

ленную математическими расчетами, но ни одна из представленных разработок не учитывает такой субъективный фактор, как человеческий. Отсутствие соответствующих квалифицированных кадров делает математически рассчитанную систему в планируемом масштабе не эффективной. Не уделяется должного внимания особенностям рельефа, свойству почв, урожайности как средству окупаемости техники и сельскохозяйственных орудий.

Алтайский институт повышения квалификации работников АПК с 2006 г. ведет сбор данных об используемой с.-х. технике в районах края, ее работе и производственных характеристиках в соответствующих природных зонах. Учитывается социально-экономическая ситуация в селе, степень подготовленности кадров, возможность их обучения и самообучения. Реальные экономические показатели таковы: погектарный расход топлива, сменная и сезонная наработка, доступность запасных частей. Учитываются и наиболее распространенные отказы в работе, их причины и сложности, возникающие при их устранении. Имеются данные по зоне Кулундинской степи, указывающие на определенные закономерности, ведется работа по сбору данных в пределах Бийско-Чумышской возвышенности. Анализ статисти-

ческих данных, полученных в ходе исследований, позволит разработать рекомендации для СТП, исходя из практических результатов применения машин в конкретной природной и почвенной зоне, по более рациональному формированию машинно-тракторного парка для каждого хозяйства. Эти материалы после окончательной обработки послужат основой для разработки методики выбора с.-х. техники для хозяйств по различным почвенно-климатическим зонам Алтайского края.

#### Библиографический список

1. Маслов Г.Г. Определение эффективности использования уборочно-почвообрабатывающего агрегата / Г.Г. Маслов, В.В. Абаев // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2009. – № 1.
2. Муха В.Д. Агрочвоведение / В.Д. Муха, Н.И. Картамышев, Д.В. Муха. – М.: КолосС, 2004. – 528 с.
3. Лосев А.П. Агрометеорология / А.П. Лосев, Л.Л. Журнина. – М.: Колос, 2001.
4. Нормативно-справочные материалы по планированию механизированных работ в сельскохозяйственном производстве: сборник. – М.: ФГНУ «Росинформагротех», 2008. – 316 с.



УДК 631.3.01.004.67

**В.Н. Чижов,  
А.А. Болтенков,  
Ф.С. Телгожаева,  
М.В. Селивёрстов**

### МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В СИСТЕМЕ «ЭЛЕКТРОД – ДЕТАЛЬ – ТЕПЛОТВОДЯЩАЯ МАССА» ПРИ РЕМОНТЕ ДЕТАЛЕЙ

**Ключевые слова:** рабочие органы, режущая кромка, износ, деталь, инструмент, электроконтактное термомеханическое деформирование, математи-

ческое моделирование, тепловой поток, температурное поле, метод конечных разностей, численный эксперимент, результаты.

**Введение**

Рабочие органы почвообрабатывающих и посевных машин являются самым мало-ресурсным элементом [1]. Режущая кромка рабочих органов, взаимодействуя с почвой, интенсивно изнашивается, теряя режущие свойства, и прекращает выполнять свои технологические функции. Обширную группу быстро изнашивающихся рабочих органов сельскохозяйственных почвообрабатывающих машин представляют детали типа диск. В силу своих конструктивных особенностей их износ идет наиболее интенсивно (рис. 1).

Существующие технологии ремонта дисковых рабочих органов не обеспечивают их высокого послеремонтного ресурса, а при заострении режущей кромки путем съема металла потери материала диска в 7-10 раз превышают объем металла, теряемый дисками при их износе [2].

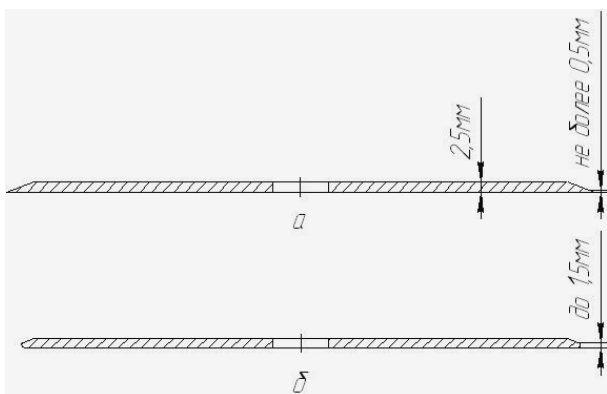


Рис. 1. Поперечное сечение детали типа диск: а – исходная форма поперечного сечения детали; б – форма поперечного сечения детали после износа

**Объекты и методы исследования**

Одним из перспективных направлений восстановления деталей является электроконтактная термомеханическая обработка, однако сведения по разработке технологий заострения рабочих органов почвообрабатывающих и посевных машин в публикациях ограничены [3].

