

УДК 681.3:946.9

### РАЗРАБОТКА СТРУКТУРЫ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА ОСНОВЕ ПРОГРАММНОГО МОДУЛЯ

**В. П. Ляшенко**

Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского  
ул. Первомайская, 20, г. Кременчуг, 39600, Украина. E-mail: conon-V@yandex.ru

Предложена структура системы управления процессами спекания и термической, в частности термоциклической обработки изделий из материалов получаемых методами порошковой металлургии. Структура системы построена на основе программного модуля, позволяющего вычислять параметры управления температурным полем изделия, нагреваемого внутренними и внешними источниками тепла. Программный модуль включает в себя интерфейс численных расчетов распределения температуры, интерфейс определения параметров управления температурным полем, интерфейс подключения к системе управления технологическим процессом и передачи данных задатчику температуры. Предложены алгоритмы численного решения задач и блок-схема системы управления, проведены численные эксперименты, построены графики температурных распределений.

**Ключевые слова:** система управления, программный модуль, интерфейс, температурное поле, блок-схема, разностная схема, термическая обработка.

### РОЗРОБКА СТРУКТУРИ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ З ВИКОРИСТАННЯМ ПРОГРАМНОГО МОДУЛЯ

**В. П. Ляшенко**

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського  
вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, 39600, Україна. E-mail: conon-V@yandex.ru

Запропонована структура системи керування процесами спікання і термічної, зокрема термоциклічної обробки виробів із матеріалів, отриманих методами порошкової металургії. Структура системи побудована на основі програмного модуля, який дозволяє обчислювати параметри керування температурним полем виробу, що нагрівається внутрішніми та зовнішніми джерелами тепла. Програмний модуль включає в себе інтерфейс чисельних розрахунків розподілу температури, інтерфейс визначення параметрів керування температурним полем, інтерфейс підключення до системи керування та передачі даних задатчика температури. Запропоновано алгоритм чисельного розв'язку та блок-схему системи керування, проведені чисельні експерименти, побудовані графіки температурних розподілів.

**Ключові слова:** система керування, програмний модуль, інтерфейс, температурне поле, блок-схема, різницева схема, термічна обробка.

**АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ.** Всякая система управления с точки зрения технологии ее функционирования решает три основные задачи: сбор и передачу информации об управляемом объекте, переработку информации и, наконец, выдачу управляющих воздействий на объект управления. Автоматизированная система управления (АСУ) автоматизирует все эти этапы. Этим прежде всего АСУ отличается от простого использования ЭВМ в управлении. При простом использовании ЭВМ решаются отдельные задачи управления, т.е. осуществляется переработка информации. Этапы же сбора информации и формирования управляющих воздействий при этом обычно не автоматизируются.

В системах управления технологическими процессами основной формой передачи информации являются различные сигналы (электрические, оптические, механические и др.). В АСУТП обычно употребляются специально создаваемые для этой цели *управляющие* ЭВМ. Управляющая ЭВМ строится по тем же принципам, что и ЭВМ общего назначения. Отличие состоит в способах ввода и вывода данных.

Управляющие ЭВМ имеют специальное *устройство связи с объектом* управления (УСО). УСО снабжается большим числом каналов (от нескольких десятков до нескольких тысяч), по которым могут передаваться не только цифровые, но и аналоговые сигналы.

В УСО встроены специальные преобразователи типа аналог-цифра, позволяющие переводить сигнала

лы в цифровые коды ЭВМ, и типа цифра-аналог, осуществляющие обратные преобразования. К УСО могут придаваться также другие преобразователи, которые устанавливаются непосредственно на объекте управления, например, устройства для преобразования в цифровой код температуры, датчики давления, специальные реле для включения различных механизмов и т.п. [1].

Управляющая ЭВМ через УСО может опрашивать датчики, присоединенные к входным каналам, и выдавать управляющие воздействия действия на объект через выходные каналы УСО. Роль управляющей ЭВМ с успехом выполняет персональный компьютер, обладающий повышенной надежностью.

