



There are carried out the complex investigations of thermal work of the heating furnace of the mill 250 RUP "Belorussian metallurgical works" using the methods of nonlinear mathematical modeling and the theory of optimal control.

*В. И. ТИМОШПОЛЬСКИЙ, ГНУ «Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова» НАН Беларуси,
Д. Н. АНДРИАНОВ, С. М. КАБИШОВ, БНТУ,
В. А. ТИЩЕНКО, В. А. ЩЕРБАКОВ, РУП «БМЗ»*

УДК 669.012.9

ТЕХНОЛОГИЯ НАГРЕВА ЗАГОТОВОК В ПЕЧИ СТАНА 150 РУП «БЕЛОРУССКИЙ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЙ ЗАВОД» ПРИ МИНИМАЛЬНО ВОЗМОЖНОМ РАСХОДЕ ТОПЛИВА

Преимущества нагревательных печей с механизированным подом и широкое их внедрение на металлургических предприятиях предопределило возрастающий интерес специалистов к изучению процессов теплообмена в рабочем пространстве печи. В 2000 г. при активном участии специалистов РУП «Белорусский металлургический завод», Национальной академии наук Беларуси и Белорусского национального технического университета был осуществлен ввод в эксплуатацию высокоскоростного мелко-сортно-проволочного стана 150 [1–3], имеющего в составе оборудования уникальную нагревательную печь. Отличительными особенностями печи являются переворот заготовки (кантовка) в рабочем пространстве печи, ее небольшие габариты (~20 м) и наличие водоохлаждаемой перегородки (пережима) между зоной предварительного нагрева и зоной форсированного нагрева. Следует отметить, что опыт эксплуатации печей подобного типа практически отсутствует, так как данные печи внедряются в линии прокатных станов в мире только последние 3–4 года и в настоящее время их функционирует не более 5–7 шт.

При проведении комплексных исследований, направленных на освоение проектной мощности нагревательной печи стана 150, были разработаны и внедрены температурно-тепловые режимы нагрева различных марок сталей, обеспечивающие достижение проектной и сверхпроектной производительности в условиях действующего производства [2, 3]. Вместе с тем, постоянное увеличение производства металлопродукции в условиях РУП «БМЗ» на 7–10% в год приводит к необходимости интенсификации технологических процессов и увеличения производительности действующего оборудования.

Ниже приведены результаты исследований, направленных на усовершенствование температурно-тепловых режимов нагрева непрерывнолитых и катаных заготовок сечением 125x125 мм в печи стана 150, обеспечивающих высокое качество нагрева непрерывнолитых заготовок при максимальном достижении экономии энергоресурсов.

По длине нагревательная печь стана 150 разделена на четыре зоны: безгорелочную (неотапливаемую), предварительного нагрева, форсированного нагрева и зону температурной компенсации, которая подразделена в свою очередь на три зоны. Схема печи показана на рис. 1, техническая характеристика приведена в табл. 1.

При проведении исследований тепловой работы печи стана 150 использована комплексная методика, включающая в себя нелинейное математическое моделирование и методы теории оптимального управления, расчеты термонапряженного состояния нагреваемых заготовок и анализ теплотехнических и технико-экономических показателей процесса нагрева.

На первом этапе исследований выполнена серия вычислительных экспериментов, при этом нелинейная математическая модель внутреннего теплообмена включала в себя двумерное уравнение теплопроводности с переменными теплофизическими свойствами и граничные условия лучисто-конвективного теплообмена, в качестве математического аппарата при разработке оптимальных теплотехнологий использован метод магистральной асимптотической оптимизации, хорошо зарекомендовавший себя в задачах металлургических теплотехнологий [4–6].

Как правило, в математической модели нагрева металла в качестве функции, управляющей процессом нагрева, выступает температура печи. Ниже приведен алгоритм управления динамикой изменения температур греющей среды и металла посредством изменения величины мгновенного расхода топлива.

