

31. *Лыков А. В.* Методы решения нелинейных уравнений нестационарной теплопроводности // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. — 1970. — № 5. — С. 109—150.

32. *Коздоба Л. А.* Методы решения нелинейных задач теплопроводности. — М.: Наука, 1975. — 226 с.

33. *Постольник Ю. С.* Приближенные методы исследований в термомеханике. — Киев—Донецк: Вища шк., 1984. — 158 с.

34. *Постольник Ю. С., Огурцов А. П., Решетняк И. С.* Основы металлургической термомеханики. — Київ—Дніпродзержинськ: Вид. ДДТУ, 1998. — 360 с.

35. *Тимошпольский В. И.* Теплотехнологические основы металлургических процессов и агрегатов высшего технического уровня. — Мн.: Навука і тэхніка, 1995. — 255 с.

36. *Тимошпольский В. И., Трусова И. А., Пекарский М. Я.* Кольцевые печи. — Мн.: Выш. шк., 1993. — 248 с.

37. Прикладные задачи металлургической теплофизики / В. И. Тимошпольский, Н. М. Беляев, А. А. Рядно, И. А. Трусова и др. — Мн.: Навука і тэхніка, 1991. — 320 с.

38. Теплообмен и тепловые режимы в промышленных печах / В. И. Тимошпольский, И. А. Трусова, А. Б. Стеблов, И. А. Павлюченков. — Мн.: Выш. шк., 1992. — 217 с.

39. Промышленные теплотехнологии. Моделирование нелинейных процессов / В. И. Тимошпольский, И. А. Трусова, А. П. Несенчук, С. С. Бродский, О. В. Дубина, И. А. Павлюченков. — Мн.: Выш. шк., 2000. — 319 с.

УДК 669.012

В. И. ТИМОШПОЛЬСКИЙ, докт. техн. наук,
В. Б. КОВАЛЕВСКИЙ, докт. техн. наук (БГПА),
В. В. ФИЛИППОВ (БМЗ), **С. М. КОЗЛОВ**, канд. техн. наук,
П. Э. РАТНИКОВ, **О. Г. ХОПОВА** (БГПА)

ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ НАГРЕВА СТАЛЕЙ ПО МИНИМУМУ РАСХОДА ТОПЛИВА*

Нагрев металла в печах металлургического и машиностроительного производства — весьма энергоемкий технологический процесс. Рост цен на топливно-энергетические ресурсы в последнее время выводит объем топливопотребления в ранг приоритетного критерия при расчете себестоимости продукции.

В ряде научных исследований решались вопросы создания рациональных технологий нагрева металла для термически тонких и

* В порядке обсуждения

массивных тел, обеспечивающих минимизацию окалины и топлива как отдельно, так и в целом [1—4], определения оптимальных конструктивных параметров печи при минимуме затрат на топливо, огнеупоры и обслуживание [5], разработки режимов нагрева стали в многозонной печи для минимизации суммарного расхода топлива [6] и др. Однако, несмотря на то что этой проблеме посвящено множество работ, задача оптимального использования топлива, безусловно, является крайне актуальной.

На основе анализа работ различных авторов можно сделать следующие заключения: графики оптимального режима нагрева с минимальным расходом топлива и учетом ограничений на температуру печи качественно совпадают для термически тонкого и массивного тел [7], режим нагрева, характеризующийся минимальным топливопотреблением, соответствует неизменной тепловой мощности печи при монотонном росте температур греющей среды и металла [5], режимы нагрева металла, оптимальные по окислению, являются рациональными по топливопотреблению [8].

В данной работе предлагается методика решения задачи нагрева призмы прямоугольного сечения 250×300 мм от некоторой начальной температуры до заданной по минимуму расхода топлива в печи с шагающими балками стана 850 Белорусского металлургического завода.

Оптимальный режим работы печи является двухступенчатым: вначале идет монотонный нагрев металла с минимально возможной температурой греющей среды или наименьшим расходом топлива, а затем — форсированный нагрев до требуемой температуры. В отличие от других подходов (например, [9]) нами предлагается использовать непосредственно величину расхода топлива в качестве функции управления.

