



The results of investigation of thermal operation of a patenting heating furnace are introduced, including problems of mathematical simulation of heating process, scaling minimization and fuel consumption.

В. В. ФИЛИППОВ, РУП "БМЗ"

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНО-ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ НАГРЕВА МЕТАЛЛА В ПЕЧАХ СТАЛЕПРОВОЛОЧНЫХ ЦЕХОВ РУП "БМЗ"

УДК 669.041

В связи с неуклонно возрастающими запросами к качеству со стороны потребителей Республиканским унитарным предприятием "Белорусский металлургический завод" постоянно проводится большая работа по освоению новых наукоемких видов конкурентоспособной продукции, модернизации и реконструкции производства, совершенствованию технологических процессов.

К наиболее наукоемким видам продукции сегодня можно отнести производство металлокорда открытых конструкций, компактных конструкций, высокопрочного металлокорда и др. Поэтому в связи с требованиями мирового уровня в настоящее время особенно актуальным является освоение производства кордовых сталей с содержанием углерода более 0,85% (стали 90К, 95К, 100К) с целью получения металлокорда со сверхпрочными характеристиками [1].

В связи с этим с 2000 г. в рамках научно-технического сотрудничества РУП "БМЗ" и Комплексной научно-производственной лаборатории "Проблемы металлургического производства" (КНПЛ ПМП) БГПА расширены исследования* в кордовом производстве, в частности в области патентирования проволоки.

В работе обобщаются результаты совместных исследований.

Описание объекта исследования

Печи патентирования предназначены для восстановления проволоки диаметром 2,40—3,15 мм после грубого волочения путем рекристаллизации и снятия внутренних напряжений быстрым кратковременным нагревом в нагревательной печи и дальнейшим смягчением проволоки путем охлаждения в свинцовой ванне. Технические характеристики нагревательной печи патентирования приведены в табл. 1.

* В работе принимали участие д-р техн. наук, проф. БГПА В. И. Тимошпольский, директор по новой технике БМЗ, канд. техн. наук Ю. В. Дьяченко, канд. техн. наук, доценты БГПА И. А. Трусова и С. М. Козлов.

Таблица 1. Технические характеристики нагревательной печи патентирования

Характеристика	Значение
Длина печи, м	26
Предварительный нагрев, м	6
Длина зоны нагрева, м	15,5
Внутренняя ширина, м	1
Количество зон, шт.	5
Количество горелок, шт.	35
Число зон регулирования	4
Максимальная температура, °С	1100
Установленная мощность, ккал (кДж)	772000 (3235000)
Топливо	Природный газ
Температура проволоки на входе, °С	20
Температура проволоки на выходе, °С	950±20
Обрабатываемый материал	Проволока из высокоуглеродистой стали
Диаметр проволоки, мм	2,4—3,15
Количество параллельных нитей проволоки, шт.	24
Расстояние между двумя нитями, мм	32
Предусмотренная постоянная скорость, мм/мин	72
Максимальная скорость, м/мин	30
Минимальная скорость, м/мин	22,85
Максимальная производительность, кг/ч	1960
Минимальная производительность, кг/ч	1400

Математическая модель процессов нагрева и окалинообразования

В силу незначительной термической массивности проволоки ($Bi < 0,1$; $Sk < 0,15$) [2] температурным перепадом по сечению проволоки можно пренебречь и, следовательно, процесс нагрева металла при лучисто-конвективном теплообмене может быть описан дифференциальным уравнением с сосредоточенными параметрами, представляющим собой уравнение элементарного теплового баланса [2]

$$\frac{dT}{dt} = \frac{Fq}{Mc} \quad (1)$$

с начальным условием

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

где $T(t)$ — температура печи в момент времени t ; F — площадь тепловоспринимающей поверхности; M — масса нагреваемого тела; q — удельный тепловой поток; c — теплоемкость металла; T_0 — начальная температура проволоки.

