

УДК 681.5: 681.3

**А.В. Разживин**Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск  
кафедра автоматизации производственных процессовE-mail: [razzhivin@list.ru](mailto:razzhivin@list.ru)**ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА ПЛАВКИ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСАХ «ПЕЧЬ-КОВШ»****Аннотация**

*Разживин А.В. Оптимизация теплового режима плавки в технологических комплексах «Печь-Ковш». Разработан алгоритм оптимального управления восстановительным периодом плавки в дуговых сталеплавильных печах и технологических комплексах «Печь-Ковш», обеспечивающий стабильность качества выплавляемой стали при минимальных энергетических затратах.*

**Ключевые слова:** дуговая печь, температура, математическая модель, алгоритм, функционал, оптимизация.

**Общая постановка проблемы.** В настоящее время металл является основным конструктивным материалом для машиностроительного, судостроительного и других металлоемких производств. В Украине сосредоточено значительное количество металлургических предприятий, на которых более качественные стали выплавляются в дуговых сталеплавильных печах (ДСП) и технологических комплексах «Печь-Ковш». Качество выплавляемой стали определяется его химическим составом и поддержанием температурного режима плавки в окислительный и восстановительный период с точностью  $\pm 10^\circ\text{C}$ . На практике операции контроля температуры жидкого металла осуществляются периодически в ручном или полуавтоматическом режиме с интервалами 15–20 мин. Периоды ненаблюдаемости процесса (между процедурами измерений) вызывают риск перегрева металла, что может сказаться на качестве стали и привести к излишнему расходу потребляемой энергии. До настоящего времени механизмы оптимального управления с учетом соблюдения тепловых параметров плавки не разработаны, так как имеют место неопределенности взаимосвязей технологических параметров, прежде всего, массы расплава, требуемого количества электроэнергии и графика температурного режима плавки. К тому же уникальность оборудования и процессов не позволяют провести целенаправленные экспериментальные исследования картины этих взаимосвязей. В этих условиях для указанных объектов становится очевидной необходимость разработки алгоритма оптимального управления процессом восстановительного периода плавки, обеспечивающего стабильность качества выплавленной стали при минимальных энергозатратах.

**Постановка задачи исследования.**

1) Математическое описание и обоснование критериев оптимизации энергетических и тепловых параметров восстановительного периода плавки металла в технологических комплексах «Печь-Ковш»;

2) Разработать алгоритм оптимального управления восстановительным периодом плавки металла в технологических комплексах «Печь-Ковш», обеспечивающего стабильность качества выплавленной стали при минимальных энергозатратах.

**Решение задачи и результаты исследования.** Процесс теплообмена в восстановительный период плавки в дуговых сталеплавильных печах описан системой дифференциальных уравнений теплопроводности в частных производных [1]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial T_{ш}}{\partial t} = a_1 \left( \frac{\partial^2 T_{ш}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_{ш}}{\partial r} \right) + \delta(r - r_1) Q^*, \\ \frac{\partial T_{м}}{\partial t} = a_2 \left( \frac{\partial^2 T_{м}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_{м}}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_{м}}{\partial x^2} \right) + \delta(x) [F(r, t)]. \end{array} \right. \quad (1) \quad (2)$$

где  $\delta(r - r_1)$ ,  $\delta(x)$  – дельта-функции по соответствующим координатам распространения тепла от электрической дуги;  $F(r, t) = \delta(r - r_1) Q^* + Q_1 [T_{ш}^*(r, t)]$  – параметр, характеризующий мощность источника тепла, которая передается расплаву;  $a_2 = 1/c_m M_m$ ,  $a_1 = 1/c_{ш} M_{ш}$  – тепловые передаточные коэффициенты металла и шлака, соответственно;  $C_m, C_{ш}$  – удельная теплоемкость металла и шлака, соответственно;  $M_m, M_{ш}$  – масса металла и футеровки, соответственно. В уравнения (1-2) приняты следующие допущения: о цилиндрической форме печи и равномерном распределении мощности в фазах короткой сети и о том, что процесс теплопереноса в жидком металле происходит под действием электромагнитного перемешивания или путем продувки металла инертным газом (аргоном). Такое предположение позволяет утверждать об усреднении температуры металла по слоям и равномерном ее распределении по всей длине ковша.