При соответствующих предположениях изменение температуры в призме можно описать дифференциальным уравнением в частных производных [9]:

$$\rho c(T) \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial y} \right], \quad (1)$$

$$0 \leq x \leq R_1, \quad 0 \leq y \leq R_2, \quad 0 < t \leq t_k,$$

с начальными, конечными и граничными условиями:

$$T(x, y, 0) = T_0, \quad (2)$$

$$T(x, y, t_k) = T_k, \quad (3)$$

$$\lambda(T) \frac{\partial T(R_1, y, t)}{\partial x} = \alpha(T_{\text{печ}}(t) - T(R_1, y, t)) + \sigma(T_{\text{печ}}^4(t) - T^4(R_1, y, t)), \quad (4)$$

$$\frac{\partial T(0, y, t)}{\partial x} = 0,$$

$$\lambda(T) \frac{\partial T(x, R_2, t)}{\partial y} = \alpha(T_{\text{печ}}(t) - T(x, R_2, t)) + \sigma(T_{\text{печ}}^4(t) - T^4(x, R_2, t)), \quad (5)$$

$$\frac{\partial T(x, 0, t)}{\partial y} = 0,$$

где ρ — плотность материала; $c(T)$ — теплоемкость металла; t — текущее время; $\lambda(T)$ — теплопроводность металла; $T(x, y, t)$ — температура в точке (x, y) в момент времени t ; x, y — текущие координаты узкой грани призмы, отсчитываемые от центра; R_1 — половина длины узкой грани призмы; R_2 — половина ширины узкой грани призмы; t_k — время окончания процесса нагрева; T_0 — начальное, равномерное распределение температуры в призме; T_k — конечная температура металла; $T_{\text{печ}}(t)$ — температура печи в момент времени t ; α — коэффициент теплообмена конвекцией; σ — коэффициент теплообмена радиацией.

После параметрической идентификации, когда определились коэффициенты α и σ , адекватность данной математической модели не один раз подтверждалась результатами промышленных экспериментов на БМЗ.

Как правило, в математической модели нагрева металла в качестве функции, управляющей процессом нагрева, выступает температура печи. Авторами статьи сделана попытка управлять динамикой изменения температур греющей среды и металла посредством изменения величины мгновенного расхода топлива. Применен широко апробированный в металлургической теплотехнике метод магистральной асимптотической оптимизации [8—10].

На основе уравнения теплового баланса для печи непрерывного действия можно получить уравнение, описывающее динамику изменения температуры печи по следующему закону [11]:

$$\begin{aligned} \frac{dT_{\text{печ}}(t)}{dt} = & A_1 B(t) - A_2 T_{\text{печ}}(t) - A_3 T_{\text{печ}}^4(t) - \\ & - A_4 \left(\int_0^{R_2} \left[\alpha(T_{\text{печ}}(t) - T(R_1, y, t)) + \sigma(T_{\text{печ}}^4(t) - T^4(R_1, y, t)) \right] dy + \right. \\ & \left. + \int_0^{R_1} \left[\alpha(T_{\text{печ}}(t) - T(x, R_2, t)) + \sigma(T_{\text{печ}}^4(t) - T^4(x, R_2, t)) \right] dx \right), \quad (6) \end{aligned}$$

$$T_{\text{печ}}(0) = T_{\text{печ}0}, \quad (7)$$

где A_1, A_2, A_3, A_4 — соответствующие коэффициенты; $B(t)$ — расход топлива в момент времени t ; $T_{\text{печ}0}$ — температура печи в начальный момент времени.

Предположим, что

$$B_1 \leq B(t) \leq B_2, \quad (8)$$

где B_1, B_2 — минимальный и максимальный расходы топлива, определяемые из технологических особенностей конструкции печи.

Тогда задачу о минимизации расхода топлива можно сформулировать так.

Требуется выбрать такой закон изменения расхода топлива $B(t)$, удовлетворяющий ограничениям (8), который переводит решение уравнения с частными производными (1), (4), (5) из начального состояния (2) в конечное (3) за время t_k . При этом температура печи удовлетворяет соотношениям (6), (7) и минимизируется суммарный расход топлива:

$$I(B) = \int_0^{t_k} B(t) dt. \quad (9)$$

Удельный расход топлива b :

$$b = \frac{b_{\Sigma} Q_{\text{н}}^{\text{р}}}{7000P} 4,186,$$

где b_{Σ} — суммарный часовой расход топлива в печи; $Q_{\text{н}}^{\text{р}}$ — удельная теплота сжигания топлива; P — производительность печи.

Очевидно, что магистральный режим для задачи (1)–(9) находится в результате интегрирования уравнения (1) с граничными условиями (4), (5) при температуре печи, определяемой соотношением (6) и $B(t) \equiv B_1$. Найдем управление из принципа максимума. Получим, что оно равно либо B_1 , либо B_2 . Следовательно, исходя из минимизации функционала (9), мера множества, где управление $B(t)$ принимает значение B_2 , должна быть как можно меньше. Определим теперь решение задачи (1)–(8) при $B(t) \equiv B_1$, $t \in [0, \tau^*]$, которое обозначим $T_1(x, y, t)$, $T_{\text{печ}}^1(t)$. При этом дифференциальные уравнения (1), (6) с граничными условиями (4), (5) и начальными условиями

$$T(x, y, \tau^*) = T_1(x, y, \tau^*), \quad T_{\text{печ}}(\tau^*) = T_{\text{печ}}^1(\tau^*), \quad B(t) \equiv B_2 \quad (10)$$

имеют решение $T_2(x, y, t)$, $T_{\text{печ}}^2(t)$, $\tau^* < t \leq t_k$, $0 \leq x \leq R_1$, $0 \leq y \leq R_2$, удовлетворяющее ограничению (9), а при большем значении τ^* ограничение (9) не выполняется, тогда управление, построенное таким образом, оптимально.

