



УДК 621.3.066.6

**А.А. Болтенков, М.В. Селивёрстов**  
 A.A. Boltenkov, M.V. Seliverstov

**ВОПРОСЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ  
 ПРИ ВОССТАНОВЛЕНИИ РЕЖУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ДИСКОВЫХ РАБОЧИХ ОРГАНОВ  
 ПОЧВООБРАБАТЫВАЮЩИХ МАШИН  
 МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ**

**THE ISSUES OF THERMAL PROCESS SIMULATION AT RESTORATION OF CUTTING ABILITY  
 OF DISK WORKING TOOLS OF TILLAGE IMPLEMENTS BY ELECTROMECHANICAL STRAINING TECHNIQUE**

**Ключевые слова:** рабочие органы, режущая кромка, износ, деталь, инструмент, электромеханическое деформирование, математическое моделирование, тепловой поток, температурное поле, метод термически тонкого слоя, метод конечных разностей, численный эксперимент, результаты.

Выбор наиболее эффективного метода восстановления режущей способности дисковых рабочих органов почвообрабатывающей и посевной техники определяет целесообразность практической реализации его в производстве. Применение метода электромеханического деформирования, совмещающего в себе процессы термического и силового воздействия на режущую кромку при восстановлении, обеспечивает выполнение данных требований. Однако определение параметров процесса и режима восстановления изношенных деталей почвообрабатывающих машин методом электромеханического деформирования является сложной задачей. Применение математического моделирования системы «электрод – деталь – теплоотводящая масса» дало возможность представить тепловые процессы при восстановлении дисковых рабочих органов методом электроконтактного термомеханического деформирования. Применение метода термически тонкого слоя позволило перейти от трехмерной математической модели к одномерной, что значительно упрощает исходную математическую модель, а ее решение увязывает между собой параметры и факторы процесса восстановления с качественными характеристиками рабочей поверхности деталей. При этом динамику температурного поля в системе «электрод – деталь – теплоотводящая масса» рассмотрели в виде

составного стержня, имитирующего тепловой процесс в системе. Для повышения адекватности математической модели введены два динамических коэффициента: первый учитывает неточность определения плотности теплового потока электроконтактного теплового деления на границе «электрод – деталь», второй учитывает неточность определения объемных тепловых источников, имитирующих теплообмен условно выделенного стержня с нагретой основной детали и теплоотводящей массой. Проведенные расчеты в среде «MATHCAD» позволили построить зависимость температуры от пространственной координаты в фиксированные моменты времени. На основании анализа результатов численного эксперимента при моделировании тепловых процессов восстановления деталей почвообрабатывающих машин показано качественное соответствие математической модели реальному технологическому процессу.

**Keywords:** working tools, cutting edge, wear, part, tool, electromechanical straining, mathematical simulation, heat flow, temperature field, thermally thin layer method, method of finite differences, numerical experiment, results.

The choice of the most efficient method of restoring the cutting ability of disk working tools of tillage and sowing equipment determines the expediency of its practical implementation in production. The use of the electromechanical straining technique that combines the processes of thermal and force impact on the cutting edge during restoration ensures that these requirements are met. However, the determination of the parameters and regime of the restoration process of tillage equipment worn parts by electromechanical

straining is a difficult task. The application of mathematical simulation of the system “electrode – part – heat-eliminating mass” describes the thermal processes in the restoration of disk working tools by electrocontact thermomechanical straining. The application of the thermally thin layer method made it possible to switch from a three-dimensional mathematical model to a one-dimensional one which greatly simplified the initial mathematical model, and its solution links the parameters and factors of the restoration process to the qualitative characteristics of the working surface of the parts. In the course of simulation, the temperature field dynamics of the “electrode – part – heat-eliminating mass” system was considered as a composite core that simulates the thermal process in the system. To improve the adequacy of the

mathematical model, two dynamic coefficients were introduced; the first one took into account the inaccuracy of determining the heat flow density of electrocontact heat generation at the “electrode – part” boundary; the second coefficient took into account the inaccuracy of determining volumetric heat sources simulating the heat transfer of a conventionally assigned core with heated main mass of the part and a heat-eliminating mass. The calculations in the Mathcad environment enabled to construct the dependence of temperature on the spatial coordinate at fixed time points. The analysis of the numerical experiment results at thermal process simulation of tillage equipment part restoration showed qualitative correspondence of the mathematical model to the real technological process.