Поскольку $F = 2\pi Rl$, $M = \pi R^2 l \rho$, $q = \alpha(T_{\text{пч}} - T) + \sigma(T_{\text{пч}}^4 - T^4)$, где R , l — соответственно радиус и длина проволоки; ρ — плотность металла; α , σ — соответственно коэффициенты теплообмена конвекцией и излучением; $T_{\text{пч}}$ — температура печи, уравнение (1) можно записать в виде

$$\frac{dT}{dt} = \frac{2}{R\rho c} [\alpha(T_{\text{пч}} - T) + \sigma(T_{\text{пч}}^4 - T^4)]. \quad (3)$$

Процесс роста толщины слоя окалины с достаточной степенью точности можно описать законом Эванса [3]

$$\frac{dw}{dt} = \frac{\chi}{T(t)} \exp\left(\frac{-\beta}{T(t)}\right), \quad w(0) = 0. \quad (4)$$

Здесь w — величина окалины; χ — константа, характеризующая динамику роста окалины; β — отношение энергии активации к газовой постоянной.

Решить систему (3), (2), (4) в общем виде с учетом зависимости теплофизических величин от температуры нагреваемого металла возможно лишь численными методами.

Выполняя замену производной конечно-разностным отношением

$$\frac{dT}{dt} = \frac{T(t + \Delta t) - T(t)}{\Delta t}, \quad (5)$$

имеем следующую расчетную схему:

$$T(t + \Delta t) = T(t) + \frac{2\Delta t}{R\rho c} [\alpha(T_{\text{пч}}(t) - T(t)) + \sigma(T_{\text{пч}}^4(t) - T^4(t))].$$

Температура металла в начальный момент времени задается выражением (2).

Переменный характер теплофизических коэффициентов (теплоемкости c , плотности ρ) металла может учитываться в соответствии с результатами работ [4, 5]. Зависимость теплофизических коэффициентов от температуры определяется эмпирическими формулами Маковского [4]. В работе [5] автором предлагается методика для расчета теплофизических коэффициентов материала исходя из химического состава стали. Данный метод предполагается использовать только на ЭВМ. Функциональная зависимость между теплофизическими коэффициентами, содержанием легирующих элементов и температурой описывается полиномом с двумя переменными. Путем рационального подбора коэффициентов (множителей) значения

аппроксимирующего полинома идентифицируются к результатам замеров.

Для уравнения (4) расчетная схема соответственно принимает вид

$$w(t + \Delta t) = w(t) + \frac{\chi}{T(t)} \exp\left(\frac{-\beta}{T(t)}\right) \Delta t, \quad w(0) = 0.$$

Параметрическая настройка математической модели

С целью оценки точности математической модели был проведен анализ полученных численных и известных аналитических решений [6, 7] температурной задачи (1), (2). На рис. 1 показаны сравнительные результаты частных случаев приближенного и точных решений. Как видно из рисунка, среднее отклонение приближенного решения от точного составляет около 5%, что можно считать вполне удовлетворительным.

Для проверки адекватности приведенной методики реальным условиям и уточнения параметров внешнего теплообмена вначале была выполнена идентификация математической модели на основе данных, полученных в лабораторных условиях. Результаты сравнения расчетной средней температуры проволоки и экспериментальных данных приведены в [8]. Анализ результатов показал удовлетворительную сходимость расчетной и экспериментальной температуры.

Проведенный затем расчет изменения средней температуры для трех характерных размеров проволоки диаметром 3,15, 2,8 и 2,4 мм при нагреве в печи патентирования БМЗ по существующему температурному режиму [8] показал соответствие результатов расчетов требованиям технологической инструкции: время нагрева составляет 45–65 с (в зависимости от диаметра проволоки), а средняя температура проволоки к концу нагрева — 910–920°C.

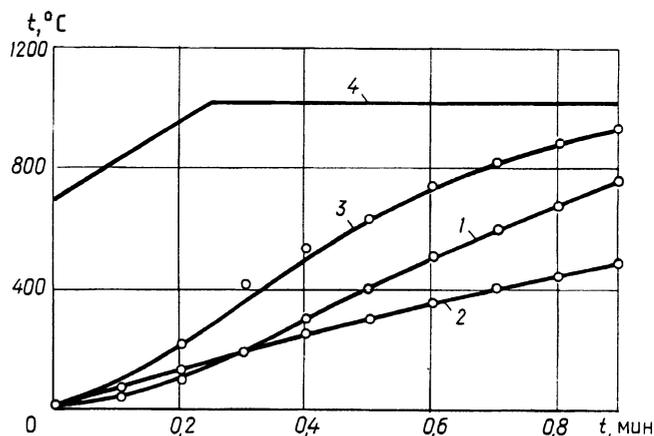


Рис. 1. Сравнение аналитических и численных решений задачи нагрева проволоки в печи патентирования: 1 — нагрев излучением; 2 — конвективный нагрев; 3 — радиационно-конвективный нагрев; 4 — температура печи

Таким образом, полученное численное решение может быть использовано для анализа при разработке новых технологических режимов нагрева проволоки в печах патентирования сталепроволочных цехов РУП "БМЗ" СтПЦ-1, 2.