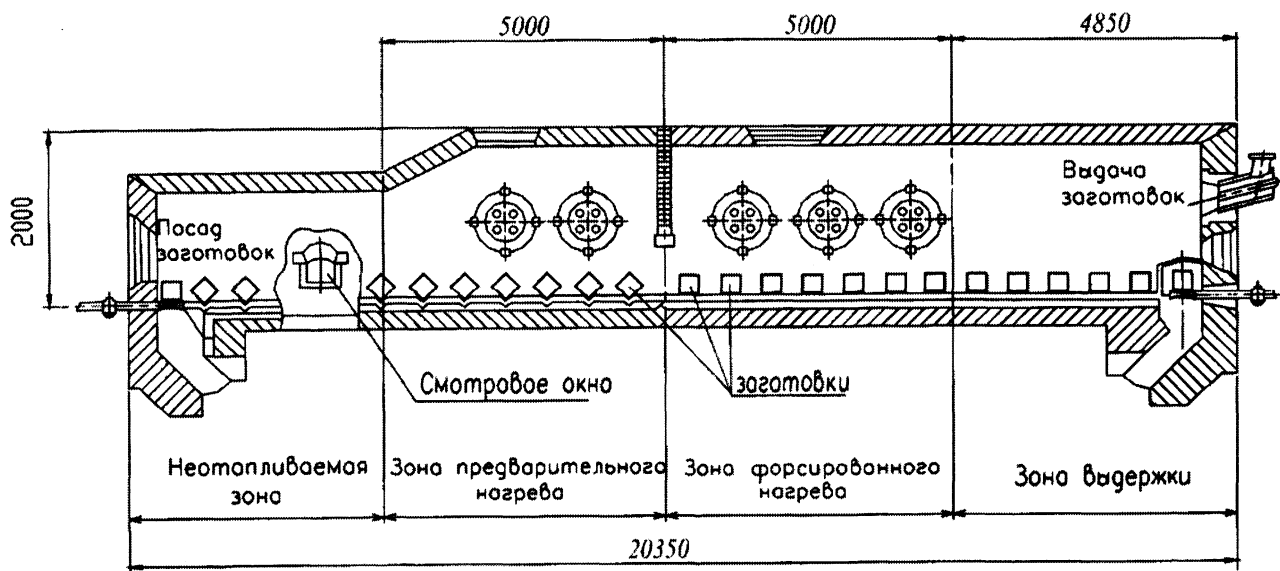


Рис. 1. Схема нагревательной печи стана 150

Таблица 1. Техническая характеристика печи с шагающим подом стана 150

Параметр	Величина
Размеры печи, м:	
эффективная длина пода	20,35
ширина пода	12,80
ширина снаружи	13,41
Количество балок, шт.	3
Максимальная тепловая мощность, МДж/ч	120
Теплота сгорания топлива (природный газ), МДж/м ³	34,4
Количество горелок:	
1-я зона предварительного нагрева, GR16;	4
2-я зона форсированного нагрева, GR22	6
3-я зона температурной компенсации, GR8	2
4-я зона температурной компенсации, GR8	4
5-я зона температурной компенсации, GR8	2
Номинальные размеры заготовок, мм:	
сечение	125×125 и 163×163
максимальная длина	12
температура загрузки, °С	20
температура выгрузки, °С	1250

На основе уравнения теплового баланса для печи непрерывного действия получим уравнение, описывающее динамику изменения температуры печи по следующему закону:

$$\frac{dT_{\text{печ}}(t)}{dt} = A_1 B(t) - A_2 T_{\text{печ}}(t) - A_3 T_{\text{печ}}^4(t) - A_4 \left(\int_0^{R_2} [\alpha(T_{\text{печ}}(t) - T(R_1, y, t)) + \sigma(T_{\text{печ}}^4(t) - T^4(R_1, y, t))] dy + \int_0^{R_1} [\alpha(T_{\text{печ}}(t) - T(x, R_2, t)) + \sigma(T_{\text{печ}}^4(t) - T^4(x, R_2, t))] dx \right) \quad (1)$$

$$T_{\text{печ}}(0) = T_{\text{печ}0} \quad (2)$$

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; t – текущее время; $T(x, y, t)$ – 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; $T_{\text{печ}}(t)$ – температура печи в момент времени t ; α – коэффициент теплообмена конвекцией; σ – коэффициент лучистого теплообмена.