**Болтенков Андрей Анатольевич**, к.т.н., доцент, декан фак-та заочного обучения, Алтайский государственный аграрный университет. Тел.: (3852) 20-08-92. E-mail: Boltenkov\_A@mail.ru.

**Селивёрстов Максим Владимирович**, ст. преп. каф. механизации производства и переработки сельскохозяйственной продукции, Алтайский государственный аграрный университет. E-mail: Seliv-Maks@yandex.ru.

**Boltenkov Andrey Anatolyevich**, Cand. Tech. Sci., Assoc. Prof., Dean, Dept. of Extramural Education, Altai State Agricultural University. Ph.: (3852) 20-08-92. E-mail: Boltenkov\_A@mail.ru.

**Seliverstov Maksim Vladimirovich**, Asst. Prof., Chair of Agricultural Production and Processing Mechanization, Altai State Agricultural University. E-mail: Seliv-Maks@yandex.ru.

## Введение

Рабочие органы почвообрабатывающих машин при выполнении технологических операций подвергаются интенсивному износу. Одним из эффективных способов восстановления режущей способности дисковых рабочих органов почвообрабатывающей и посевной техники является метод электромеханического деформирования (ЭМД). Эффективность данного метода обеспечивается совмещением термического и силового воздействия, осуществляемого формующим электродом на участок восстанавливаемой детали [1]. При этом основополагающую роль на достижение температуры пластической деформации материала детали в зоне формирования режущей кромки оказывают давление  $P$ , электрическое напряжение  $U$  и угловая скорость вращения детали  $\omega$  [2, 3]. Установление режимов электромеханического деформирования, обеспечивающих стабильный процесс восстановления режущей кромки дисковых рабочих органов, является актуальной задачей.

**Цель** исследования – моделирование тепловых процессов при восстановлении режущей способности дисковых рабочих органов почвообрабатывающих машин и получение зависимости

температуры от времени процесса, влияющей на стабильность процесса восстановления.

## Объект и методы исследования

Процесс электромеханического деформирования, применяемый при восстановлении режущей способности дисковых рабочих органов почвообрабатывающих орудий. Использование методов математического моделирования процесса ЭМД можно увязать с изменением температуры и параметров процесса, которые могут быть определены посредством численного эксперимента на ЭВМ.

Использование метода термически тонкого слоя и сделанные допущения, позволяют перейти от трехмерной математической модели к одномерной, что значительно упрощает исходную математическую модель [4].

1. Весь процесс ЭМД можно разделить на две стадии: 1) стадию термической подготовки, на которой вся масса материала детали, расположенная непосредственно под формующим электродом, нагревается до температуры пластической деформации; 2) стадия формирования режущей кромки. Это позволяет производить расчет основных технологических параметров  $P$ ,  $U$ ,  $\omega$  для пер-

вой стадии только на базе краевых задач для уравнения теплопроводности без привлечения к расчетам уравнений термомеханики.

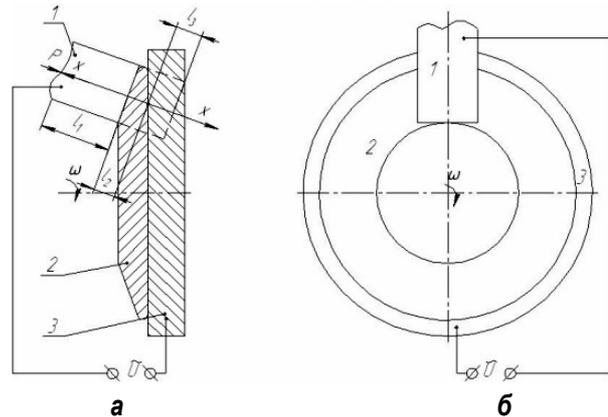
II. На первой стадии можно рассмотреть два режима: 1) статический режим (угловая скорость  $\omega=0$ ), позволяющий определить параметры энерговложения  $P$ ,  $U$ ; 2) динамический режим (угловая скорость  $\omega \neq 0$ ), регламентирующий производительность процесса.