Следовательно, чтобы построить оптимальный температурный режим работы печи, необходимо найти момент переключения управления $B(t) - \tau^*$.

Определить момент переключения можно методом дихотомии по следующему алгоритму.

Шаг 1. Задаем точность вычислений ϵ и положим $a = 0$, $b = t_k$.

Шаг 2. Вычислим $\tau^* = \frac{a+b}{2}$.

Шаг 3. Численно интегрируя уравнения (1), (5) с начальными условиями (2), (6) и $B(t) \equiv B_1$, находим $T_1(x, y, t)$, $T_{\text{печ}}^1(t)$, $t \in [0, \tau^*]$.

Шаг 4. Численно интегрируя уравнения (1), (5) с начальными условиями (10), находим $T_2(x, y, t)$, $T_{\text{печ}}^2(t)$, $t \in [\tau^*, t_k]$.

Шаг 5. Если $\max_{x,y}(T_2(x, y, t_k) - T_k) > \epsilon$, то положим $b = \tau^*$ и перейдем к шагу 2.

Шаг 6. Если $\max_{x,y}(T_2(x, y, t_k) - T_k) < -\epsilon$, то положим $a = \tau^*$ и перейдем к шагу 2.

Шаг 7. Если $\max_{x,y}(T_2(x, y, t_k) - T_k) \leq \epsilon$, то закончим вычисления τ^* .

Для решения поставленной задачи было разработано программное обеспечение для ПЭВМ и выполнен расчет при следующих исходных данных.

Сталь — 70 К; $R_1 = 0,15$ м; $R_2 = 0,125$ м; $\alpha = 30$ Вт/(м² · °С); $\sigma = 4,65 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м² · °С⁴); $\rho = 7800$ кг/м³; $T_0 = 27$ °С; $T_k = 1200$ °С; $T_{\text{печ}0} = 500$ °С.

Коэффициенты теплопроводности и теплоемкости металла $\lambda(T)$ и $c(T)$ определялись по эмпирическим формулам В. А. Мавковского [11].

На рис. 1 и 2 показаны изменения температуры печи и металла в характерных точках сечения прямоугольной призмы для заданного оптимального режима расхода топлива при производительности печи $P_1 = 45$ т/ч и $P_2 = 70$ т/ч соответственно. Расход топлива в печи при этом составил 1590 и 2620 м³/ч. Другие результаты расчетов сведены в таблицу 1.

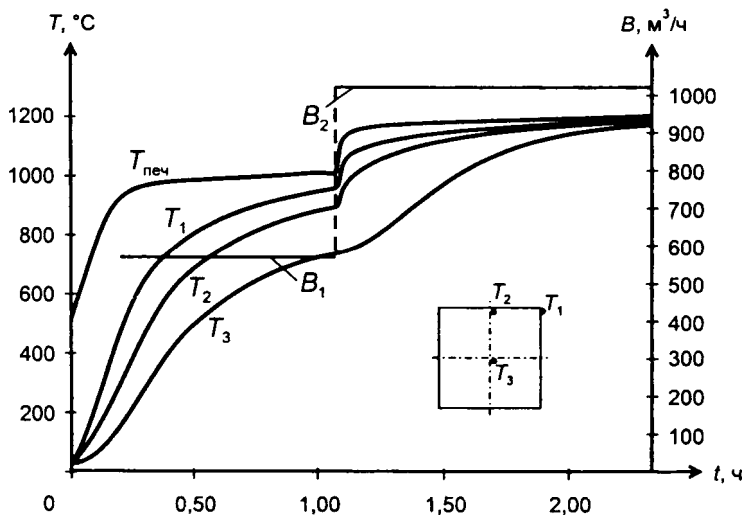


Рис. 1. Динамика температур греющей среды ($T_{\text{печ}}$) и металла в характерных точках сечения заготовки (T_1 , T_2 , T_3) при заданном оптимальном расходе топлива (B_1 , B_2) при производительности печи $P = 45$ т/ч

