

Выводы

Таким образом, нами рассмотрена модельная задача протекания джозефсоновского тока через туннельный переход с разупорядоченным слоем изолятора. Исследовано влияние температуры на зависимость джозефсоновского тока I от разности фаз волновых функций φ для сверхпроводящих туннельных контактов со сверхтонким диэлектрическим слоем в соответствии с формулой Шеп-Бауэра [4]. Взаимосвязь ток - разность фаз в сверхпроводниках для S-I-S системы найдена нами в рамках модели разупорядоченного потенциального барьера, разделяющего сверхпроводящие берега туннельного джозефсоновского контакта. Отметим, что полученные при таком подходе результаты объясняют высокие значения джозефсоновского тока при различных температурах. Усреднённая кривая на рис. 1 показывает возможность использовать джозефсоновские структуры со сверхтонким, порядка нанометра толщиной, слоем диэлектрика на практике при низких температурах, и получать при этом значительные бездиссипативные токи, без тех ограничений, которые накладываются на чувствительность сверхпроводящих приборов тепловые шумы. Тем не менее, вопрос влияния электрических шумов на работу основных элементов сверхпроводящей электроники все еще требует детальных исследований. Возможны дальнейшие экспериментальные измерения температурной зависимости $I(\varphi)$, численный расчет которой выполнен в данной работе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Anders S., Blamire M. G., Buchholz F.-Im., *et al.* European roadmap on superconductive electronics – status and perspectives // *Physica C: Superconductivity*. — 2010. — V. 470. — № 23–24. — P. 2079–2126.
2. Dimitrova O. V., Feigel'man M. V. Two-dimensional S-N-S junction with Rashba spin-orbit coupling // *Journal of Experimental and Theoretical Physics*. — 2006. — V. 102. — № 4. — P. 652–660.
3. Tolpygo S. K., Amparo D. Electrical stress effect on Josephson tunneling through ultrathin AlO_x barrier in Nb/Al/ AlO_x /Nb junctions // *Journal of Applied Physics*. — 2008. — V. 104. — № 6. — P. 063904–1 — 063904–10.
4. Schep K. M., Bauer G. E. W. Universality of transport through dirty interfaces // *Physical Review Letters*. — 1997. — V. 78. — № 15. — P. 3015–3018.
5. Белоголовский М. А., Бойло И. В., Шатерник В. Е. Универсальный характер туннельной проводимости гетероструктур металл-изолятор-металл с наноразмерными оксидными прослойками // *Успехи физики металлов*. — 2011. — Т. 12. — № 2. — С. 157–182.
6. Beenakker C. W. J. Universal limit of critical-current fluctuations in mesoscopic Josephson junctions // *Physical Review Letters*. — 1991. — V. 67. — № 27. — P. 3836–3839.

пост.24.09.13

Моделирование процессов тепловой обработки заготовок в печах при произвольном характере изменения расхода топлива во времени

А. Б. БИРЮКОВ

Донецкий национальный технический университет

Отработан метод решения задачи моделирования процессов тепловой обработки заготовок в печах при произвольном характере изменения расхода топлива во времени, основанный на построении моментального теплового баланса газового объема печной камеры в виде дифференциального уравнения первого порядка, его разрешении относительно средней температуры продуктов сгорания в камере печи и использовании этих значений для задания граничных условий теплообмена на поверхности заготовок.

Опрацьовано метод рішення задачі моделювання процесів теплової обробки заготовок в печах при довільному характері зміни витрати палива в часі, що заснований на побудові моментального теплового балансу газового об'єму пічної камери у вигляді диференційного рівняння першого порядку, його рішення відносно середньої температури продуктів згоряння в камері печі і використанні цих значень для завдання граничних умов теплообміну на поверхні заготовок.

Method for ingots heat processing in furnaces mathematical simulation on fuel flow rate arbitrary change in time is worked out which bases on furnace chamber gas volume momentous heat balance construction in the form of first order differential equation, deriving from it average waste gases temperature in furnace chamber and use of these values for heat exchange boundary conditions on ingots surface setting.

Проблема исследования в общем виде. Одной из важнейших задач металлургической теплотехники является сокращение расхода топлива на реализацию операций тепловой обработки заготовок в печах. Перспективное направление решения этой задачи заключа-

ется в использовании технологий импульсного отопления агрегатов, которые предполагают изменение расхода топлива по определенному временному закону или на основании сигналов датчиков системы АСУ ТП. Для эффективного освоения этих технологий важны разра-

ботка и совершенствование основ математического моделирования импульсных процессов отопления печей.