Уравнение (1) описывает теплопроводность в шлаке при наличии внутреннего источника тепла, которым является мощность  $Q^*$ , излучаемая электрической дугой горячей непосредственно в шлаке. Уравнение (2) описывает изменение температуры в расплаве в процессе нагрева до температуры выдержки. Нагрев расплава происходит путем непосредственного нагрева от электрических дуг и конвекционного теплообмена на поверхности шлак-расплав и описывается мощностью источника тепла, входящим непосредственно в уравнение  $F(r, t)$ . На краях расплава происходит конвекционный теплообмен с водоохлаждаемой футеровкой, температура которой измеряется встроенными термопарами. Начальными условиями для уравнений (1) и (2) являются:

$$T_{ш}(r, 0) = T_m(x, r, 0) = T_0, \quad (3)$$

где  $T_0$  – начальная температура расплава и шлака.

При решении уравнений (1) принято допущение, что шлак является теплоизолированным по поверхности шлак-расплав, теплоотдача проходит только по поверхности радиусом  $R$ , а теплообмен между шлаком и расплавом учтем при решении уравнения (2). Граничные условия для уравнения (1):

$$T_{ш}(0, t) < \infty; \quad \frac{\partial T_{ш}}{\partial r} = -\alpha_1 T_{ш} |_{r=R}. \quad (4)$$

Граничные условия для уравнения (2):

$$T_m(0, x, t) < \infty; \quad \frac{\partial T_m}{\partial x} = -\alpha_3 T_m |_{x=l}; \quad \frac{\partial T_m}{\partial r} = -\alpha_2 T_m |_{r=R}; \quad \frac{\partial T_m}{\partial x} = \frac{\partial T_{ш}}{\partial x} |_{x=0}. \quad (5)$$

Следует отметить, что в данных уравнениях управляющий параметр находится в самом уравнении и определяется как мощность источника нагрева  $F^m(r, t)$ , который при разложении в ряд  $\delta(r - r_1) Q^*$  в ряд по функциям Бесселя принимает вид:

$$F^m(r, t) = \delta(r - r_1) Q^* + Q_1^*(r, t) = \left[ \delta(r - r_1) Q^* + \sum_{n=1}^{\infty} Q_n(t) \right] J_0 \left( \frac{\mu_n}{R} r \right), \quad (6)$$

где  $Q^* = \lambda_s \frac{P_d - P_{mn}}{\pi r_s^2}$  – мощность источника тепловой энергии подведенной к расплаву от электрической дуги. Решением системы уравнений (1–5) с усреднением температуры по объ-

ему является зависимость [1]:

$$T_{мсп}(t) = 2R\alpha_2 \sum_{k=1}^{\infty} \left( \sum_{i=1}^{\infty} \frac{J_0(\chi_i)}{\chi_i^2} Q_{ki}(t) \right) \frac{\sin p_k}{p_k}, \quad (7)$$

В зависимости (7)  $Q_{ki}(t)$  определяется выражением (8), а его подынтегральное произведение  $p_i(t)$  – выражением (9), а именно [1]:

$$Q_{ki}(t) = 4T_0 \frac{\alpha_3 h \sin p_k}{p_k [\alpha_3 h + \sin^2 p_k]} \cdot \left[ \frac{\chi_i J_1(\chi_i)}{\chi_i^2 + (\alpha_2 R)^2 J_0^2(\chi_i)} \right] e^{-\alpha_{ki} t} + \frac{2\alpha_3}{\alpha_3 h + \sin^2 p_k} e^{-\alpha_{ki} t} \int_0^t p_i(\tau) e^{\alpha_{ki} \tau} d\tau; \quad (8)$$

$$p_i(t) = \frac{2\chi_i^2}{[\chi_i^2 + (\alpha_2 R)^2 J_0^2(\chi_i)]} \int_0^R r F(r, t) J_0\left(\frac{\chi_i}{R} r\right) dr. \quad (9)$$

Исходя из полученного решения (7) системы уравнений (1-5) задачу оптимального управления энергетическим и температурным (тепловым) режимом плавки в восстановительный период можно сформулировать следующим образом: найти такое действующее значение подведенной мощности от электрической дуги  $p_i(t)$ , чтобы нагрев расплава до заданной температуры  $T_m(\tau^*) = T_{м.з.}$  осуществлялся за минимальное время  $\tau^*$  ( $0 \leq \tau < \infty$ ) при учете ограничения на технологические параметры плавки:

$$\frac{\partial T_m}{\partial t} = f(T_m, p_i(\tau)), \quad (10)$$

где  $\frac{\partial T_m}{\partial \tau} = \Delta T = const$  – скорость нагрева расплава, соответствующая технологическим параметрам плавки.