Диски почвообрабатывающих орудий и других сельскохозяйственных машин имеют различные конструктивные параметры и свойства материалов, из которых они изготовлены, поэтому требуется большой объем экспериментальных исследований, необходимых для определения параметров и режимов процесса восстановления этих деталей. Число проводимых натуральных экспериментов может быть уменьшено за счет численных экс-

периментов, осуществляемых методами математического моделирования.

На эффективность процесса электроконтактного термомеханического деформирования большое влияние оказывает температура, снижающая сопротивление пластическому деформированию. При заданном давлении и достижении необходимой температуры нагрева металла в области деформирования происходит процесс восстановления режущей кромки диска.

На рисунке 2 а показаны схема термомеханического деформирования с использованием электроконтактного нагрева, поперечный разрез системы и введена система координат для расчета температурных полей; на рисунке 2 б – вид системы в плане.

Деталь (диск 2), жестко закрепленная на теплоотводящей массе 3, с определенной угловой скоростью  $\omega$  подается под формующий электрод 1, к которому приложены 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.

Для упрощения анализа рассмотрим тепловые процессы в статическом режиме, когда процесс термомеханического деформирования осуществляется без вращения диска ( $\omega = 0$ ).

Удельная мощность  $q$  (плотность теплового потока) определяется выражением [4]:

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

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

$I$  – сила тока в контакте, А;

$S$  – площадь пятна контакта,  $m^2$ ;

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

Для удобства анализа тепловых процессов ось  $X$  направим в противоположные стороны (рис. 2 а): в сторону формующего электрода и в сторону «деталь – теплоотводящая масса» (рис. 3).

Процесс пластического деформирования восстанавливаемого диска начинается при достижении в точке  $x = 0$  температуры начала пластического деформирования ( $T_{нпд}$ ) и завершается при достижении этой температуры в точке  $x = l_2$ .

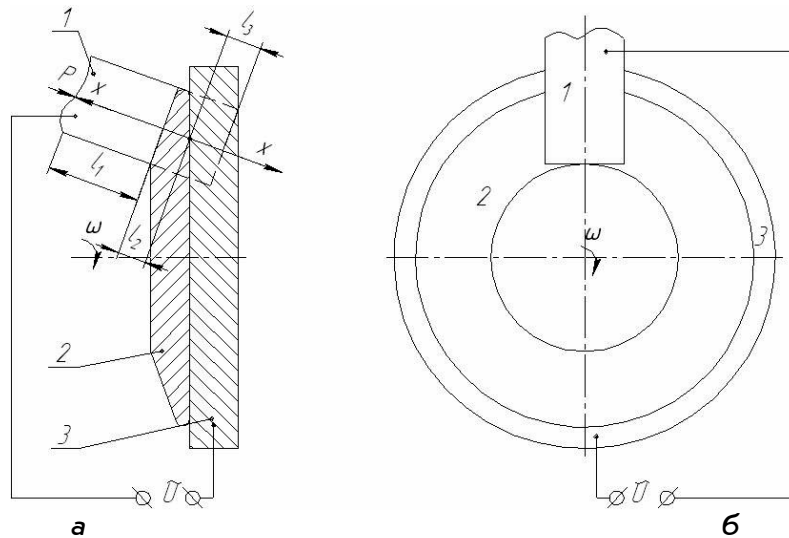


Рис. 2. Схема термомеханического деформирования (восстановления) режущей кромки диска почвообрабатывающего орудия с использованием электроконтактного нагрева: 1 – формирующий электрод, 2 – восстанавливаемый диск, 3 – теплоотводящая масса;  $l_1$  – высота электрода,  $l_2$  – средняя толщина восстанавливаемого участка режущей кромки до и после деформирования,  $l_3$  – толщина теплоотводящей массы