Основной задачей АСУТП, которые используют управляющие ЭВМ, заключается в оптимизации сложных технологических процессов, характеризующихся сложностью алгоритмов управления и большим числом параметров управления. При этом достигается увеличение производительности, экономичности процессов, уменьшение количества выпускаемого брака. К таким сложным технологическим процессам относятся технологические процессы получения материалов методами порошковой металлургии [2–4]. Процесс получения композиционного материала методами порошковой металлургии состоит из нескольких этапов, каждый из которых включает в себя целый ряд технологических операций. На первом этапе происходит получение по-

рошка различными методами, затем происходит замешивание и брикетирование изделия. На втором этапе холодным или горячим прессованием получается спеченный брикет со свойствами, близкими к свойствам компактного материала. На следующем этапе путем повторного прессования, спекания, отжига, термоциклической обработки или других методов получается материал с необходимыми физико-механическими характеристиками [2–4].

Целью работы является создание структуры системы управления процессом спекания, термической и термоциклической обработки изделий из материалов, получаемых методами порошковой металлургии на основе программного модуля для расчета оптимальной температуры.

**МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ.** Термоциклическая обработка (ТЦО) представляет собой процесс термического воздействия, осуществляемого посредством непрерывного циклического изменения температуры и сопровождающегося многократными структурными или фазовыми превращениями в обрабатываемом материале при нагревах и охлаждениях с заданной скоростью. Она выполняется в газовых или муфельных печах, или путем пропускания электрического тока через изделие или полуфабрикат [5]. С физической точки зрения первое является воздействием внешних источников тепла на заготовку, а второе – внутренних. Такая обработка позволяет формировать необходимые физико-механические свойства металла.

В рассмотренных ранее работах предложены математические модели в виде линейных краевых задач для уравнения теплопроводности и получены их некоторые аналитические и численные решения [6, 7]. В работах [8, 9] рассмотрены математические модели термической обработки, в виде краевых задач с нелинейными граничными условиями и получены температурные распределения с помощью численных методов. В этих работах отсутствует описание компьютерной анимации численных алгоритмов, программных модулей решения задач. Однако разнообразие моделей ТЦО требует более тщательного и единого подхода при изучении и анализе температурных распределений, что возможно осуществить с применением программного модуля.

Спрессованный штабик длиной  $L$  рассматривается в виде конечной анизотропной среды с постоянными теплофизическими характеристиками и параметрами. Исследуются математические модели температурных полей, в которых действуют внешние и внутренние источники тепла. Внутренние источники тепла  $W(t, T)$  вызваны действием электрического тока, который пропускается через заготовку, а внешние – возникают в результате теплообмена с окружающей средой по законам Ньютона и Стефана – Больцмана. С математической точки зрения исследования температурных полей процессов ТЦО приводит к решению однородного или неоднородного уравнения теплопроводности с импульсными краевыми условиями или функцией источников в уравнении. В математической модели – уравнении теплопроводности – внутренние источники тепла изображаются в виде финитной функции в уравнении, а

внешние – в виде краевых условий первого второго или третьего рода.

Математическая модель температурного поля цилиндрической области, имеет вид [9]:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( \lambda(T) r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial z} \right) -$$

$$-c \rho_n \frac{\partial T}{\partial t} = -W(t, T)$$

$$0 < r < r_0, \quad 0 < z < L, \quad t > 0$$

$$T(r, z, 0) = T_0 \tag{2}$$

$$T(r, 0, t) = T_1(t), \quad T(r, L, t) = T_2(t) \tag{3}$$

$$\left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=0} = 0,$$

$$\pm \lambda(T) \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=r_0} = \alpha(T) f_1^i(t) (T_c - T) +$$