Анализ состояния вопроса. В литературных источниках есть сведения о различных технологиях импульсного отопления, позволяющих достигать экономии топлива. Однако в настоящее время отсутствует стройное научное описание теплотехнических процессов при импульсном отоплении. Достижимая экономия топлива от перехода на импульсный режим отопления, согласно разным источникам, достигает, как правило, 5-15% [1-3].

Техническая сущность импульсного отопления заключается в колебательном изменении расхода топлива (и соответственно, воздуха) по определенному временному закону или на основании сигналов датчиков системы АСУ ТП о достижении граничных значений некоторых величин (давления, температуры и т.д.). Очевидно, что крайним случаем импульсного процесса является технология с полным периодическим отключением топлива и запирианием печи.

При упрощенном моделировании процессов тепловой обработки заготовок в печах без использования зональных методов применяют задание изменения во времени и пространстве температуры теплообмениваемой среды, в результате чего сперва определяется поле итоговых коэффициентов теплоотдачи, а затем – температурное поле металла, после чего при помощи специальных расчетных зависимостей восстанавливается изменение во времени расхода теплоносителя: продуктов сгорания (и соответственно топлива) [4-6]. Так, для нагрева металла под прокатку в высокотемпературных печах в двух периодах: с постоянным тепловым потоком и постоянной температурой печи по аналогии с аналитической методикой устанавливается изменение температур продуктов сгорания в течение всего периода нагрева, что позволяет восстановить поле итоговых коэффициентов теплоотдачи. Текущий расход топлива для нагрева определяется в каждый момент времени на основании тепловых потоков к поверхности металла и температуры теплоносителя, покидающего агрегат:

$$B_2^{mek}(\tau) = \frac{q(\tau) \cdot F_m}{\eta(t_{yx}(\tau)) \cdot Q_H^p} + \frac{Q_{пот}(\tau)}{\eta(t_{yx}(\tau)) \cdot Q_H^p},$$

где $q(\tau)$ – текущая плотность теплового потока, падающего на поверхность металла, Вт/м²;

F_m – поверхность нагреваемого металла, м²;

$Q_{пот}(\tau)$ – текущая мощность тепловых потерь, Вт;

$\eta(t_{yx}(\tau))$ – значение коэффициента использования топлива, вычисленное для текущей температуры газов, покидающих камеру печи.

Итоговое количество израсходованного топлива за период нагрева продолжительностью τ_n :

$$B_2^{umog} = \int_0^{\tau_n} B_2^{mek}(\tau) \cdot d\tau.$$

Описанный выше метод задания граничных условий удобен для моделирования тепловой обработки заготовок в печах, в которых расход топлива в течение технологического процесса меняются с малой скоростью (не более 15%/ч) и не может быть применен для случая реализации импульсных технологий отопления,

предполагающих циклическое изменение расходов топлива с довольно значительными частотой и амплитудой.

Постановка проблемы исследования. Задачей данной работы является создание и отработка метода решения задачи моделирования процессов тепловой обработки заготовок в камерных нагревательных печах периодического действия при произвольном характере изменения расхода топлива во времени.

Изложение основного материала. Основой решения поставленной задачи является определение изменения во времени температуры продуктов сгорания, заполняющих камеру печи, и соответственно поля коэффициентов теплоотдачи к поверхности заготовок, подвергающихся тепловой обработке. Для реализации такого метода необходимо создание математического описания изменения температуры продуктов сгорания в печи при произвольном характере изменения расхода топлива.

Для определения динамики изменения температуры продуктов сгорания для нагревательной печи периодического действия в зависимости от заданного расхода теплоносителя составлено дифференциальное уравнение первого порядка. При его создании использовалось предположение о том, что температура продуктов сгорания равномерна по всему объему камеры печи и равна значению температуры газов на выходе из камеры печи t_{yx} :

$$\frac{dt_{yx}}{dt} = \frac{V_m \cdot Q_H^p - q \cdot F_m - Q_{nom} - V_{yx} \cdot c^{t_{yx}} \cdot t_{yx} \cdot (1 - k_r)}{V_k \cdot c^{t_{yx}}}, \quad (1)$$

где V_t – текущий расход топлива, м³/с;

Q_H^p – теплота сгорания топлива, Дж/м³;

V_k – объем газов, заполняющих рабочую камеру, м³;

q – текущее значение плотности теплового потока, падающего на металл, Вт/м²;

F_m – поверхность металла, воспринимающая тепло, м²;

$Q_{пот}$ – текущее значение теплотерь (через футеровку, излучением в пламенное окно, с охлаждающей водой и т.д.), Вт;

V_{yx} – объемный расход продуктов сгорания, покидающих печь, м³/с;

$c^{t_{yx}}$ – теплоемкость продуктов сгорания при их температуре, Дж/(м³·К);

k_r – текущее значение коэффициента рекуперации.

