

В. Б. КОВАЛЕВСКИЙ, д-р техн. наук,
 В. И. ТИМОШПОЛЬСКИЙ, д-р техн. наук (БНТУ),
 А. Н. САВЕНОК (РУП БМЗ),
 Г. РОМАДАН, В. В. СУХАН (БНТУ)

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАСХОДА ТОПЛИВА НА ОСНОВЕ ТЕПЛООВОГО БАЛАНСА ПРИ НАГРЕВЕ ТОНКИХ ТЕЛ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ПЕЧАМ ПАТЕНТИРОВАНИЯ

В работе изложена новая методика определения величины расхода топлива, необходимого для поддержания требуемого температурного режима в печи, базирующаяся на использовании уравнений теплового баланса с учетом мгновенного расхода топлива в процессе нагрева. При этом методика учитывает не начальную и конечную температуры металла (как, например, в работах [1, 2]), а распределение температуры в текущий момент времени, что позволяет в дальнейшем осуществлять оптимизацию процесса нагрева.

Рассмотрим данную задачу на примере нагрева проволоки в печах патентирования сталепроволочного цеха БМЗ. Процесс патентирования как составная часть производства металлокорда предполагает восстановление проволоки диаметром 2,40 – 3,15 мм (после грубого волочения на волочильных станках) путем рекристаллизации и снятия внутренних напряжений быстрым нагревом в печи с последующим охлаждением в свинцовой ванне. Основные технические характеристики печи патентирования приведены ниже.

Длина печи, м	26
Внутренняя ширина, м	1
Количество зон, шт.	5
Количество горелок, шт.	35
Топливо	Природный газ
Температура проволоки, °С:	
начальная	20
конечная	950 ± 20
Диаметр проволоки, мм	2,40; 2,80; 3,15

В общем случае при расчетах нагрева проволоки в печи патентирования следует учитывать нелинейность граничных условий задачи и зависимость теплофизических свойств стали от температуры [3, 4]. Поскольку в печи патентирования осуществляется высокотемпературный нагрев (температура печи ~ 1000 °С), при постановке задачи можно пренебречь конвективным теплообменом (составляющим 5 – 15% от всего потока).

Согласно принятым допущениям, процесс нагрева проволоки (тонкого тела) описывается уравнениями:

$$\frac{dT}{dt} = \sigma(T_{\text{пл}}^4 - T^4); \quad (1)$$

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

где σ – коэффициент теплообмена радиацией; $T_{\text{пл}}$, T – температура соответственно среды и металла в момент времени t ; T_0 – начальная температура проволоки.

Пусть также известно распределение температуры печи в течение всего периода нагрева. Тогда средняя по объему температура металла определяется по формуле

$$T_{\text{ср}}(t) = \frac{1}{V} T(t), \quad (3)$$

где V – объем нагреваемой проволоки.

Необходимо получить уравнение для расхода топлива в момент времени $0 < t \leq t_k$ (t_k – время окончания процесса нагрева). Зафиксируем момент времени t и Δt .

Рассмотрим различные статьи расхода теплоты, необходимые для составления уравнения теплового баланса для топливной печи непрерывного действия [1].

1. Расход теплоты на нагрев металла от $T_{\text{ср}}(t)$ до $T_{\text{ср}}(t + \Delta t)$

$$Q_{\text{пол}}(t) = P c_m (T_{\text{ср}}(t + \Delta t) - T_{\text{ср}}(t)), \quad (4)$$

где P – производительность печи, кг/ч; c_m – средняя удельная теплоемкость металла, Дж/(кг · К).

2. Расход теплоты с дымовыми газами, покидающими печь,

$$Q_{\text{yx}}(t) = B(t) V_{\text{д}} c_{\text{д}} T_{\text{yx}} \Delta t, \quad (5)$$

где $B(t)$ – расход топлива, м³/ч; $V_{\text{д}}$ – объем продуктов сгорания, образующихся при сжигании 1 м³ топлива, м³/ м³; $c_{\text{д}}$ – удельная теплоемкость продуктов сгорания, Дж/(м³ · К); T_{yx} – температура уходящих дымовых газов, К.

3. Расход теплоты вследствие потерь через футеровку (кладку) печи

$$Q_{\text{кл}}(t) = \frac{T_{\text{пл}}(t)}{S_1/\lambda_1 + S_2/\lambda_2 + 1/\alpha_c} F_{\text{ст}} \Delta t, \quad (6)$$

где S_1/λ_1 , S_2/λ_2 – тепловые сопротивления, $\text{м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$; α_c – коэффициент теплоотдачи от наружной поверхности стен печи окружающей среде, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$; $F_{\text{ср}}$ – площадь наружной поверхности футеровки печи, м^2 .

4. Расходом теплоты излучением через открытые окна и дверцы печи пренебрегаем.