$$+ \varepsilon \sigma f_1^i(t) (T_c^4 - T^4), \tag{4}$$

где  $T$  – температура,  $t$  – время,  $\lambda(T)$  – коэффициент теплопроводности, положительно определенная непрерывная функция,  $\rho_n$  – плотность,  $\alpha(T)$ ,  $\varepsilon$ ,  $\sigma$  – соответственно коэффициент теплоотдачи, степень черноты и постоянная Стефана-Больцмана,  $r_0$  – радиус,  $T_c, T_0$  – соответственно температура среды и начальная температура,  $T_c > T_0$ ,  $W(t, T)$  – функция источников тепла, в случае внутреннего источника тепла имеет вид

$$W(t, T) = f_1^i(t) \cdot f_2(T), \tag{5}$$

в случае внешнего источника тепла  $W(t, T) = 0$ .

Функция  $W(t, T)$  в зависимости от технологических особенностей процесса ТЦО имеет вид

$$f_1^1(t) = 0,5 \left( 1 - \cos \frac{t}{t_0} \right)$$

$$f_1^2(t) = \begin{cases} \frac{t}{t_0} - 2n, & 2nt_0 \leq t \leq (2n+1)t_0 \\ -\frac{t}{t_0} + 2(n+1), & (2n+1)t_0 < t < (2n+2)t_0 \end{cases} \tag{6}$$

где  $t_0$  – время одного термоцикла,  $n$  – номер термоцикла,  $m, k$  – коэффициенты, которые определяют технологические особенности процесса.

$$f_2(T) = \frac{I^2 \rho_0 (1 + \beta T)}{\pi^2 r_0^4}, \tag{7}$$

где  $I, \rho_0, \beta$  – соответственно сила тока, удельное электросопротивление, температурный коэффициент сопротивления изделия.

В случае, когда концы заготовки воспринимают заданный тепловой поток, вместо краевых условий (3) имеют место следующие условия:

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0} = \alpha(T) f_1^i(t) (T_c - T) + \varepsilon \sigma f_1^i(t) (T_c^4 - T^4),$$

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=L} = -\alpha(T) f_1^i(t) (T_c - T) - \varepsilon \sigma f_1^i(t) (T_c^4 - T^4) \quad (8)$$

Упрощение задачи (1)–(4) можно провести, снизив ее размерность путем усреднения по одной из координат, воспользовавшись преобразованием

$$u(z, t) = \frac{2}{r_0^2} \int_0^{r_0} T(r, z, t) r dr \quad (9)$$

После применения усреднения (9), учитывая условия (4) и приняв, что  $\alpha(u) = \alpha = const$ ,  $\lambda(u) = \lambda = const$  составим две математические модели для внутренних и для внешних источников тепла.

Для внутренних источников тепла модель имеет вид

$$\lambda \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + \left[ \frac{I^2 \rho_0 \beta}{\pi^2 r_0^4} f_1^i(t) - \frac{2\alpha}{r_0} \right] u - \frac{2\varepsilon\sigma}{r_0} u^4 = c \rho_n \frac{\partial u}{\partial t} - F(t)$$

$$0 < z < L, \quad t > 0$$

$$u(z, 0) = T_0 \quad (11)$$

$$u(0, t) = T_1(t), \quad u(L, t) = T_2(t) \quad (12)$$

где

$$F(t) = \frac{I^2 \rho_0}{\pi^2 r_0^4} f_1^i(t) + \frac{2\alpha T_c}{r_0} + \frac{2\varepsilon\sigma}{r_0} T_c^4 - \text{ функция}$$

внутренних источников тепла.

Математическая модель температурного поля цилиндрической области с внешних источников источниками тепла имеет вид

$$\lambda \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} - c \rho_n \frac{\partial u}{\partial t} = -F_2(u, t),$$

$$0 < z < L, \quad t > 0$$

$$u(z, 0) = T_0, \quad (14)$$

$$u(0, t) = T_1(t), \quad u(L, t) = T_2(t), \quad (15)$$

где

$$F_2(u, t) = + \frac{2\alpha(u) f_1^i(t)}{r_0} (T_c - u) + \frac{2\varepsilon\sigma f_1^i(t)}{r_0} (T_c^4 - u^4) -$$

функция внешних источников тепла.