Предложенное дифференциальное уравнение представляет собой моментальный тепловой баланс камеры печи, который уравнивается в результате определения текущей температуры продуктов сгорания. То есть при преобладании прихода тепла над расходом имеем рост теплосодержания продуктов сгорания в камере печи и соответственно рост их температуры и наоборот.

Для перехода от найденных значений температуры продуктов сгорания в камере печи к заданию граничных условий третьего рода необходимо, определив плотность лучистого теплового потока q_l , по следующей зависимости вычислить значение лучистой составляющей коэффициента теплоотдачи:

$$\alpha_l = \frac{q}{T_{yx} - T_n}, \quad (2)$$

где T_{yx} , T_n – температуры продуктов сгорания и поверхности заготовок соответственно, К.

Плотность лучистого теплового потока определяется как:

$$q = C_{\partial} \cdot \left[\left(\frac{T_{yx}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_n}{100} \right)^4 \right], \quad (3)$$

где C_{∂} – приведенный коэффициент излучения для системы тел газ-кладка-металл, Вт/(м²·К⁴).

Для камерных печей периодического действия для определения приведенного коэффициента излучения системы тел газ-кладка-металл используется следующее выражение:

$$C_{\partial} = \frac{C_0 \cdot \varepsilon_2 \cdot \varepsilon_M}{\varepsilon_2 + \varphi_{KM} \cdot \varepsilon_M \cdot (1 - \varepsilon_2)}, \quad (4)$$

где $C_0 = 5,67$ – коэффициент излучения абсолютно черного тела, Вт/(м²·К⁴);

$\varepsilon_r, \varepsilon_M$ – степени черноты продуктов сгорания и поверхности металла соответственно;

φ_{KM} – угловой коэффициент для систем тел кладка-металл.

На практике степень черноты поверхности нагреваемой стали принимают равной 0,8-0,85. Для других материалов значение этой величины находят в справочной литературе.

Для определения степени черноты газов используют следующую зависимость:

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_{CO_2} + \xi \cdot \varepsilon_{H_2O}, \quad (5)$$

где $\varepsilon_{CO_2}, \varepsilon_{H_2O}$ – степени черноты углекислоты и водяных паров соответственно, определяются в зависимости от средней длины хода луча между поверхностями теплообмена S , парциального давления соответствующих компонентов и температуры продуктов сгорания;

ξ – поправочный коэффициент, учитывающий неодинаковую степень влияния газовой среды и

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{dt_{yx}}{d\tau} &= \frac{V_m \cdot Q_{\partial}^p - F_M \cdot \left(C_{np} \cdot \left(\frac{t_{yx} + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{t_T + 273}{100} \right)^4 \right) + \alpha \cdot (t_{yx} - t_T) - Q_{ном} - V_{yx} \cdot c^{t_{yx}} \cdot t_{yx} \cdot (1 - k_r)}{V_K \cdot c^{t_{yx}}} \\ \frac{dt_T}{d\tau} &= \frac{C_{np} \cdot \left(\frac{t_{yx} + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{t_T + 273}{100} \right)^4 + \alpha \cdot (t_{yx} - t_T)}{0,5 \cdot \eta_0 \cdot \rho_m \cdot c_m} \end{aligned} \right.$$

где C_{np} – приведенный коэффициент излучения, для определения лучистого потока, падающего на поверхность термического тонкого тела в агрегате, Вт/(м²·К⁴);

r_0 – радиус термически тонкого тела, м;

ρ_r – плотность изучаемого тела, кг/м³;

c_r – удельная теплоемкость изучаемого тела, Дж/(кг·К).

Для решения этой системы дифференциальных уравнений была составлена соответствующая расчетная модель в пакете инженерных вычислений MathCAD.