Предположим, что

$$B_1 \leq B(t) \leq B_2, \tag{3}$$

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 (3), который переводит решение уравнения теплопроводности из начального состояния в конечное за время t_k . При этом температура печи удовлетворяет соотношениям (1), (2) и минимизируется суммарный расход топлива

$$I(B) = \int_0^{t_k} B(t) dt. \tag{4}$$

Удельный расход топлива b можно определить как:

$$b = \frac{b_{\Sigma} Q_H^P}{7000P} 4,186,$$

где b_{Σ} – суммарный часовой расход топлива в печи; Q_H^P – удельная теплота сжигания топлива; P – производительность печи.

Для построения оптимального температурно-теплового режима работы печи необходимо найти момент переключения управления $B(t) - \tau^*$.

Для параметрической идентификации сформулированной математической модели выбора оптимального режима нагрева использованы результаты балансовых испытаний печи стана 150, а также данные промышленных экспериментов для условий нагрева в печах с механизированным подом станов 320 и 850 [5–7].

Методика определения оптимального режима нагрева с точки зрения окалинообразования аналогична представленной выше. Кроме того, согласно мнению авторов [8], режимы нагрева металла оптимальные по окалинообразованию, являются рациональными по топливопотреблению. Для оценки величины окалины воспользуемся законом Эванса [9]

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{\chi}{T'(t)} \exp\left(\frac{-\beta}{T'(t)}\right), \tag{5}$$

$$\omega(0) = 0,$$

$$T'(t) = T_{пов}(t) \text{ – для термически массивных тел;}$$

где ω – величина окалины; χ – константа, характеризующая динамику роста окалины; β – отношение энергии активации к газовой постоянной; t – время; $T'(t)$ – температура металла в момент времени t ; $T_{пов}$ – температура поверхности.

На рис. 2 в качестве примера показано изменение температуры в характерных точках сечения заготовки размером 125x125 мм из стали ст.3 при оптимальном распределении топлива по длине печи. Из рисунка видно, что момент переключения попадает на зону температурной компенсации. На основании расчетных теоретических (оптимальных) режимов разработаны рациональные (откорректированные) режимы тепловой работы нагревательной печи стана 150 РУП «БМЗ».

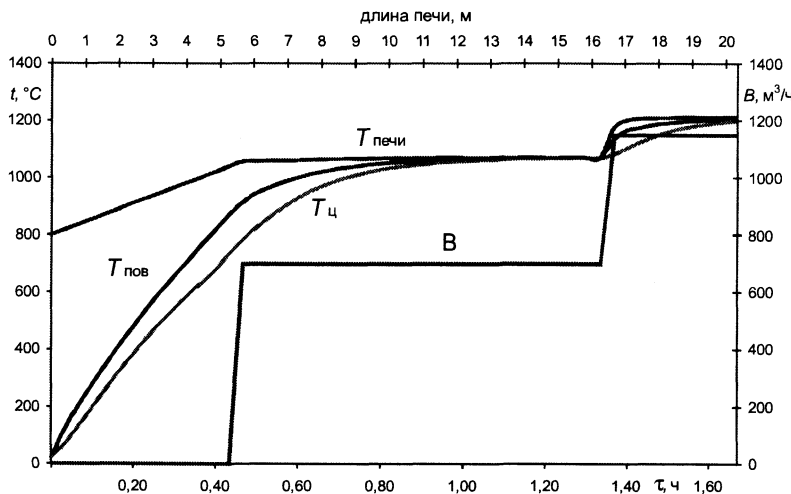


Рис. 2. Распределение расхода газа при нагреве заготовок сечением 125x125 мм из стали ст. 3 в печи стана 150

С целью оценки уровня термонапряженного состояния непрерывнолитых заготовок выполнены расчеты динамики термических напряжений в характерных точках сечения заготовки (на поверхности и в центре) по известной методике [10]. В качестве примера на рис. 3, 4 приведена динамика температур и термических напряжений при нагреве заготовки (сталь ст.3) поперечным сечением 125x125 мм при нагреве по действующему и предлагаемому форсированному режиму. Из рисунков видно, что при нагреве по разработанному режиму представляется возможным

ным сократить время нагрева со 100 до 90 мин, что позволяет повысить производительность печи в среднем на 10–11%.

Для оценки эффективности предлагаемых режимов дополнительно осуществлен расчет тепловых балансов нагревательных печей и основных технико-экономических показателей тепловой работы печей (удельный расход топлива и КПД). Результаты расчета для условий нагрева заготовок сечением 125x125 мм из стали ст. 3 приведены в табл. 2.