5. Расход теплоты на нагрев транспортирующих устройств (поддонов, конвейеров)

$$Q_{\text{тр}}(t) = \frac{M_{\text{тр}}}{\tau} c_{\text{тр}} (T_{\text{тр}}(t + \Delta t) - T_{\text{тр}}(t)), \quad (7)$$

где $M_{\text{тр}}$ – масса транспортирующих устройств, находящихся в печи, кг; $c_{\text{тр}}$ – средняя удельная теплоемкость транспортирующих устройств, $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$; $T_{\text{тр}}(t + \Delta t)$, $T_{\text{тр}}(t)$ – температура транспортирующих устройств; τ – время технологического цикла, ч.

Предположим также, что варьирование температуры нагрева транспортирующих устройств соответствует изменению температуры печи, т. е.

$$Q_{\text{тр}}(t) = \frac{M_{\text{тр}}}{\tau} c_{\text{тр}} (T_{\text{пч}}(t + \Delta t) - T_{\text{пч}}(t)). \quad (8)$$

6. Расход теплоты вследствие потерь через металлические стержни и вставки в футеровке печи (анкеры для крепления футеровки из керамического волокна и т. п.)

$$Q_{\text{т.к.з}}(t) = Q_{\text{кл}}(t). \quad (9)$$

7. Неучтенные потери

$$Q_{\text{неучт}}(t) = 0,1(Q_{\text{кл}}(t) + Q_{\text{тр}}(t) + Q_{\text{т.к.з}}(t)). \quad (10)$$

Таким образом, суммарный расход теплоты в момент времени t

$$\sum Q_{\text{расх}}(t) = Q_{\text{пол}}(t) + Q_{\text{ух}}(t) + Q_{\text{кл}}(t) + Q_{\text{тр}}(t) + Q_{\text{т.к.з}}(t) + Q_{\text{неучт}}(t). \quad (11)$$

Приход теплоты состоит из следующих составляющих:

1) от сжигания топлива (теплота химических реакций горения)

$$Q_{\text{х.т}}(t) = B(t) Q_{\text{и}}^{\text{п}} \Delta t, \quad (12)$$

где $B(t)$ – расход топлива, $\text{м}^3/\text{ч}$; $Q_{\text{и}}^{\text{п}}$ – низшая теплота сгорания топлива, $\text{Дж}/\text{м}^3$;

2) при подогреве воздуха (физическая теплота воздуха)

$$Q_{ф.в}(t) = B(t)V_в c_в T_в \Delta t, \quad (13)$$

где $V_в$ – объем воздуха, необходимый для сжигания 1 м^3 топлива, $\text{м}^3/\text{м}^3$; $c_в$ – средняя удельная теплоемкость воздуха, $\text{Дж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К})$; $T_в$ – температура подогрева воздуха, К ;

3) при подогреве топлива (физическая теплота топлива)

$$Q_{ф.т}(t) = B(t)c_т T_т \Delta t, \quad (14)$$

где $c_т$ – средняя удельная теплоемкость топлива, $\text{Дж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К})$; $T_т$ – температура подогрева топлива, К .

Приходом теплоты вследствие экзотермических реакций окисления металла пренебрегаем.

Суммарный приход теплоты в момент времени t находим по формуле

$$\sum Q_{\text{прих}}(t) = Q_{х.т}(t) + Q_{ф.в}(t) + Q_{ф.т}(t). \quad (15)$$

В соответствии с законом сохранения энергии суммарный расход теплоты должен компенсироваться суммарным приходом. Поэтому уравнение теплового баланса имеет вид

$$\sum Q_{\text{расх}}(t) = \sum Q_{\text{прих}}(t). \quad (16)$$

Подставляя (11), (15) в (16) и учитывая уравнения (3) – (10), (12) – (14), соотношение (16) перепишем в виде

$$Pc_m \frac{1}{V} \frac{(T(t + \Delta t) - T(t))}{\Delta t} + B(t)V_{л}c_{л}T_{у\kappa} + \frac{2,2T_{пч}F_{ст}}{s_1/\lambda_1 + s_2/\lambda_2 + 1/\alpha_c} + \frac{1,1M_{тр}c_{тр}(T_{пч}(t + \Delta t) - T_{пч}(t))}{\tau \Delta t} = B(t)Q_{п}^p + B(t)V_в c_в T_в + B(t)c_т T_т.$$

Перейдем к пределу при $\Delta t \rightarrow 0$ в последнем соотношении. Учитывая, что

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{T_{пч}(t + \Delta t) - T_{пч}(t)}{\Delta t} = \frac{dT_{пч}}{dt};$$

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{T(t + \Delta t) - T(t)}{\Delta t} = \frac{dT}{dt} = \sigma(T_{пч}^4 - T^4),$$

в конечном итоге получаем

$$\frac{dT_{\text{пч}}}{dt} = A_1 B(t) + A_2 T^4(t) + A_3 T_{\text{пч}}^4(t), \quad (17)$$

где

$$A_1 = \frac{(Q_{\text{п}}^{\text{п}} + V_{\text{в}} c_{\text{в}} T_{\text{в}} + c_{\text{т}} T_{\text{т}} - V_{\text{д}} c_{\text{д}} T_{\text{ух}}) \tau}{1,1 M_{\text{тп}} c_{\text{тп}}};$$

$$A_2 = \frac{P c_{\text{м}} \sigma}{1,1 M_{\text{тп}} c_{\text{тп}} V};$$

$$A_3 = -\frac{P c_{\text{м}} \sigma}{1,1 M_{\text{тп}} c_{\text{тп}} V} - \frac{2,2 F_{\text{ст}} \tau}{1,1 M_{\text{тп}} c_{\text{тп}} (s_1/\lambda_1 + s_2/\lambda_2 + 1/\alpha_c)}.$$