III. Для сокращения размерности решаемых задач рассматриваются условно выделенные составные стержни с одномерными тепловыми потоками: 1) при моделировании процессов теплопереноса в системе «электрод – деталь – теплоотводящая масса» на первой стадии электромеханического деформирования в статическом режиме рассматривается стержневая система, составленная из трех контактирующих стержней, теплоизолированных с боковой поверхности [5]; 2) при моделировании тепловых процессов в системе «деталь – теплоотводящая масса» в динамическом режиме первой стадии ЭМД рассматривается стержневая система, состоящая из двух контактирующих стержней, нагреваемых с боковой поверхности окружающей средой, имеющей температуру, равную температуре пластической деформации материала восстанавливаемой детали. На внешних торцевых поверхностях составных стержней осуществляется конвективный теплообмен с окружающей средой.

IV. Для придания большей степени адекватности одномерным математическим моделям тепловых процессов статического и динамического режимов первой стадии ЭМД вводятся два динамических коэффициента: 1) коэффициент энерговложения  $k_1$ , учитывающий неточность определения плотности теплового потока электроконтактного тепловыделения на границе «электрод – деталь» по формуле:  $q=UI/S$ , где  $U$ ,  $I$  – напряжение и ток вторичной цепи понижающего трансформатора,  $S$  – площадь контактного пятна; 2) коэффициент  $k_2$ , учитывающий неточность определения объемных тепловых источников, имитирующих теплообмен условно выделенного стержня с нагретой основной массой детали и теплоотводящей массой.

V. Осуществляется двухэтапное решение обеих рассматриваемых задач: 1) на первом этапе по результатам термометрирования детали и теплоотводящей массы определяются неизвестные динамические коэффициенты  $k_1(t)$  и  $k_2(t)$ ; 2) на втором этапе по построенным математическим моделям процессов теплопереноса в системах «электрод – деталь – теплоотводящая масса» на первой стадии ЭМД в статическом режиме и «деталь – теплоотводящая масса» в динамическом режиме осуществляется прогнозирование необходимых значений параметров энерговложения  $P$ ,  $U$  и угловой скорости вращения  $\omega$  восстанавливаемых дисков.

Остановимся более подробно на анализе статического режима. При заданном давлении и достижении необходимой температуры нагрева металла в области деформирования происходит процесс восстановления режущей кромки диска.



**Рис. 1. Схема электромеханического деформирования (восстановления) режущей кромки диска почвообрабатывающего орудия с использованием электроконтактного нагрева**

На рисунке 1а показана схема электромеханического деформирования с использованием электроконтактного нагрева, ее поперечный разрез и введена система координат для расчета температурных полей; на рисунке 1б показан вид системы в плане. Принятые обозначения: 1 – формирующий электрод; 2 – восстанавливаемый диск; 3 – теплоотводящая масса;  $l_1$  – высота электрода;  $l_2$  – средняя толщина восстанавливаемого участка режущей кромки до и после деформирования;  $l_3$  – толщина теплоотводящей массы.

Деталь 2, жестко закрепленная на теплоотводящей массе 3, с заданной угловой скоростью  $\omega$  подается под формирующий электрод 1, к которому приложено давление  $P$  и напряжение  $U$ . Между электродом и восстанавливаемой деталью образуется тонкая переходная зона, имеющая сопротивление  $R$ , преодолеваемое электрическим током с выделением теплоты.

Полученная теплота расходуется на нагрев электрода и детали и передается конвекцией и излучением в окружающую среду.

Рассматриваются тепловые процессы в статическом режиме, когда процесс ЭМД осуществляется без вращения диска ( $\omega=0$ ).

Удельная мощность  $q$  (плотность теплового потока) определяется выражением:

$$q = k_1 \frac{U \cdot I}{S}, \quad (1)$$

где  $U$  – падение напряжения на контакте, В;

$I$  – сила тока в контакте, А;

$S$  – площадь пятна контакта, м<sup>2</sup>;

$k_1$  – коэффициент, учитывающий особенности контактного взаимодействия электрода с восстанавливаемой деталью.

Для исследования динамики температурного поля системы «электрод-деталь – теплоотводящая масса» рассмотрим составной стержень (пунктирные линии на рисунке 1), имитирующий тепловой процесс в системе.