Настройка математической модели процесса окалинообразования проводилась по данным промышленного эксперимента.

Определение требуемой температуры печи патентирования по заданному температурному режиму нагрева проволоки

Предложенную математическую модель можно использовать для определения температурного режима работы нагревательной печи патентирования, соответствующего требуемой динамике температуры металла.

Однако из нелинейного уравнения (3) найти аналитически величину температуры печи в некоторый произвольный момент времени не представляется возможным. Поэтому приходится решать поставленную задачу численным методом. Обозначим

$$F(T_{\text{пч}}) = \frac{2}{R\rho c} [\alpha(T_{\text{пч}} - T) + \sigma(T_{\text{пч}}^4 - T^4)] - \frac{dT}{dt} = 0. \quad (6)$$

Тогда

$$F'(T_{\text{пч}}) = \frac{2}{R\rho c} [\alpha + 4\sigma T_{\text{пч}}^3].$$

Для определения корня трансцендентного уравнения (6) использовали метод Ньютона (касательных), обладающий высокой скоростью сходимости: как правило, абсолютная точность решения достигается уже через 5–6 итераций. В соответствии с алгоритмом Ньютона процесс определения температуры печи патентирования записывается итерационной формулой

$$T_{\text{пч}}^{(i+1)} = T_{\text{пч}}^{(i)} - F(T_{\text{пч}}^{(i)}) / F'(T_{\text{пч}}^{(i)}).$$

В качестве начального приближения $T_{\text{пч}}^{(0)}$ можно брать температуру металла в заданный момент времени. Учитывая (5), окончательно имеем

$$\frac{T_{\text{пч}}^{(i+1)}(t) - T_{\text{пч}}^{(i)}(t) - \frac{2}{R\rho c} [\alpha(T_{\text{пч}}^{(i)}(t) - T(t)) + \sigma((T_{\text{пч}}^{(i)}(t))^4 - T(t)^4)] - \frac{T(t + \Delta t) - T(t)}{\Delta t}}{\frac{2}{R\rho c} [\alpha + 4\sigma T_{\text{пч}}^3]} = 0,$$

$$T_{\text{пч}}^{(0)}(t) = T(t).$$

Процесс вычисления заканчивается, когда достигается выполнение условия

$$|T_{\text{пч}}^{(i+1)}(t) - T_{\text{пч}}^{(i)}(t)| \leq \varepsilon,$$

где ε — требуемая точность расчетов.

Тепловой баланс печи патентирования

Тепловой баланс печи патентирования складывается из следующих статей: прихода и расхода теплоты.

Приход теплоты.

1. Химическое тепло топлива $Q_{\text{х.т}}$:

$$Q_{\text{х.т}} = Q_{\text{н}}^{\text{р}} B_{\text{г}}^{\text{н}},$$

где $Q_{\text{н}}^{\text{р}}$ — теплотворность топлива; $B_{\text{г}}^{\text{н}}$ — среднечасовой расход топлива на печь.

2. Тепло экзотермических реакций $Q_{\text{экз}}$:

$$Q_{\text{экз}} = G_{\text{ч}} \delta \cdot 0,01 \cdot 1350,$$

$$G_{\text{ч}} = 60\rho(w_1 V_1 n_1 + w_2 V_2 n_2),$$

где $G_{\text{ч}}$ — среднечасовая производительность печи; δ — угар металла при нагреве; ρ — плотность материала проволоки; w_1, w_2 — соответственно скорость проволоки 1 и 2 линий; V_1, V_2 — соответственно объем 1 пог. м проволоки 1 и 2 линий; n_1, n_2 — соответственно количество нитей проволоки на 1 и 2 линиях.

Расход теплоты.

1. Тепло, идущее на нагрев проволоки Q_1 :

$$Q_1 = G_{\text{ч}} c_{\text{сп}} (T_{\text{к}} - T_0),$$

где $c_{\text{сп}}$ — средняя теплоемкость металла; $T_0, T_{\text{к}}$ — соответственно температура металла на входе в печь и выходе из печи.