Она получена из уравнения (1) при  $W(t, T) = 0$ , изменением знаков граничных условий (4) и краевых (8). Здесь источники тепла находятся не в правой части уравнения теплопроводности, а в краевых и граничных условиях. Такая математическая модель имеет вид первой или второй краевой задачи для одномерного квазилинейного уравнения теплопроводности.

Задачу (11)–(13) решаем численным методом в конечномерном сепарабельном пространстве сеточных функций с нормой  $\|u(z, t)\|_U = \max_{z, t \in \Omega} |u(z, t)|$  с применением конечно-разностной схемы Кранка–

Николсона в области  $\bar{\Omega} = \{0 \leq z \leq L, t > 0\}$  с равномерной сеткой по координате  $z$   $\bar{\omega}_h = \{z_m = mh, m = 0, 1 \dots M\}$  и временной сеткой по координате  $t$   $\bar{\omega}_{\Delta t} = \{t_j = j\Delta t, j = 0, 1 \dots j_0\}$  с интервалами:  $h = L/M, \Delta t = t_0/j_0$  [10].

Решение разностной задачи в области  $\Omega \times t = \{0 < z < L, t > 0\}$  сведено к решению системы нелинейных алгебраических уравнений для сеточной функции  $u_{i,j}$  [10]

$$c \rho_n \frac{u_{i,j+1} - u_{i,j}}{\Delta t} = \frac{\lambda}{2h^2} (u_{i-1,j+1} - 2u_{i,j+1} + u_{i+1,j+1} + u_{i-1,j} - 2u_{i,j} + u_{i+1,j}) + F_2(u_{i,j}, t) \quad (16)$$

Полученную систему решаем итерационным методом по алгоритму, изображенному на рис. 1.

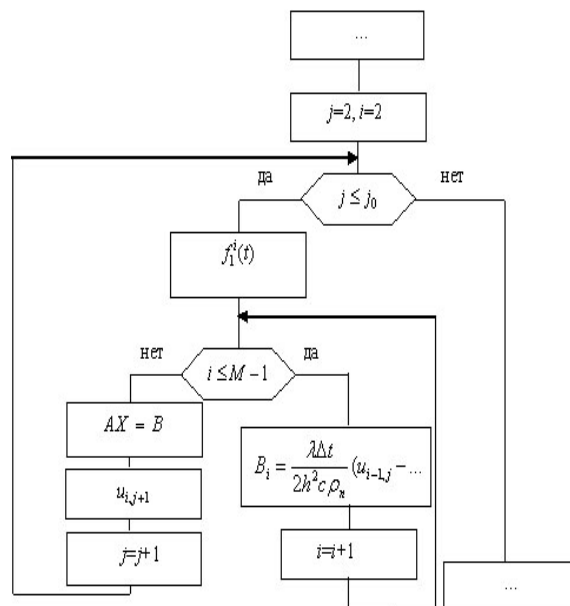


Рисунок 1 – Блок-схема алгоритма решения задач

На основании алгоритма была разработана компьютерная программа численных расчетов. Структура программы имеет модульный принцип и позволяет проводить расчеты для одномерного уравнения теплопроводности с различными источниками тепла, а также учитывать технологические особенности процессов, изменяя краевые условия. Интерфейс подключения к системе управления технологическим процессом предназначен для преобразования полученных после расчета данных в формат задающего устройства необходимую температуру спекания или термоциклической обработки, а также количество термоциклов, которые можно выбирать в программе на основании предварительно выполненных вычислений и согласно технологического регламента. Это позволяет поддерживать необходимую температуру для получения заданных физико-механических свойств материала. Структура программного модуля отображена на рис. 2.