Таблица 2. Тепловой баланс нагревательной печи стана 150 при нагреве заготовок сечением 125x125 мм по существующему (числитель) и предлагаемому (знаменатель) режимам

Приход теплоты	МВт	%	Расход теплоты	МВт	%
Химическая теплота топлива	<u>23,23</u>	<u>83,57</u>	Теплота, затраченная на нагрев металла	<u>15,86</u>	<u>57,06</u>
	25,08	82,79		17,41	57,49
Теплота, вносимая подогретым воздухом	<u>3,72</u>	<u>13,40</u>	Потери теплоты с уходящими продуктами горения	<u>7,54</u>	<u>27,11</u>
	4,41	14,56		8,68	28,65
Количество теплоты, выделяемой при окислении Fe	<u>0,84</u>	<u>3,03</u>	Потери теплоты от химической неполноты горения топлива	<u>0,41</u>	<u>1,48</u>
	0,80	2,65		0,44	1,46
			Потери теплоты через кладку	<u>0,92</u>	<u>3,31</u>
				0,87	2,89
			Потери теплоты с охлаждающей водой	<u>2,33</u>	<u>8,39</u>
				2,19	7,22
			Потери теплоты с окалиной	<u>0,24</u>	<u>0,88</u>
				0,23	0,77
			Потери через окна	<u>0,05</u>	<u>0,18</u>
				0,05	0,17
			Неучтенные потери	<u>0,44</u>	<u>1,58</u>
				0,41	1,35
ВСЕГО	<u>27,80</u>	<u>100</u>	ВСЕГО	<u>27,80</u>	<u>100</u>
	30,29	100		30,29	100
Удельный расход условного топлива, кг у.т./т			<u>41,49</u>		
			40,31		
Коэффициент полезного действия печи, %			<u>57,06</u>		
			57,49		

Анализ приведенных данных показывает, что расход условного топлива при нагреве по заводскому режиму (рис. 3) составляет 41,5 кг у.т./т при производительности 68,7 т/ч, использование форсированного режима позволяет снизить данный показатель на 1,18 кг у.т./т и количество окалины в среднем – на 0,8 кг/т (с 0,72 до 0,64%). Сравнительный анализ величины термических

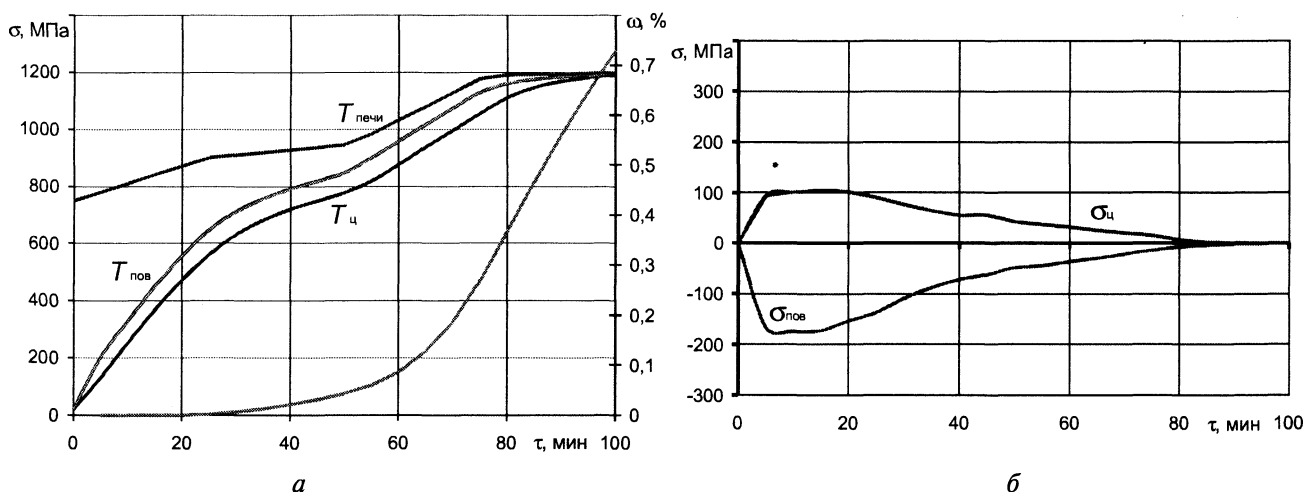


Рис. 3. Динамика температур и термических напряжений в характерных точках сечения заготовки 125x125 мм из стали ст. 3 при нагреве по существующему режиму