Для решения поставленного вопроса был проведен численный эксперимент для следующих исходных данных: топливо – природный газ с $Q_{np} = 35800$ кДж/м³; $r_0 = 0,2$ м; $\rho_r = 7800$ кг/м³; $c_r = 500$ Дж/(кг·К). Условное время нагрева 1800 с, изначально выбранная для расчета температура продуктов сгорания, заполняющих камеру печи 1200°С; начальная температура материала – 0°С, теплопринимающая поверхность нагреваемого материала 94,25 м². Значение коэффициента рекупера-

парциального давления на энергию излучения водяных паров; определяется в зависимости от средней длины хода луча между поверхностями теплообмена S , парциального давления водяных паров.

Средняя длина хода луча между поверхностями теплообмена определяется как:

$$S = 3,6 \frac{V_K}{F_M + F_{KL}}, \quad (6)$$

где F_M, F_{KL} – поверхности металла и кладки, участвующие в лучистом теплообмене, м²

Угловой коэффициент для систем тел кладка-металл определяется следующим образом:

$$\varphi_{KM} = \frac{F_M}{F_{KL} + F_M}. \quad (7)$$

Пример использования выражения (1), описывающего динамику изменения температуры продуктов сгорания, заполняющих камеру печи и соответственно позволяющего задавать граничные условия теплообмена на поверхности заготовок, проиллюстрирован для моделей нагрева термически тонких тел и реальных массивных тел.

Модель нагрева термически тонких тел

Эта модель включает в себя два дифференциальных уравнения 1-го порядка. Первое описывает изменение температуры продуктов сгорания, заполняющих камеру печи, причем тепловой поток, падающий на поверхность материала в общем случае, представлен как сумма двух составляющих: лучистой и конвективной, определяемых в каждый момент времени в зависимости от текущей температуры продуктов сгорания и температуры термически тонкого тела. Второе уравнение описывает нагрев термически тонкого тела цилиндрической формы.

Значение коэффициента конвективной теплоотдачи принято равным нулю. Теплопроводность и плотность материала изоляционной конструкции печи приняты стремящимися к нулю, таким образом, потери тепла на аккумуляцию кладкой и теплопередачей через ограждающую конструкцию в окружающую среду приняты равными нулю.

Для исследования выбран косинусоидальный закон изменения расхода топлива:

$$V(\tau) = V_{баз} + V_{доб}^{зад} \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot \nu \cdot \tau);$$

где $V_{баз}$ – базовая составляющая расхода топлива, м³/с;

$V_{доб}^{зад}$ – заданная добавочная составляющая расхода топлива, м³/с;

ν – частота колебаний расхода топлива, с⁻¹.

На рис. 1 приведены результаты моделирования для параметров изменения расхода топлива: $V_{баз} = 0,45$ м³/с, $V_{доб}^{зад} = 0,4$ м³/с.

Из анализа результатов видно, что расчетный алгоритм является устойчивым, так как, несмотря на заданное большое значение амплитуды изменения расхода топлива расчетный алгоритм не уходит «в разнос». Полученные параметры изменения температуры продуктов сгорания, заполняющих камеру печи, не противоречат практическому опыту и простейшим расчетным оценкам. Таким образом, можно утверждать, что предложенная модель не несет в себе грубых ошибок, а ее

более детальная адаптация к реальным производственным условиям может быть выполнена при помощи методов начальной или оперативной подстройки. Сферой применения созданной модели является изучение импульсного процесса отопления печных агрегатов, предназначенных для тепловой обработки заготовок из высокотеплопроводных металлов, например, нагрев алюминиевых сплавов под штамповку в авиационной промышленности.