Для каждого из элементов трехслойной стержневой системы запишем следующие уравнения теплопроводности [6]:

$$c_1 \rho_1 \frac{\partial T_1}{\partial t} = \lambda_1 \frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2}, \quad 0 < x < l_1, \quad 0 < t < t_{max}; \quad (2)$$

$$c_2 \rho_2 \frac{\partial T_2}{\partial t} = \lambda_2 \frac{\partial^2 T_2}{\partial x^2}, \quad 0 < x < l_2, \quad 0 < t < t_{max}; \quad (3)$$

$$c_3 \rho_3 \frac{\partial T_3}{\partial t} = \lambda_3 \frac{\partial^2 T_3}{\partial x^2}, \quad l_2 < x < l_2 + l_3, \quad 0 < t < t_{max}, \quad (4)$$

где  $c_i$  – удельная массовая теплоемкость;

$\rho_i$  – плотность;

$\lambda_i$  – коэффициент теплопроводности  $i$ -той области ( $i = 1, 2, 3$ );

$t_{max}$  – время завершения процесса деформирования.

Уравнение теплового баланса на границе «деталь – электрод» представим в следующем виде:

$$-\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} = \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} + k_1 \frac{U \cdot I}{S}, \quad x=0, \quad 0 < t < t_{max}. \quad (5)$$

Уравнение теплоотдачи с поверхности электрода запишем на основании закона Ньютона:

$$-\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} = \alpha(T_1 - T_{cp}), \quad x=l_1, \quad 0 < t < t_{max}, \quad (6)$$

где  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи с поверхности электрода.

Условие непрерывности температурных полей и тепловых потоков на границе раздела «деталь – теплоотводящая масса» в случае идеального теплового контакта имеет следующий вид:

$$\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} = \lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial x}, \quad T_2 = T_3, \quad x=l_2, \quad 0 < t < t_{max}, \quad (7)$$

Условие теплоотдачи с поверхности теплоотводящей массы опишем следующим уравнением:

$$-\lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial x} = q_{omc}, \quad x=l_2 + l_3, \quad 0 < t < t_{max}, \quad (8)$$

где  $q_{omc}$  – величина плотности теплового потока, отводимого теплопроводностью в отсеченную теплоотводящую массу (рис. 2а).

Начальные условия процесса (начальное распределение температур) зададим следующим образом:

$$T_i = T_{cp}; \quad 0 < x < l_1; \quad 0 < x < l_2 + l_3; \quad i = 1, 2, 3; \quad t = 0. \quad (9)$$

### Экспериментальная часть

Применяя метод конечных разностей (явная схема) [7], переходим от области изменения непрерывных аргументов к дискретной сеточной области. Из приведенных выше уравнений получаем следующие расчетные выражения для вычисления таблицы температур, определенных в узлах сеточной области (верхний индекс указывает номер временного слоя ( $k=0, 1, 2, \dots$ ), шаг сетки по времени,  $\tau < \min_{1 \leq i \leq 3} \left\{ \lambda_i / (c_i \cdot \rho_i \cdot h_i^2) \right\}$ ,  $h_i (i = 1, 2, 3)$

– шаг сетки по пространственной переменной в  $i$ -той подобласти, первый нижний индекс – номер расчетной подобласти (рис. 3), второй индекс – номер узла пространственной сетки):

$$T_{1,i}^{k+1} = (1 - 2\xi_1) \cdot T_{1,i}^k + \xi_1 (T_{1,i+1}^k + T_{1,i-1}^k), \quad 0 < i < N_1,$$

$$\xi_1 = \frac{\tau \cdot \lambda_1}{c_1 \cdot \rho_1 \cdot h_1^2}, \quad N_1 = \frac{l_1}{h_1} + 1; \quad (10)$$

$$T_{2,i}^{k+1} = (1 - 2\xi_2) \cdot T_{2,i}^k + \xi_2 (T_{2,i+1}^k + T_{2,i-1}^k), \quad 0 < i < N_2,$$

$$\xi_2 = \frac{\tau \cdot \lambda_2}{c_2 \cdot \rho_2 \cdot h_2^2}, \quad N_2 = \frac{l_2}{h_2} + 1; \quad (11)$$

$$T_{3,i}^{k+1} = (1 - 2\xi_3) \cdot T_{3,i}^k + \xi_3 (T_{3,i+1}^k + T_{3,i-1}^k), \quad N_2 < i < N_3,$$

$$\xi_3 = \frac{\tau \cdot \lambda_3}{c_3 \cdot \rho_3 \cdot h_3^2}, \quad N_3 = \frac{l_3}{h_3} + 1; \quad (12)$$