Для проверки надежности разработанной методики осуществили расчет расхода топлива при нагреве проволоки (высокоуглеродистая сталь) в печи патентирования БМЗ. Исходные данные для расчета: диаметр проволоки 3,15 мм; производительность печи – 1900 кг/ч; начальная температура проволоки – 20 °С; конечная температура проволоки – 970 °С; тепловорная способность топлива $Q_{\text{п}}^{\text{п}} = 34,1$ МДж/м³; коэффициенты A_1 , A_2 , A_3 в уравнении (17) равны: $A_1 = 1805,26$; $A_2 = 1,29 \cdot 10^{-11}$; $A_3 = -1,3 \cdot 10^{-11}$.

Результаты расчетов приведены на рис. 1, 2. Если сопоставить суммарный расход топлива (теоретические и производственные данные), то наблюдается совпадение величин расхода топлива: 100,1 м³/ч по предлагаемой методике и 94,2 м³/ч в условиях действующего производства.

Таким образом, разработанная методика расчета расхода топлива, температуры печи и металла может быть использована для проведения расчетов с целью выбора рациональных температурно-тепловых режимов и оптимизации процесса нагрева по критерию минимизации расхода топлива.

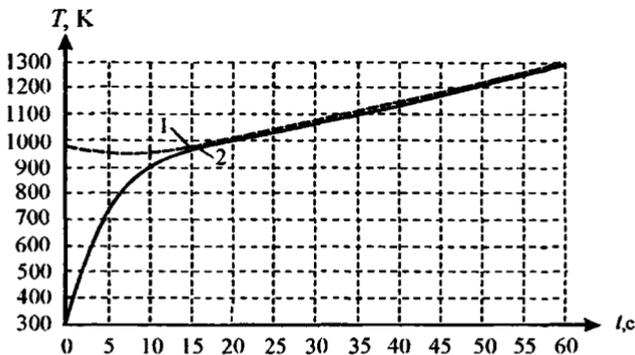


Рис. 1. График изменения температуры:

1 – печи; 2 – металла

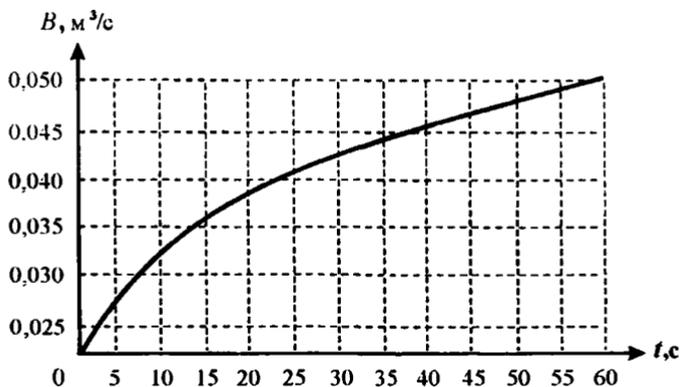


Рис. 2. График расхода топлива за период

ЛИТЕРАТУРА

1. Тимошпольский В. И., Трусова И. А., Стеблов А. Б., Павлюченков И. А. Теплообмен и тепловые режимы в промышленных печах. — Мн.: Выш. шк., 1992. — 214 с.
2. Расчеты нагревательных печей / С. И. Аверин, Э. М. Гольдфарб, А. Ф. Кравцов и др.; Под ред. Н. Ю. Тайца. — Киев: Техника, 1969. — 540 с.
3. Филиппов В. В. Исследование температурно-тепловых режимов нагрева металла в печах сталепроволочных цехов РУП «БМЗ» // Литье и металлургия. — 2001. — № 1. — С. 50 — 54.
4. Разработка высокоэффективных режимов термической обработки кордовой стали в печах патентирования / В. И. Тимошпольский, В. В. Филиппов, А. Н. Савенок и др. // Изв. вузов и энерг. объедин. СНГ. — 2001. — № 4. — С. 61 — 67.

УДК 669.187

И. А. БОНДАРЕНКО, В. М. НОСОВЕЦ,
Д. Н. ГОРБАБА, А. И. НОСОВЕЦ (РУП БМЗ)

ПРИМЕНЕНИЕ В РАБОЧЕЙ ФУТЕРОВКЕ СТАЛЕРАЗЛИВОЧНЫХ КОВШЕЙ ПЕРИКЛАЗОУГЛЕРОДИСТЫХ ИЗДЕЛИЙ РАЗЛИЧНЫХ ПРОИЗВОДИТЕЛЕЙ

Анализ мирового удельного объема потребления огнеупоров показывает [1 — 8], что в последние десятилетия около 60 — 70% всех производимых в мире огнеупоров применяется в черной металлургии. Нет оснований полагать, что этот показатель в ближайшее время изменится, поэтому