2. Потери тепла с уходящими газами за котлом-утилизатором Q_2 :

$$Q_2 = \frac{T_{\text{у.г}} - lT_{\text{в}}}{T_{\text{max}}} (c + (h^{\text{за котл}} - 1)BK) Q_{\text{н}}^{\text{р}} B_{\text{г}}^{\text{н}},$$

где $T_{\text{у.г}}$ — температура уходящих газов; $T_{\text{в}}$ — температура воздуха, идущего на горение топлива; $h^{\text{за котл}}$ — коэффициент разбавления сухих продуктов горения; l, c, B, K — некоторые коэффициенты.

3. Тепло, идущее на выработку пара в котле-утилизаторе $Q_{\text{пар}}$:

$$Q_{\text{пар}} = Q_2^{\text{до котл}} - Q_2,$$

где $Q_2^{\text{до котл}}$ — потери тепла с уходящими газами после печи (до котла-утилизатора).

4. Потери тепла через ограждающие поверхности печи и котла-утилизатора Q_3 .

5. Неучтенные потери тепла $Q_{\text{нп}}$:

$$Q_{\text{нп}} = 0,1(Q_2 + Q_{\text{пар}} + Q_3).$$

Тепловой баланс нагревательной печи патентирования, а также технико-экономические показатели ее работы приведены в табл. 2 и 3. Исходные данные: диаметр проволоки — 3,15 мм, скорость — 23,78 м/мин, производительность — 1908 кг/ч. На рис. 2, 3 представлен удельный вес каждой статьи прихода/расхода теплоты в общем тепловом балансе работы нагревательной печи.

Таблица 2. Тепловой баланс нагревательной печи патентирования

Статья прихода	МДж/ч
1. Химическое тепло топлива	3143,97
2. Тепло экзотермических реакций	35,59
Итого	3179,56
Статья расхода	МДж/ч
1. Тепло, идущее на нагрев проволоки	1201,45
2. Потери тепла с уходящими газами за котлом-утилизатором	418,62
3. Тепло, идущее на выработку пара в котле-утилизаторе	710,87
4. Потери тепла через ограждающие поверхности печи и котла-утилизатора	688,79
5. Неучтенные потери тепла	179,83
Итого	3179,56

Таблица 3. Техничко-экономические показатели работы нагревательной печи патентирования

Показатель	Значение
1. Среднечасовой расход топлива на печь V_r^n , м ³ /ч	92,2
2. Удельный расход условного топлива на нагрев 1 т проволоки $b_{уд}$, кг у. т / т	56,22
3. Удельный расход тепла на нагрев 1 кг проволоки $q_{уд}$, МДж/кг	1,67
4. КПД нагревательной печи η , %	37,7
5. Коэффициент использования топлива $\eta_{и.т}$, %	86,83

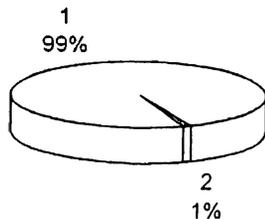


Рис. 2. Удельный вес статей прихода теплоты в общем тепловом балансе: 1 — теплота сжигания топлива; 2 — теплота экзотермических реакций

Нормирование расхода топлива в печах патентирования

Определить величину расхода топлива при нагреве проволоки, необходимую для поддержания требуемой температуры печи патентирования, можно из следующих соображений.

Будем считать, что суммарный приход теплоты в нагревательную печь за некоторый достаточно малый период времени Δt складывается из теплоты Q_T , выделившейся от сжигания топлива за этот период времени, и теплоты экзотермических реакций $Q_{экс}$:

$$Q_T = Q_H^p B(t) \Delta t, \tag{7}$$

$$Q_{экс} = \frac{G\delta}{100} 5652,18 \Delta t, \tag{8}$$

где $B(t)$ — мгновенный расход топлива в момент времени t ; G — мгновенная производительность печи.

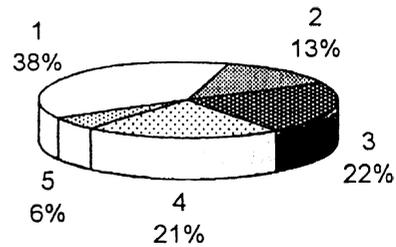


Рис. 3. Удельный вес статей расхода теплоты в общем тепловом балансе: 1 — тепло, идущее на нагрев проволоки; 2 — потери тепла с уходящими газами за котлом-утилизатором; 3 — тепло, идущее на выработку пара в котле-утилизаторе; 4 — потери тепла через ограждающие поверхности печи и котла-утилизатора; 5 — неучтенные потери тепла

С учетом КПД печи патентирования η тепловой поток q , усвоенный поверхностью F нагреваемой проволоки, равен:

$$qF = \eta (Q_T + Q_{экс}). \tag{9}$$

Средняя же температура металла за этот же период времени изменилась на ΔT .