$$T_{1,0}^{k+1} = T_{2,0}^{k+1} = \frac{-T_{1,1}^{k+1} + \xi_4 \cdot T_{2,1}^{k+1} - \frac{k_1 h_1}{\lambda_1} \cdot \frac{U \cdot I}{S}}{\xi_4 - 1};$$

$$\xi_4 = -\frac{h_1 \cdot \lambda_2}{h_2 \cdot \lambda_1}; \quad (13)$$

$$T_{1,N_1}^{k+1} = \frac{T_{1,N_1-1}^{k+1} - \xi_5 \cdot T_{cp}}{1 - \xi_5}, \quad \xi_5 = -\frac{\alpha \cdot h_1}{\lambda_1}; \quad (14)$$

$$T_{2,N_2}^{k+1} = \frac{T_{2,N_2-1}^{k+1} + \xi_6 \cdot T_{3,N_2+1}^{k+1}}{1 + \xi_6}, \quad \xi_6 = \frac{h_2 \cdot \lambda_3}{h_3 \cdot \lambda_2}; \quad (15)$$

$$T_{3,N_3}^{k+1} = \frac{T_{3,N_3-1}^{k+1} - \xi_7 \cdot T_{cp}}{1 - \xi_7}, \quad \xi_7 = -\frac{\alpha \cdot h_3}{\lambda_3}. \quad (16)$$

Начальные условия имеют следующий вид:

$$T_{1,i}^k = 20^\circ C, \quad 0 \leq i \leq N_1; \quad T_{2(3)i}^k = 20^\circ C, \quad 0 < i \leq N_3. \quad (17)$$

Приведенная выше математическая модель реализована в среде «MATHCAD». Проведен численный эксперимент, который заключался в расчете изменяющегося во времени температурного поля системы «электрод – деталь – теплоотводящая масса» по разработанной математической модели (формулы (10)-(17)). Расчеты выполнялись при следующих значениях параметров:  $I=940$  А;  $U_p=1,53$  В.

### Результаты и их обсуждение

Результаты численного эксперимента представлены на рисунках 2, 3.

На рисунке 2 представлены зависимости температуры от пространственной координаты в фиксированные моменты времени (нижняя прямая – начальное распределение температуры; верхняя кривая – распределение температуры в

момент времени завершения пластического деформирования).

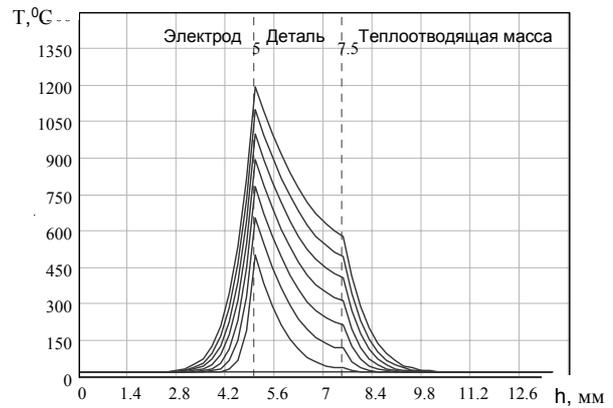


Рис. 2. Зависимости температуры от пространственной координаты

На рисунке 3 представлены зависимости температуры от времени в точках системы «деталь – теплоотводящая масса» (нижняя кривая – температура свободной поверхности теплоотводящей массы; верхняя кривая – температура точки контакта «электрод – деталь»).

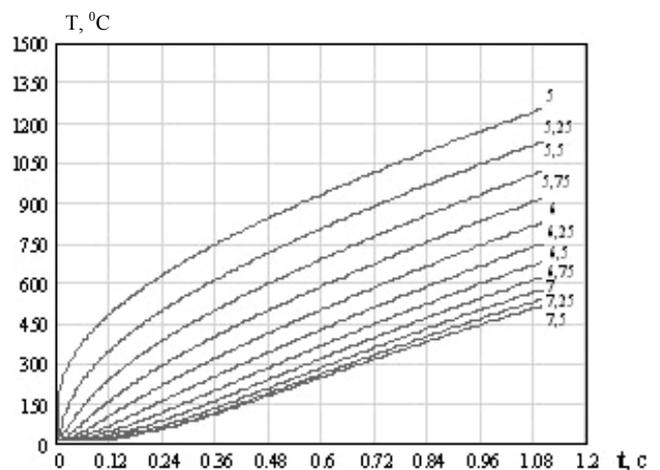


Рис. 3. Зависимости температуры от времени в различных точках сечения детали

### Вывод

Применение метода термически тонкого слоя в задачах моделирования тепловых процессов при восстановлении деталей почвообрабатывающих машин показывает о высокой сходимости резуль-

татов эксперимента. Анализ данных проведенного численного эксперимента позволяет сделать вывод о качественном соответствии математической модели реальному технологическому процессу. Количественное соответствие достигается уточнением коэффициента  $k_1$ , полученным из сравнения данных численного моделирования с экспериментальными данными.

