

Анализируя оптимальные параметры процесса во всех трех вариантах (табл. 4), нетрудно заметить, что наилучшим вариантом по показателю качества системы является третий, при котором достигается максимальная производительность печи ( $X_{\text{опт}}^{\text{III}} = 3089 \text{ т/сутки}$ ) и наибольшее значение функционала  $L$  ( $L_{\text{опт}}^{\text{III}} = 74,541$  тыс. руб.). Худшим вариантом является второй:  $L_{\text{опт}}^{\text{II}} = 68,832$  тыс. руб.,  $X_{\text{опт}}^{\text{II}} = 2939 \text{ т/сутки}$ . Снижение показателей системы объясняется резким сокращением возможного использования материала № 1 (верхняя граница использования  $D_1 = 700 \text{ т}$ ).

Таким образом, сильно действующим параметром на поведение процесса служит использование материала № 1. Это неудивительно, так как материал № 1 обладает самыми благоприятными свойствами (см. табл. 1): высокое содержание железа, сравнительно низкая себестоимость, неплохое сочетание шлакообразующих (ввиду этого низкий удельный расход флюса на тонну руды, см. табл. 2). Вполне естественно, что металлургическая ценность шихтовых материалов в условиях выплавки чугуна других марок при иных технологических параметрах может меняться. Отсюда возникает задача оптимального распределения шихтовых материалов между доменными печами, отличающимися по своим основным технологическим показателям. Этот вопрос находится пока на стадии разработки.

Несомненный интерес представляют расчетные показатели (оценки) использования полезного объема доменных печей в течение суток (см. последний столбец табл. 4). Эти показатели определяются на основе решения двойственной задачи к прямой задаче (2) — (10). В данном случае

оценка использования полезного объема доменной печи показывает прибыль, приносимую 1 м<sup>3</sup> объема печи в течение суток. Самая лучшая оценка использования объема печи при третьем варианте (оценка равна 17,81 руб/м<sup>3</sup> в сутки).

Согласно теории двойственности

$$\frac{\partial L_{\text{опт}}^{\text{III}} \left( V \frac{24}{t} \right)}{\partial \left( V \frac{24}{t} \right)} = \frac{\partial L_{\text{опт}}^{\text{III}} \left( V \frac{24}{t} \right)}{\partial \left( V \frac{24}{t} \right)} \bigg|_{\substack{V=1033 \\ t=6,5}} = 17,81,$$

т. е. прибыль в сумме 17,8 руб/м<sup>3</sup> в сутки можно получить только за счет уменьшения времени пребывания шихтовых материалов в печи. Это время в данном случае нетрудно определить из уравнения:  $1033 \frac{24}{t} - 1033 \frac{24}{6,5} = 1$ , отсюда  $t = 6,498$  час., т. е. время пребывания шихты в печи следует сократить на  $(6,5 - 6,498) 60 = 0,12$  мин., чтобы получить 17,81 руб. дополнительной прибыли.

Следует отметить, что оценки использования полезного объема доменных печей, в отличие от других показателей их работы, определяются комплексным путем на основе решения задачи линейного программирования, учитывающей основные технико-экономические показатели системы.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Доменное производство. Справочник, т. 1. М., Metallurgizdat, 1963.
2. Т. Фабиян. Анализ процессов черной металлургии США. В сб. Отраслевые экономико-математические модели. М., «Прогресс», 1967.
3. Х. Н. Гизатуллин. Некоторые модели развития горно-металлургического комплекса. Экономика и матем. методы, 1969, т. V, вып. 6.
4. Х. Н. Гизатуллин. Некоторые вопросы народнохозяйственного оптимума в планировании черной металлургии. В сб. Математические методы в некоторых задачах оптимального планирования, вып. II, Свердловск, 1969 (АН СССР Урал. филиал).

Поступила в редакцию  
9 VI 1969