напряжений при нагреве заготовок по существующему (рис. 3) и предлагаемому форсированному (рис. 4) режимам показывает, что и в том, и в другом случае уровень термонапряжений не превышает допустимую величину. Последнее дает основание утверждать, что увеличение скорости нагрева не приведет к возникновению дефектов. Аналогичные расчеты нагрева заготовок сечением 125x125 мм проведены для всего марочного состава, нагреваемого в условиях печи стана 150, при этом в зависимости от марки стали и производительности достигнуты следующие показатели тепловой работы печи: удельный расход условного топлива находится на уровне 38–41 кг у.т./т, коэффициент полезного действия – 57–62%.

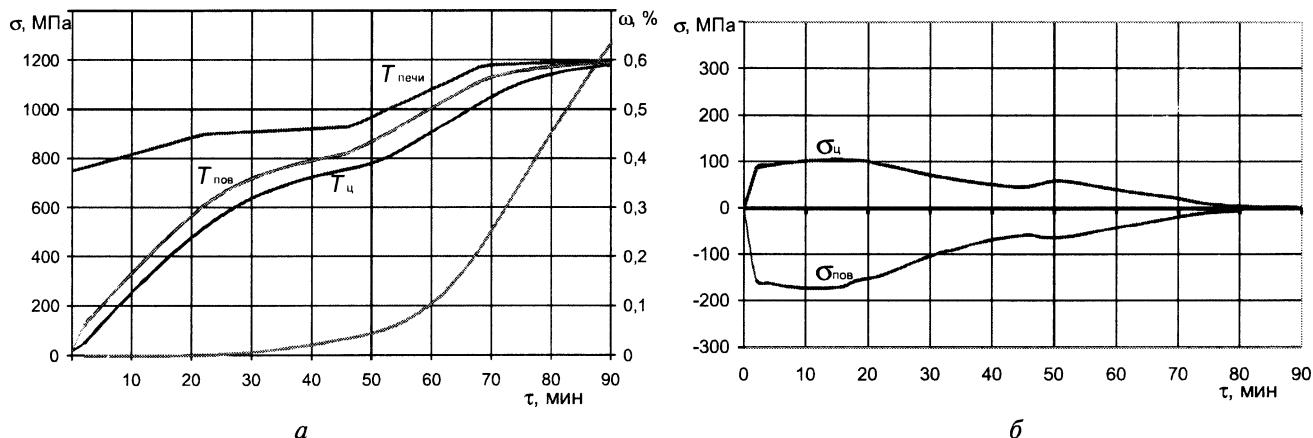


Рис. 4. Динамика температур и термических напряжений в характерных точках сечения заготовки 125x125 мм из стали ст. 3 при нагреве по предлагаемому форсированному режиму

Разработанные режимы прошли опытно-промышленную апробацию и внедрены в действующее производство. По результатам выполненной работы внесены изменения в действующую ТИ 840-ПЗ-01-2002 «Производство катанки и арматурного проката на стане 150» (табл. 3).

Таблица 3. Температурный режим нагрева заготовок в зависимости от профиля в печи стана 150