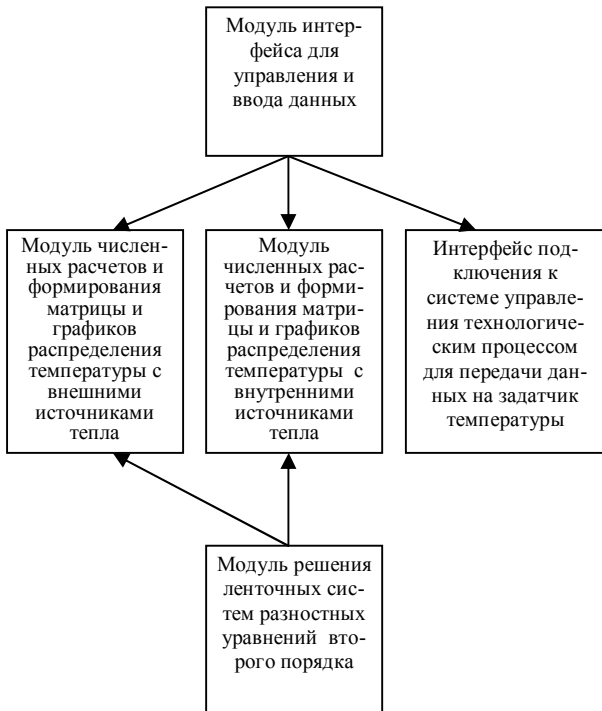


Рисунок 2 – Структура алгоритма для визначення параметрів управління температурним полем

*Система управління процесом ТЦО.* Для отримання матеріала з необхідними характеристиками (заданої міцності) розроблена система управління процесом ТЦО, для заданого числа термоциклів. Во время процесса осуществляется контроль температуры с помощью соответствующих датчиков. В частности, процесс спекания можно рассматривать как одноцикловую ТЦО. Спекание происходит в автоматическом режиме.

Блок-схема управления процессом спекания изображена на рис. 3.

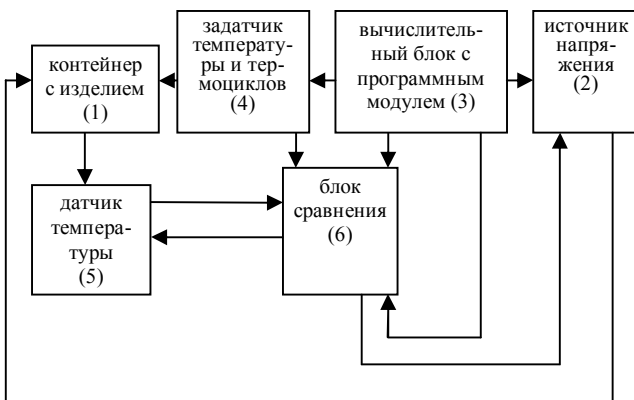


Рисунок 3 – Блок-схема системы управления

Спекание изделия осуществляется путем разогрева контейнера 1 при прохождении через него электрического тока от источника 2 напряжения. В вычислительном блоке 3 рассчитываются, на основе решения задачи (1)–(4), значения тока и напряжения, необходимых для начала и осуществления процесса спекания.

Сигнал из датчика 4 и датчика 5 температуры подается на блок 6 сравнения, а от него на источник 2 напряжения. В вычислительном блоке 3 осуществляется непрерывный расчет невязки между значениями сигналов воздействия на источник 2 напряжения вырабатываемый датчиком 4 и датчиком 5 температуры в контейнере 1. Там же ведется контроль количества термоциклов. В качестве вычислительного блока используется персональный компьютер или целевой программатор.

Были проведены численные расчеты температурных распределений во время процессов ТЦО для различных материалов. На графиках представлены расчеты температурных полей изделий цилиндрической формы из железа и вольфрама с параметрами,

$$\alpha = 50 \frac{Вт}{м^2К}, r_0 = 0,75 \cdot 10^{-3} м, L = 0,25 м,$$

начальная температура которых  $T_0 = 273^0 К$ , сила тока нагрева  $I = 20 А$  и  $I = 120 А$  соответственно.