Регулирование величины подводимой мощности в печь достигается переключением ступеней напряжения печного трансформатора и варьированием силы тока дуги путем изменения межэлектродного промежутка. При оптимизации рассматриваемого периода плавки в ДСП и комплексах «Печь-Ковш» необходимо учитывать, что технологический процесс имеет два этапа, которые описываются директивным графиком плавки, а именно:

1 этап – нагрев расплава от начального состояния  $T_{мсп}(0, x) = T_0$ ,  $\frac{\partial T_{мсп}(0, x)}{\partial t} = 0$  при  $t=0$  до  $T_{мсп}(x, \tau) = T_{мз}$ ,  $\frac{\partial T_{мсп}(\tau, x)}{\partial t} = 0$  при  $t=\tau$ . На этом этапе нагрев расплава целесообразно производить на максимально возможной для определенной марки стали скорости, что позволит сократить продолжительность данного этапа и повысить эффективность восстановительного периода плавки. Задача решается путем минимизации функционала:

$$J_1 = \int_0^{\tau} dt \rightarrow \min, \text{ при } \frac{\partial T_{мсп}(t, x)}{\partial t} = const \quad (11)$$

При расчете оптимальных режимов нагрева металла необходимо учесть ограничения на токи, напряжения и на тепловые нагрузки в рабочем пространстве печи. Так как отклонения от симметричных режимов в современных печах и комплексах «Печь-Ковш» относительно невелики, для уменьшения размерности решаемой задачи принимаем допущение о симметрии трехфазной печи:

$$U(t) = U_1(t) = U_2(t) = U_3(t); \quad I(t) = I_1(t) = I_2(t) = I_3(t). \quad (12)$$

Составим выражения для ограничения электрических параметров. Значения фазного напряжения  $U(t)$  определяется диапазоном переключения ступеней напряжения низкой стороны печного трансформатора:

$$U_{\min} \leq U(t) \leq U_{\max} . \quad (13)$$

Величина тока ограничивается допустимой мощностью печного трансформатора  $S_{\text{дт}}(U(t))$  при его работе на соответствующей ступени напряжения  $U(t)$ :

$$0 \leq I(t) \leq \frac{S_{\text{дт}}(U(t))}{3 \cdot U(t)} . \quad (14)$$

Условие непрерывного горения дуг требует учитывать возможный диапазон изменения тока  $I(t)$ , и относительное падение напряжения на дуге  $U_{\text{д}}(t)$ , определяемое коэффициентом  $\beta$ :

$$I_{\text{дп}} \leq I(t) \leq I_{\text{макс}} ; U_{\text{д}}(t) \approx \beta \cdot U(t) \quad (15)$$

Коэффициент  $\beta$  зависит от периода плавки и принимается равным  $\beta = 0,50 \dots 0,60$  в окислительный и восстановительный период [2]. Тепловые нагрузки в рабочем пространстве печи ограничиваются температурой внутренних поверхностей футерованных стен  $T_{\text{ст}}$  и свода  $T_{\text{св}}$ , а также удельным тепловым потоком, приходящимся на водоохлаждаемые панели стен  $q_{\text{ст}}$  и свода  $q_{\text{св}}$ . Эти ограничения представляются следующими выражениями:

$$T_{\text{ст}} \leq T_{\text{ф}} ; T_{\text{св}} \leq T_{\text{ф}} ; q_{\text{ст}} \leq q_{\text{с}} ; q_{\text{св}} \leq q_{\text{с}} \quad (16)$$

$$\Delta T = \Delta T_{\text{с}} . \quad (17)$$

где  $T_{\text{ф}}$  – максимально допустимая температура футеровки;  $q_{\text{с}}$  – максимально допустимый тепловой поток;  $\Delta T_{\text{с}}$  – заданная скорость нагрева расплава.