#### Библиографический список

1. Аскинази Б.М. Упрочнение и восстановление деталей машин электромеханической обработкой. – М.: Машиностроение, 1989. – 200 с.
2. Шерышев В.П., Чижов В.Н., Селиверстов М.В., Тепложаева Ф.С. Стержневые системы в задачах моделирования тепловых процессов в деталях почвообрабатывающих машин при их восстановлении с помощью электроконтактного нагрева // Моделирование-2010: матер. Междунар. науч. конф. – Киев, 2010. – Т. III – С. 202-208.
3. Численное моделирование тепловых процессов в сварке: учеб.-метод. пособие / С.В. Хаустов, В.О. Харламов, С.В. Кузьмин; ВолгГТУ. – Волгоград, 2016. – 60 с.
4. Шерышев В.П., Чижов В.Н., Болтенков А.А. Разработка и упрощение математической модели электроконтактного напекания металлических порошков // Совершенствование технологий и технических средств в АПК: юбилейный сборник / АГАУ. – Барнаул: Изд-во АГАУ, 2001. – С. 118-124.
5. Чижов В.Н., Болтенков А.А., Тепложаева Ф.С., Селиверстов М.В. Математическое моделирование тепловых процессов в системе «электрод – деталь – теплоотводящая масса» при ремонте деталей // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2009. – № 12 (62). – С. 80-84.
6. Самарский А.А., Вабищевич П.Н. Вычислительная теплопередача. – М.: Едиториал УРСС, 2003. – 782 с.

7. Кузнецов Г.В., Шеремет М.А. Разностные методы решения задач теплопроводности: учебное пособие. – Томск: Изд-во ТПУ, 2007. – 172 с.

#### References

1. Askinazi B.M. Uprochnenie i vosstanovlenie detaley mashin elektromekhanicheskoy obrabotkoy. – M.: Mashinostroenie, 1989. – 200 s.
2. Sheryshev V.P., Chizhov V.N., Seliverstov M.V., Tepgozhaeva F.S. Sterzhnevye sistemy v zadachakh modelirovaniya teplovykh protsessov v detalyakh pochvoobrabatyvayushchikh mashin pri ikh vosstanovlenii s pomoshchyu epektrokontaktnogo nagreva // Mater. mezh-dunar. nauch. konf. «Modelirovanie-2010». – Kiev, 2010. – Т. III. – S. 202-208.
3. Chislennoe modelirovanie teplovykh protsessov v svarke: ucheb.-metod. posobie / S.V. Khaustov, V.O. Kharlamov, S.V. Kuzmin; VolgGTU. – Volgograd, 2016. – 60 s.
4. Sheryshev V.P., Chizhov V.N., Boltenev A.A. Razrabotka i uproshchenie matematicheskoy modeli elektrokotaktnogo napekaniya metallicheskih poroshkov Sovershenstvovanie tekhnologiy i tekhnicheskikh sredstv v APK: yubileynyy sbornik / AGAU. – Barnaul: Izd-vo AGAU, 2001. – S. 118-124.
5. Chizhov V.N., Boltenev A.A., Telgozhaeva F.S., Seliverstov M.V. Matematicheskoe modelirovanie teplovykh protsessov v sisteme «elektrod – detal – teplootvodyashchaya massa» pri remonte detaley // Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2009. – No. 12 (62). – S. 80-84.
6. Samarskiy A.A., Vabishchevich P.N. Vychislitel'naya teploperedacha. – M.: Yeditorial URSS, 2003. – 782 s.
7. Kuznetsov G.V., Sheremet M.A. Raznostnye metody resheniya zadach teploprovodnosti: uchebnoe posobie. – Tomsk: Izd-vo TPU, 2007. – 172 s.