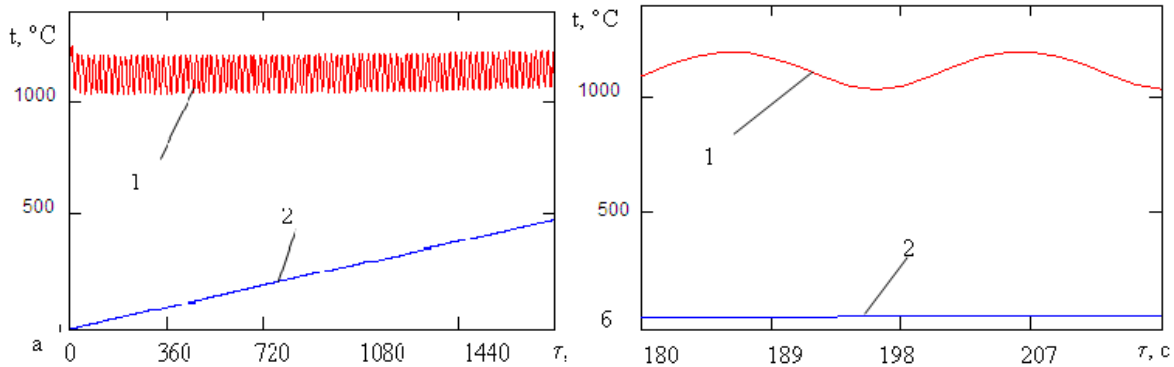


Рис. 1. Нагрев материала при косинусоидальном законе изменения расхода топлива ($V_{\text{газ}}=0,45 \text{ м}^3/\text{с}$, $V_{\text{доб}}^{\text{зад}}=0,4 \text{ м}^3/\text{с}$) а – период нагрева до 1800с; б – более подробный фрагмент нагрева; 1 – температура газовой среды, 2 – температура материала

Модель нагрева реальных тел

При исследовании импульсного нагрева реальных термически массивных тел внутреннюю задачу теплообмена решаем при помощи дифференциального уравнения нестационарной теплопроводности, а для задания граничных условий теплообмена на каждом временном шаге (решение внешней задачи теплообмена) используем выражения (1—7). Вопросы решения внутренней тепловой задачи для технологий тепловой обработки заготовок в печах детально рассмотрены в работе [6].

Для иллюстрации использования предложенного метода моделирования приняты следующие исходные данные: топливо – природный газ с $Q_{\text{нр}}=35800 \text{ кДж/м}^3$; радиус цилиндрической заготовки $r=0,2 \text{ м}$; $\rho_r=7700 \text{ кг/м}^3$; зависимость теплоемкости материала нагреваемого тела от температуры

$$c = 365 + 1.205 \cdot t - 1.264 \cdot 10^{-3} \cdot t^2 + 3.845 \cdot 10^{-7} \cdot t^3$$

Дж/(кг·К); зависимость коэффициента теплопроводности от температуры

$$\lambda(t) = 51.7 - 3.76 \cdot 10^{-4} \cdot t - 8.578 \cdot 10^{-5} \cdot t^2 + 5.979 \cdot 10^{-8} \cdot t^3$$

. Условное время нагрева составляло 1800 с. Поверх-

ность материала $94,25 \text{ м}^2$, свободный газовый объем камеры печи 250 м^3 . Теплотери рабочей камеры приняты равными нулю. Значение коэффициента конвективной теплоотдачи принято $20 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$.

Рассмотрен косинусоидальный закон импульсной подачи топлива с частотой $0,05 \text{ Гц}$, базовой составляющей расхода топлива $0,45 \text{ м}^3/\text{с}$, и добавочной составляющей $0,2 \text{ м}^3/\text{с}$. Результаты моделирования представлены на рис. 2.

Также как и в предыдущем случае, результаты на рис. 2 не противоречат практическому опыту и простейшим расчетным оценкам. Таким образом, можно утверждать, что предложенная модель не несет в себе грубых ошибок, а ее более детальная адаптация к реальным производственным условиям может быть выполнена при помощи методов начальной или оперативной подстройки. Данная модель технологий импульсной тепловой обработки заготовок в печах носит универсальный характер и может быть использована для любых характеристик печных агрегатов, произвольных геометрических и теплофизических параметров заготовок.