Подставляя (7), (8) в (9) и переходя к пределу при $\Delta t \rightarrow 0$, после некоторых преобразований получаем

$$\frac{dT}{dt} = \frac{\eta}{Mc} \left(Q_H^p B(t) + \frac{G\delta}{100} 5652,18 \right). \tag{10}$$

Следует отметить, что уравнение (10) может использоваться как для определения мгновенного расхода топлива по известной динамике изменения температуры металла, рассчитанной на основе математической модели (1), (2) по заданному температурному режиму работы печи, так и для вычисления температуры проволоки по заданному мгновенному расходу топлива.

Суммарный расход топлива за весь период нагрева t_k определяется по выражению

$$B_{\Sigma} = \int_0^{t_k} B(t) dt.$$

На рис. 4 показаны динамика температуры нагреваемой проволоки и соответствующие изменения мгновенного расхода топлива и технологический режим работы печи патентирования Белорусского металлургического завода, рассчитанные на основе уравнений (3), (10) согласно описанным методикам, при следующих исходных данных.

Сталь — 70К; $\alpha = 52$ Вт/(м²·°С); $\sigma = 4,5 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·°С⁴); $T_0 = 20$ °С; $R = 1,575$ мм; $l = 21,4$ м; $\rho = 7800$ кг/м³; $Q_H^p = 34,1$ МДж/м³; $w = 23,78$ м/мин; $n = 22$; $\delta = 0,33\%$; $t_k = 54$ с; $\eta = 37,7\%$.

Часовой расход топлива печи патентирования составил 90,4 м³/ч.

Предложенная в данной работе методика определения топливопотребления может использоваться для анализа влияния технологических параметров нагрева проволоки в печах патентирования БМЗ на величину расхода природного газа с целью ее дальнейшей минимизации.

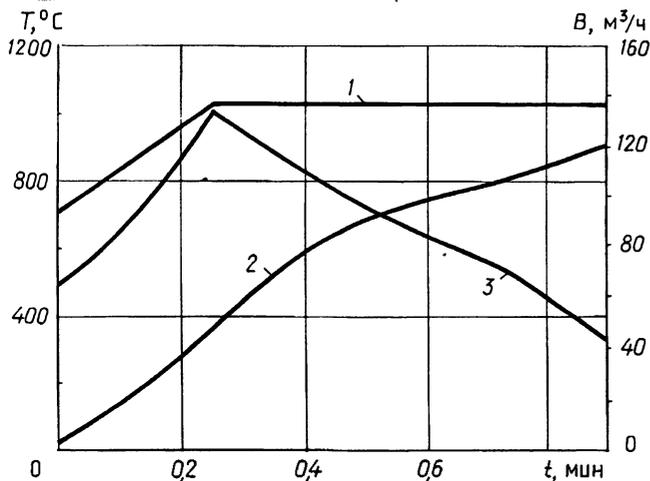


Рис. 4. Динамика температур печи (1) и металла (2) и соответствующий мгновенный расход топлива (3)

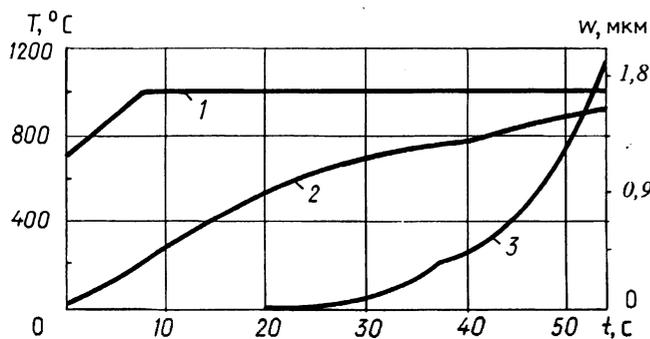


Рис. 5. Оптимальный (теоретический) режим работы печи для проволоки стали 70К диаметром 3,15 мм: 1 — температура печи; 2 — температура металла; 3 — динамика толщины окислы

Минимизация окисления

Проблема окисления металла при нагреве проволоки в печи патентирования является одним из актуальных вопросов. Уменьшение величины окисления проволоки позволяет увеличить выход годного металла, снизить непроизводительные потери теплоты и расходы за межремонтный период эксплуатации печи.