Были получены температурные распределения ТЦО для функции источника тепла  $f_1^1(t)$  (6), (рис. 4). На графиках изображено температурное распределение контейнера нагреваемого внутренними источниками тепла. В численных экспериментах продолжительность ТЦО была постоянной, а время одного термоцикла изменялось. На графиках изображено температурное распределение образца железа на протяжении пяти термоциклов.

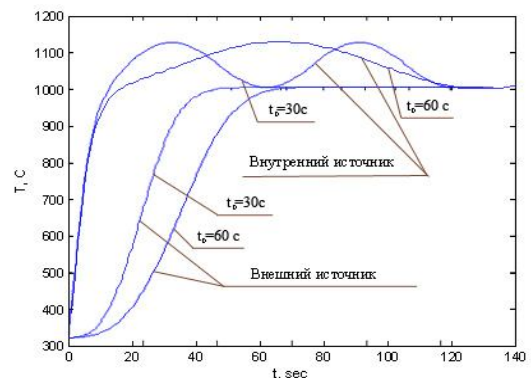


Рисунок 4 – Изменение температуры в точке  $z=1/2$

На рис. 5 изображены температурные распределения, когда функции источника (5) во время одного термоцикла состояла из двух фаз – подъема и снижения температуры за счет изменения функции  $f_1^2(t)$  (6).

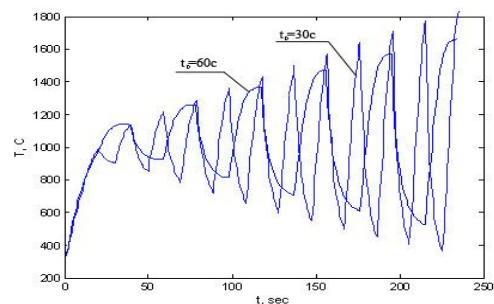


Рисунок 5 – Изменение температуры в точке  $z=1/2$

На графиках изображено температурное распределение в зависимости от длительности одного термоцикла для внутренних источников тепла.

**ВЫВОДЫ.** Построенные модели и алгоритмы решения краевых задач используются для проектирования автоматизированных систем управления процессами термообработки в порошковой металлургии. Полученные результаты позволяют разработать программное обеспечение для определения оптимальных параметров процесса термической обработки. Модели позволяют контролировать градиент изменения температуры.

Предложенная блок-схема системы управления технологическими процессами и алгоритмы решения краевых задач позволят получать материалы с необходимыми физико-механическими свойствами.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Годунов С.К. Уравнения математической физики. – М.: Наука, 2013. – 392 с.
2. Пластическая деформация тугоплавких металлов / А.В. Крупин, В.Я. Соловьев. – М.: Металлургия, 1971. – 352 с.
3. Мальцев В.М. Термическая обработка тугоплавких, редких металлов и их сплавов. – М.: Металлургия, 1974. – 343 с.

4. Федюкин В.К., Смагоринский М.Е. Термоциклическая обработка металлов и деталей машин. – Л.: Машиностроение. Ленинград. отд-ние. 1989. – 255 с.

5. Новиков И.И. Теория термической обработки металлов. – М.: Металлургия, 1978. – 392 с.

6. Ляшенко В.П. Математична модель термоциклічної обробки металевих виробів // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. – 2003. – Вип. 6/2003 (23). – С. 8–11.

7. Mykhaylo Zagirnyak, Victor Lyashenko, Tetyana Hryhorova Modeling and Automation of Pressing Processes in Powder Metallurgy // Proceedings of Symposium I E-MRS FALL MEETING 2008 “Functional and structural ceramic matrix composites (CCMC)”. – Warsaw (Poland), 2008. – PP. 252–259.