Профиль, мм	Марка стали	Шаг раскладки заготовок, мм	Температура по зонам печи, °С		
			1	2	3-4-5
Диаметр 5,5 – 6,5	Ст0 – Ст5сп, Св-08ГС, Св-08Г2С, 1008-1038, 1018mod, 1038mod, 10+50, 35ГС, С10D, С18D, С20D, С38D, S235JRG2, C42D, C50D2	250	890–930	1120–1170	1140–1200
	70КО, 70К–85К, 85КУ, 70КЧЛ, 70–85Б, 70БЛ, 70П-85П, 60+85, 60Г+70Г, 1050 – 1080, 20Г2Р, 70РМЛ, 75РМЛ, С76D, SKD70		890–930	1100–1140	1130–1160
Диаметр 7,0 – 14,0	Ст0 – Ст5сп, Св-08ГА, Св-08ГС, Св-08Г2С, 10+50, 25Г2С, 35ГС, 1008-1038, 1018mod, 1038mod, BSt500S, Ат500С, А500С	250	910–950	1170–1210	1190–1240
	70П - 85П, 60+85, 60Г+70Г, 60С2А, 1050 – 1080, 8385, 20Г2Р		910–950	1120–1170	1150–1190
Примечания:	<p>Сжигание топлива в зонах печи при нагреве сталей для металлокорда, пружинной проволоки, сталей для холодной высадки и других марок сталей, на которых контролируется глубина обезуглероженного слоя, производить при следующем соотношении расхода газа к расходу воздуха: 1-я зона – 1:9,0-11,0; 2-я зона – 1:9,0; 3, 4, 5-е зоны – 1:8,5.</p> <p>При снижении производительности стана на профилях диаметром 8,0 – 12,5 мм на 50% от нормативной допускается снижение нижнего предела на 30°С.</p> <p>При простоях стана более 15 мин допускается отключение 1-й зоны и снижение температуры в 3–5-й зонах на 15°С ниже минимальной границы.</p> <p>При переходе на другую группу профилей (по табл. 1) либо при переходе на другую группу марок сталей в пределах профилей диаметром 7,0 – 14,0 мм делать в печи разрыв между плавками не менее 15 шагов.</p>				

Заключение

Выполнены комплексные исследования тепловой работы нагревательной печи современной конструкции, функционирующей в составе оборудования высокоскоростного мелкосортно-проволочного стана 150 РУП «БМЗ».

С использованием методов нелинейного математического моделирования и теории оптимального управления разработан программный продукт, на основе которого выполнены серии компьютерных экспериментов с целью разработки наиболее эффективных для конкретных условий теплотехнологий при нагреве сталей различного марочного состава.

Результаты исследований апробированы и внедрены в условиях действующего производства для нагревательной печи стана 150, при этом удельный расход условного топлива в зависимости от производительности печи находится на уровне 38–41 кг у.т./т, КПД – 57–62%, что соответствует лучшему мировому уровню печных установок с механизированным подом.

Литература

1. Филиппов В.В., Тищенко В.А., Тимошпольский В.И., Маточкин В.А. Новые технические решения при реконструкции прокатного стана 320/150 // Сталь. 2001. № 12. С.5–7.
2. Освоение нагревательной печи новой конструкции в линии прокатного стана 150 РУП «БМЗ» / В.И. Тимошпольский, В.В. Филиппов, В.А. Тищенко и др. // Республ. межвед. сб. науч. тр.: Metallurgia. Мн.: Выш. шк., 2002. № 26. С.3–6.
3. Освоение технологии нагрева непрерывнолитых заготовок в печи стана 150 РУП «БМЗ» / В.И. Тимошпольский, В.В. Филиппов, В.А. Тищенко и др. // Изв. вузов и энерг. объедин. СНГ. Энергетика. 2001. №5. С.64–70.
4. Управление режимом нагрева массивного цилиндра с учетом ограничений на упругопластические температурные напряжения / В.И. Тимошпольский, В.Б. Ковалевский, И.А. Трусова и др. // Изв. вузов. Энергетика, 1987. № 9. С.81–86.
5. Тимошпольский В.И. Теплотехнологические основы металлургических процессов и агрегатов высшего технического уровня. Мн.: Навука і тэхніка, 1995.
6. Стальной слиток. В 3-х т. Т.3. Нагрев / В.И. Тимошпольский, Ю.А. Самойлович, И.А. Трусова, В.В. Филиппов, А.П. Несенчук; Под общ. ред. В.И. Тимошпольского, Ю.А. Самойловича. Мн.: Белорусская наука, 2001.
7. Теплотехнология нагрева высокоуглеродистых марок сталей в печах с механизированным подом РУП «Белорусский металлургический завод» / В.И. Тимошпольский, В.В. Филиппов, И.А. Трусова и др. // Изв. вузов и энерг. объедин. СНГ. Энергетика. 2001. №5. С.71–81.
8. Решение задач управления нагревом металла на основе метода магистральной асимптотической оптимизации / В.И. Тимошпольский, С.М. Козлов, В.Б. Ковалевский и др. // Литье и металлургия. 2000. №4. С. 103–108.
9. Эванс Ю.Р. Коррозия и окисление металлов. М.: Машгиз, 1962.
10. Тайц Н.Ю. Технология нагрева стали. М.: Металлургиздат, 1962.