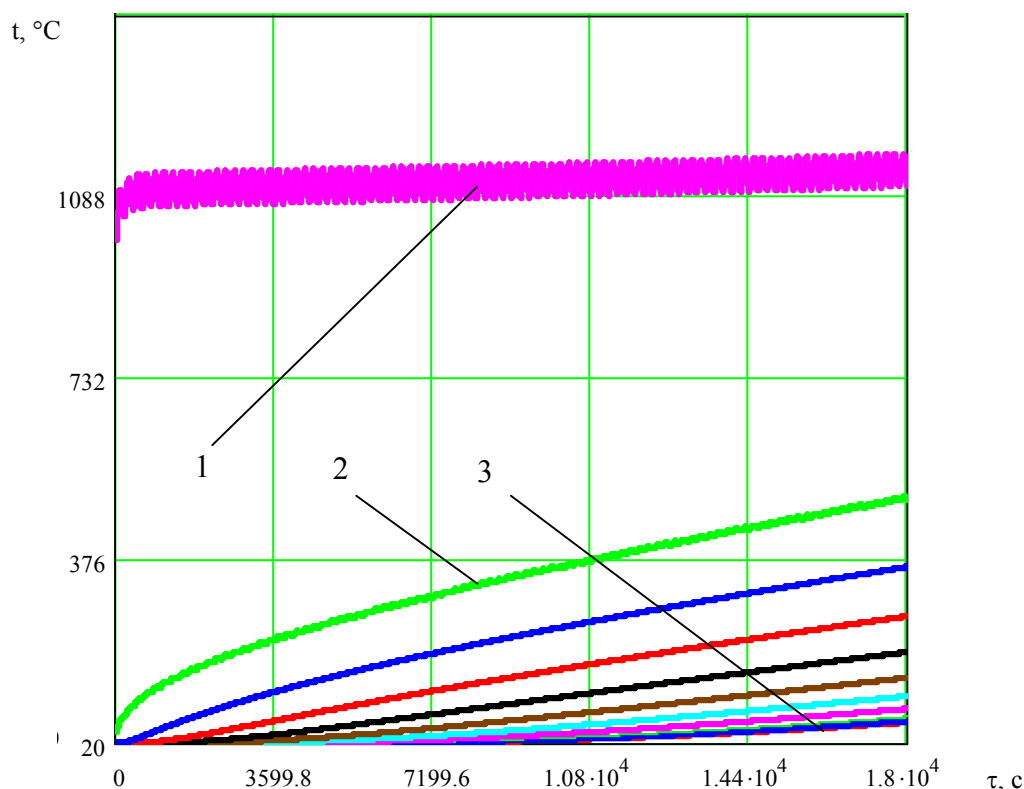


Рис. 2. Динамика нагрева изучаемого тела при импульсном нагреве по косинусоидальному закону (1 – температура дыма, 2 – температура поверхности заготовки, 3 – температура центра заготовки)

Выводы

Создан метод решения задачи моделирования процессов тепловой обработки заготовок в печах при произвольном характере изменения расхода топлива во времени, основанный на построении моментального теплового баланса газового объема печной камеры в виде дифференциального уравнения первого порядка, его разрешении относительно средней температуры продуктов сгорания в камере печи и использовании этих значений для задания граничных условий теплообмена на поверхности заготовок. Решение данной задачи отработано для моделей нагрева термических тонких и реальных тел. В обоих случаях установлено, что результаты моделирования не противоречат практическому опыту и простейшим расчетным оценкам. Таким образом, можно утверждать, что предложенные модели не несут в себе грубых ошибок, а их более детальная адаптация к реальным производственным условиям может быть выполнена при помощи методов начальной или оперативной подстройки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ревун М. П., Баришенко А. И., Чепрасов А. И., Башлий С. В., Андриенко А. Н. Новые схемы импульсного отопления нагревательных и термических печей // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. — 2005. — № 3. — С. 97—100
2. Мороз В. И., Егорова В. М., Гусев С. В. Нагрев валков холодной прокатки и роликов МНЛЗ под термическую обработку в печи с импульсной подачей теплоносителя // *Кузнечно-штамповочное производство и обработка металлов давлением*. — № 8. — 2002. — С. 29—34.
3. Неймарк Л. А., Гречишников Я. М., Энно И. К., Милосердов А. В., Белов М. Л. Сравнительные испытания импульсного и непрерывного отопления термической печи // *Кузнечно-штамповочное производство*, 1987. — №9. — С. 35—37.
4. Ткаченко В. Н. Математическое моделирование, идентификация и управление технологическими процессами тепловой обработки материалов / В. Н. Ткаченко // Т. 13. — Сер. «Задачи и методы: математика, механика, кибернетика». — Киев : Наукова думка, 2008. — 244 с.
5. Гинкул С. И. Математическое моделирование энергосбережения при нагреве и охлаждении слитков / С. И. Гинкул // *Сборник научных трудов ДонГТУ, Metallurgy*, вып. 14. — Донецк, ДонГТУ. — 1999. — С. 98—106.
6. Бирюков А. Б. Энергоэффективность и качество тепловой обработки материалов в печах / А. Б. Бирюков. — Донецк : Ноулидж, 2012. — 250 с.