8. Дослідження температурного поля двошарового циліндра з різними теплофізичними характеристиками / В.П. Ляшенко, Т.А. Григорова // Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна. – № 890. – Харків, 2010. – С. 47–52.

9. Ляшенко В.П. Математична моделювання процесів термодифузії у порошковій металлургії: автореф. .... докт. техн. наук. – Кременчук: Видавничий відділ КрНУ, 2012. – 36 с.

10. Richtmyer R.D. Difference methods for initial value problems, Interscience, New York; 1957 p. – 377 p.

#### STRUCTURE DEVELOPMENT OF THE HEAT TREATMENT CONTROL SYSTEM ON THE BASIS OF A SOFTWARE MODULE

**V. Lyashenko**

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University

vul. Pershotravneva, 20, Kremenchuk, 39600, Ukraine. E-mail: conon-V@yandex.ru

The author has offered a new structure of the control system for sintering processes and thermal processing, particularly thermocycling treatment of the products manufactured by powder metallurgy. The structure of the system is built on the software module basis. The software module allows us to calculate the parameters control of the temperature field of products. The software module consists of an interface of numerical calculations of the temperature distribution, an interface of parameters control of determining the temperature field, an interface of connection to the technological process control system and data transfer to the temperature set point. The author has considered boundary value problems and has suggested the algorithm of their numerical solution and the block diagram of the control system. Also, there are the results of numerical experiments presented in the article and graphs of temperature distributions built.

**Key words:** control system, software module, interface, temperature field, heat treatment.

#### REFERENCES

1. Godunov, S.K. (1971). *Uraveneniya matematicheskoi fiziki* [Equations of Mathematical Physics], Nauka, Moscow, Russian.
2. Krupin, A.V., Soloviev, V.J. (1971), *Plasticheskaya deformatsiya tugoplavkikh metallov* [Plastic deformation of refractory metals], Metallurgiya, Moscow, Russia.
3. Maltsev, V.M. (1974), *Termycheskaya obrabotka tuhoplavkykh, redkyyh metallov i ih splavov* [Heat treatment of refractory and rare metals and their alloys], Metallurgiya, Moscow, Russia.
4. Fedyukin, V.K., Smagorinsky, M.E. (1989), *Termotsyklycheskaya obrabotka metallov i detaley mashyn* [Metal and machinery thermocyclic treatment], Leningrad branch, Mechanical engineering, Russia.
5. Novikov, I.I. (1978) *Teoriya termycheskoy obrabotky metallov* [The theory of heat treatment of metals], Metallurgiya, Moscow, Russia.
6. Lyashenko, V.P. (2003) “Mathematical model of metal products thermal treatment”, *Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National Univer-*

*sity*, vol. 23, iss. 6, pp. 8–11, KrNU, Kremenchuk, Ukraine.

7. Mykhaylo Zagirnyak, Victor Lyashenko, Tetyana Hryhorova (2008) “Modeling and Automation of Pressing Processes in Powder Metallurgy”, *Proceedings of Symposium I E-MRS FALL MEETING “Functional and structural ceramic matrix composites (CCMC)”* Warsaw (Poland), pp. 252–259.

8. Lyashenko, V.P., Hryhorova, T.A. (2010) “Investigation of the temperature field two-layer cylinder with different thermal characteristics” *Visnyk V.N. Karazin Kharkiv National University*, vol. 890, pp. 47–52.

9. Lyashenko, V.P. (2012.) *Matematychnye modeluvaniya protsesiv termodyfuziyi u poroshkoviy metalurhiyi* [Mathematical modeling of termodiffusion processes in powder metallurgy]. *Thesis for the doctor degree of technical sciences*, Publishing Department KrNU, Kremenchuk, Ukraine.

10. Richtmyer, R.D. (1957) *Difference methods for initial value problems*, Interscience, New York, USA.

Стаття надійшла 11.03.2013.