Существуют два принципиально отличающихся технологических подхода к решению поставленной задачи: создание малоокислительной печной атмосферы путем понижения содержания воздуха в сварочной и томильной зонах и последующего повышения его концентрации в первых зонах печи для дожигаания продуктов горения; разработка оптимальных температурных режимов работы печи.

Разработанный на основе метода магистральной асимптотической оптимизации оптимальный с точки зрения окисления температурный режим работы нагревательной печи патентирования является кусочно-непрерывной функцией с конечным числом точек разрыва и имеет вид [9]

$$T_{\text{пч}}^*(t) = \begin{cases} A_1, & 0 \leq t \leq t^*, \\ A_2, & t^* < t \leq t_k, \end{cases} \quad (11)$$

где A_1, A_2 — некоторые константы, определяемые

из технологических соображений; t^* — некоторый момент переключения, при котором обеспечивается нагрев металла до заданной температуры за время t_k .

Таким образом, вначале идет монотонный нагрев металла с минимально возможной температурой греющей среды до температуры интенсивного окисления, а затем форсированный нагрев до требуемой температуры. Как показывают численные расчеты, наилучший эффект достигается при наибольшем отличии A_1 от A_2 . Однако технология патентирования исключает режим форсированного нагрева. На основании предыдущих рассуждений и выводов оптимальный режим нагрева металла (рис. 5) достигался путем изменения печной атмосферы (коэффициента избытка воздуха): I зона — $\alpha_v = 1,05-1,15$; II зона — $\alpha_v = 1,00-1,10$; III зона — $\alpha_v = 1,00-1,10$; IV зона — $\alpha_v = 0,90-1,05$. Расчетная величина слоя окислы снизилась по сравнению с исходным вариантом на 8–12% в зависимости от диаметра проволоки ($\varnothing 2,4; 2,8; 3,15$ мм). Вместе с этим следует отметить, что в печах патентирования при автоматическом регулировании соотношения "топливо—воздух" и температур по зонам (например, [10]) имеется возможность достигнуть более высоких технико-экономических показателей с точки зрения окисления. В соответствии с этим рекомендовано понижение соотношения "топливо—воздух" (коэффициент избытка воздуха) до 0,7–0,8, что и предполагается в перспективе реализовать в условиях РУП "БМЗ" с учетом особенностей действующих теплотехнических процессов и конструкций печных установок.

Литература

1. Тимошпольский В. И., Филиппов В. В., Трусова И. А. Разработки Белорусской государственной политехнической академии для Белорусского металлургического завода и металлургических предприятий стран СНГ // *Литье и металлургия*. 2000. № 3. С. 18–19.
2. Теплообмен и тепловые режимы в промышленных печах / В. И. Тимошпольский, И. А. Трусова, А. Б. Стеблов, И. А. Павлюченков. Мн.: Выш. шк., 1992.
3. Эванс Ю. Р. Коррозия и окисление металлов. М.: Машгиз, 1962.
4. Маковский В. А. Эмпирические формулы для выражения температурной зависимости теплофизических свойств стали // *Сталь*. 1972. № 1. С. 87–89.
5. Велк Г. Формулы для расчета теплофизических свойств стали на ЭВМ // *Черные металлы*. 1971. № 5. С. 48–50.
6. Старк Б. В. Явление нагрева в муфельных печах // *ЖРМО*. 1926. № 2.
7. Иванцов Г. П. Нагрев металла. М.: Металлургиздат, 1948.
8. Самойлович Ю. А., Тимошпольский В. И., Филиппов В. В., Козлов С. М., Хопова О. Г. Расчет процесса нагрева проволоки в печах патентирования // *Литье и металлургия*. 2000. № 1. С. 51–52.
9. Тимошпольский В. И., Козлов С. М., Ковалевский В. Б., Трусова И. А., Филиппов В. В. Решение задач управления нагревом металла на основе метода магистральной асимптотической оптимизации // *Литье и металлургия*. 2000. № 4. С. 103–108.
10. Кирев И. Н., Юрин Р. А., Петровский В. М. и др. А.с. СССР 1177364. Проходная печь // *Открытия. Изобретения*. 1985. № 33. С. 95.