Описание оптимального управления энергетическим режимом дуговых печей и комплексов «Печь-Ковш» учитывает ограничения на параметры управления  $U(t)$ ,  $I(t)$  (12–15) и тепловые нагрузки в рабочем пространстве печи (16), а также ограничения на технологический параметр скорости нагрева расплава (17). 2 этап – выдержка расплава при температуре  $T_{\text{мсп}}(t, x) = T_{\text{мз}}$  в течение заданного технологического времени. На данном этапе ставится задача повышения качества жидкого металла путем поддержания температуры выдержки с точностью  $\pm 10^{\circ}\text{C}$ . С целью стабилизации температуры выдержки требуется найти допустимое управление  $F^0(t) = F^m(r, t)$  и соответствующее ему решение  $T_{\text{мсп}}(t_i)$  по зависимости (7), чтобы обеспечить условие:

$$J_2 = \gamma_1 \int_0^{\tau_k} [T_{\text{мз}} - T_{\text{мсп}}(t)]^2 dt \rightarrow \min , \quad \text{при } F = F^0(t) \text{ и } T_{\text{мсп}}^0(t) = T_{\text{мз}} . \quad (18)$$

где  $\tau_k$  – фиксированный момент времени равный периоду выдержки расплава;  $T_{\text{мз}}$  – заданное значение температуры выдержки расплава. С учетом особенностей технологического процесса восстановительного периода плавки, периодического контроля температуры расплава и принятых критериев оптимальности разработан алгоритм оптимального управления (см. рис. 1). Алгоритм реализован с помощью программного регулятора, который функционально представляет собой задатчик директивного графика плавки. Входными параметрами, формирующими директивный температурный график плавки являются: масса металла и добавок,  $m$ ; начальная температура,  $^{\circ}\text{C}$ ; температура обработки металла и выпуска металла,  $^{\circ}\text{C}$ ; время обработки, мин; максимальное время, отведенное для выпуска металла, *мин*.

Выходом регулятора является задаваемая скорость нагрева расплава в соответствии с директивным графиком плавки. В качестве обратной связи в периоды между замерами температуры расплава используется полученная на модели усредненная по объему ковша температура. Оптимизация процесса плавки жидкого металла производится по функционалу (10–18). Последовательность выполнения алгоритмических операций:

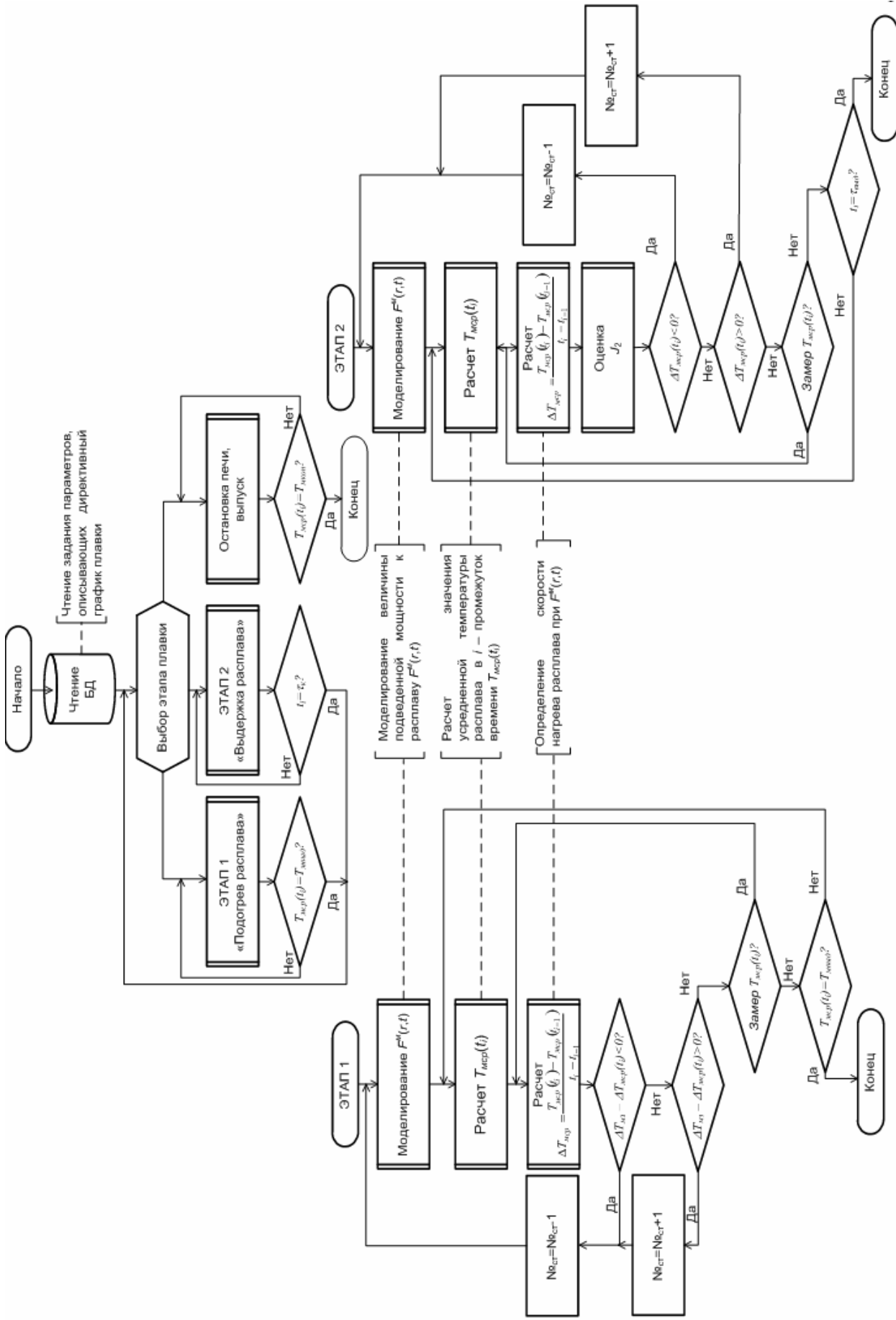


Рисунок 1 - Алгоритм оптимального управления тепловым режимом плавки

1. Получение входных данных на формирование директивного графика плавки.
2. Оптимальный нагрев расплава до температуры выдержки по функционалу (10). Задание и программная коррекция максимальной скорости нагрева расплава с учетом ограничений (12–18).
3. Достижение температуры выдержки металла.
4. Переход в режим поддержания стационарного температурного режима расплава, по функционалу (18). Удержание температуры выдержки с точностью  $\pm 10^\circ\text{C}$ , путем компенсации тепловых потерь. Необходимое регулирование осуществляется переключением ступеней напряжения печного трансформатора.
5. Истечение времени выдержки.
6. Охлаждение расплава до температуры выпуска производится с продувкой аргоном на ступени печного трансформатора, которая обеспечивает заданную скорость охлаждения.
7. Достижения температуры выпуска. Конец обработки расплава в комплексе «ПЕЧЬ-КОВШ».

#### **Выводы.**

1. Разработана математическая модель описывающая взаимодействие энергетических и тепловых параметров восстановительного периода плавки в ДСП и технологических комплексах «Печь-Ковш».

2. Сформулирована и алгоритмически реализована задача оптимального управления восстановительным периодом плавки, обеспечивающая минимизацию энергозатрат при подогреве расплава до температуры выдержки и стабильность качества выплавленной стали на этапе выдержки.

#### **Литература**

1. Разживин А.В. Тепловая модель технологической системы / А.В. Разживин, А.А. Сердюк // Надежность инструмента и оптимизация технологических систем: Тезисы докладов VIII-й Всеукраинской научно-технической конференции "Перспективные технологии и оборудования обработки давлением в машиностроении и металлургии" (г. Краматорск, 23 – 25 апреля 2001 г.). – Краматорск: ДГМА, 2001. – С. 44.
2. Гитгарц Д.А. Автоматизация плавильных электропечей с применением микро-ЭВМ / Д.А. Гитгарц. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 136 с. – (Б-ка электротермиста; Вып. 73).
3. Егоров А.И. Основы теории управления / А.И. Егоров. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. – 504 с. – ISBN 5-9221-0543-4.

#### **Abstract**

**Razzhivin A.V. Optimization of a thermal mode of fusion in technological complexes "Furnace-ladle".** The algorithm of optimum control by the regenerative period of fusion in arc steel-smelting furnaces and technological complexes the "Furnace-ladle", providing stability of quality of a melted steel is developed at the minimum power expenses.

**Keywords:** the arc furnace, temperature, mathematical model, algorithm, functional, optimization.

#### **Анотація**

**Разживін О.В. Оптимізація теплового режиму плавки в технологічних комплексах «Піч-Ківш».** Розроблено алгоритм оптимального керування відбудовним періодом плавки в дугових сталеплавильних печах і технологічних комплексах «Піч-Ківш», який забезпечує стабільність якості виплавленої сталі при мінімальних енерговитратах.

**Ключові слова:** дугова піч, температура, математична модель, алгоритм, функціонал, оптимізація.

Здано в редакцію:  
03.03.2010р.

Рекомендовано до друку:  
к.т.н, доц. Маренич К.М.