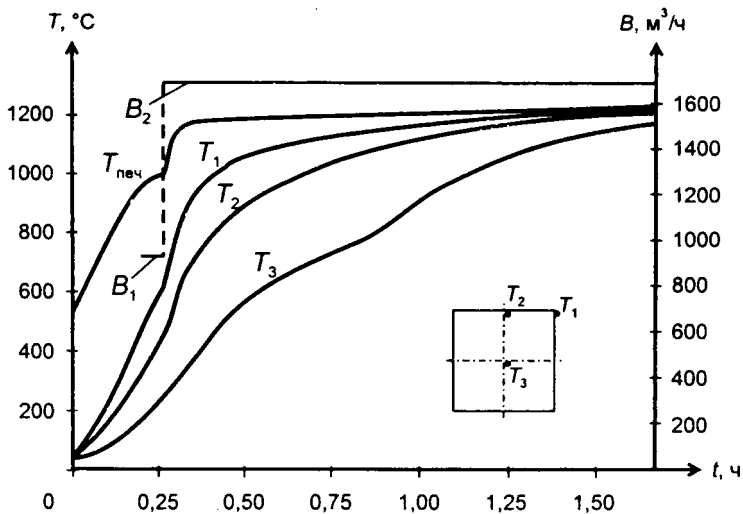


Рис. 2. Динамика температур греющей среды ($T_{\text{печ}}$) и металла в характерных точках сечения заготовки (T_1 , T_2 , T_3) при заданном оптимальном расходе топлива (B_1 , B_2) при производительности печи $P = 70$ т/ч

Данные расчетов

P , т/ч	τ^* , ч	V_1 , м ³ /ч	V_2 , м ³ /ч	b , кг у. т./т	A_1 , °С/м ³	A_2 , 1/ч	A_3 , 1/(ч · °С ³)	A_4
45	1,08	570	1020	41,48	7,5	$5 \cdot 10^{-6}$	10^{-12}	$8 \cdot 10^{-6}$
70	0,29	930	1690	43,84	5	$5 \cdot 10^{-6}$	10^{-12}	$8 \cdot 10^{-6}$

Максимальное отклонение температуры металла от заданной в конце нагрева не превышает 30 °С, что свидетельствует об удовлетворительном равномерном прогреве слитка.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Малый С. А.* Экономичный нагрев металла. — М.: Металлургия, 1967. — 191 с.
2. *Гольдфарб Э. М., Ибряев В. С.* Оптимальный режим нагрева металла по критерию минимума суммарной стоимости расходуемого топлива и потерь металла на окисление // Изв. вузов. Черная металлургия. — 1971. — № 12. — С. 144—148.
3. Нагрев тонкого тела в проходной печи с минимальным расходом топлива / Н. Ю. Тайц, Ю. С. Борбоц, В. М. Ольшанский, А. А. Гузов // Изв. вузов. Черная металлургия. — 1974. — № 6. — С. 167—169.
4. Оптимальный нагрев металла в колодцах контролируемого охлаждения с минимальным расходом газа / Ю. В. Дьяченко, А. А. Терлеев, В. И. Тимошпольский и др. // Изв. вузов. Энергетика. — 1993. — № 11. — С. 130.
5. *Бутковский А. Г., Гольдфарб Э. М., Гескин Э. С.* Применение принципа максимума для оптимизации температурного режима печей // Изв. вузов. Черная металлургия. — 1967. — № 3. — С. 173—177.
6. *Гольдфарб Э. М., Гескин Э. С.* Оптимизация температурных режимов пламенных печей методами линейного и квадратичного программирования // Изв. вузов. Черная металлургия. — 1965. — № 1. — С. 159—163.
7. Выбор режима нагрева металла с минимальным расходом топлива / Н. Ю. Тайц, Л. А. Гузов, В. М. Ольшанский, Ю. С. Борбоц // Изв. вузов. Черная металлургия. — 1975. — № 4. — С. 164—167.
8. Теплотехнология металлургических мини-заводов / В. И. Тимошпольский, А. Б. Стеблов, И. А. Трусова и др. — Мн.: Навука і тэхніка, 1992. — 158 с.
9. *Тимошпольский В. И.* Теплотехнологические основы металлургических процессов и агрегатов высшего технического уровня. — Мн.: Навука і тэхніка, 1995. — 256 с.
10. *Ковалевский В. Б., Папкович В. Н., Козлов С. М.* Определение расхода топлива на основе теплового баланса для печей непрерывного действия // ИФЖ. — 1996. — Т. 69. — № 2. — С. 285—290.
11. *Маковский В. А.* Эмпирические формулы для выражения температурной зависимости теплофизических свойств стали // Сталь. — 1972. — № 1. — С. 87—89.