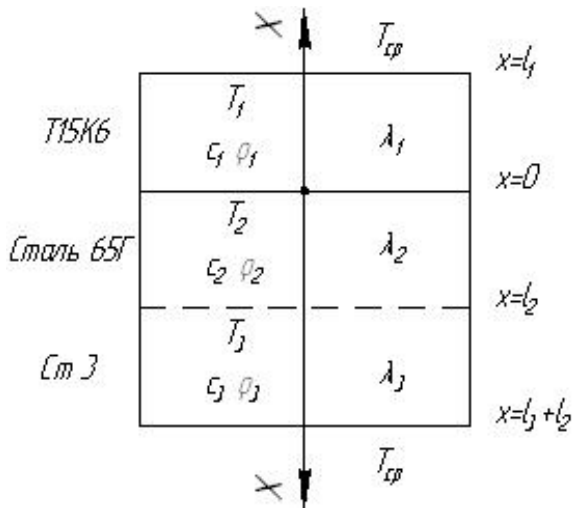


Рис. 3. Составная область контактирующих элементов для численного анализа тепловых процессов

Для исследования динамики температурного поля системы «электрод – деталь – теплоотводящая масса» построим одномерную математическую модель.

Для каждого из элементов трехслойной системы (рис. 3) запишем следующие уравнения теплопроводности:

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

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

$$c_3 \rho_3 \frac{\partial T_3}{\partial t} = \lambda_3 \frac{\partial^2 T_3}{\partial x^2},$$

$$l_2 < x < l_2 + l_3, \quad 0 < t < t_{max}, \quad (4)$$

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

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

$$T_i = 20^{\circ}\text{C}; 0 < x < l_1; \\ 0 < x < l_2 + l_3; i = 1, 2, 3; t = 0. \quad (9)$$

Применяя метод конечных разностей (явная схема) [5], 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,  $\tau < \min_{1 \leq i \leq 3} \{ \lambda_i / (c_i \cdot \rho_i \cdot h_i^2) \}$ ,  $h_i (i = 1, 2, 3)$  – шаг

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

$$T_{1,i}^{k+1} = (1 - 2\xi_1) \cdot T_{1,i}^k + \xi_1 (T_{1,i+1}^k + T_{1,i-1}^k), \\ 0 < i < N_1, \quad \xi_1 = \frac{\tau \cdot \lambda_1}{c_1 \cdot \rho_1 \cdot h_1^2}; \\ N_1 = \frac{l_1}{h_1} + 1; \quad (10)$$

$$T_{2,i}^{k+1} = (1 - 2\xi_2) \cdot T_{2,i}^k + \xi_2 (T_{2,i+1}^k + T_{2,i-1}^k), \\ 0 < i < N_2, \quad \xi_2 = \frac{\tau \cdot \lambda_2}{c_2 \cdot \rho_2 \cdot h_2^2}; \\ N_2 = \frac{l_2}{h_2} + 1; \quad (11)$$

$$T_{3,i}^{k+1} = (1 - 2\xi_3) \cdot T_{3,i}^k + \xi_3 (T_{3,i+1}^k + T_{3,i-1}^k), \\ N_2 < i < N_3, \quad \xi_3 = \frac{\tau \cdot \lambda_3}{c_3 \cdot \rho_3 \cdot h_3^2}, \\ N_3 = \frac{l_3}{h_3} + 1; \quad (12)$$

$$T_{1,0}^{k+1} = T_{2,0}^{k+1} = \frac{-T_{1,1}^{k+1} + \xi_4 \cdot T_{2,1}^{k+1} - \frac{k_1 h_1}{\lambda_1} \cdot \frac{U \cdot I}{S}}{\xi_4 - 1}; \\ \xi_4 = -\frac{h_1 \cdot \lambda_2}{h_2 \cdot \lambda_1}; \quad (13)$$

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

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

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

Начальные условия имеют следующий вид:

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

### Экспериментальная часть

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:  $I = 9400 \text{ A}$ ;  $U_p = 1 \text{ В}$ .

### Результаты и их обсуждение

Результаты численного эксперимента представлены на рисунках 4, 5.

На рисунке 4 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), на рисунке 5 – зависимости температуры от времени в точках системы «деталь – теплоотводящая масса» (нижняя кривая – температура свободной поверхности теплоотводящей массы; верхняя кривая – температура точки контакта «электрод – деталь»).

### Вывод

Анализ результатов проведенного численного эксперимента позволяет сделать вывод о качественном соответствии математической модели реальному технологическому процессу. Количественное соответствие достигается уточнением коэффициента  $k1$ , полученного из сравнения данных численного моделирования с экспериментальными данными.

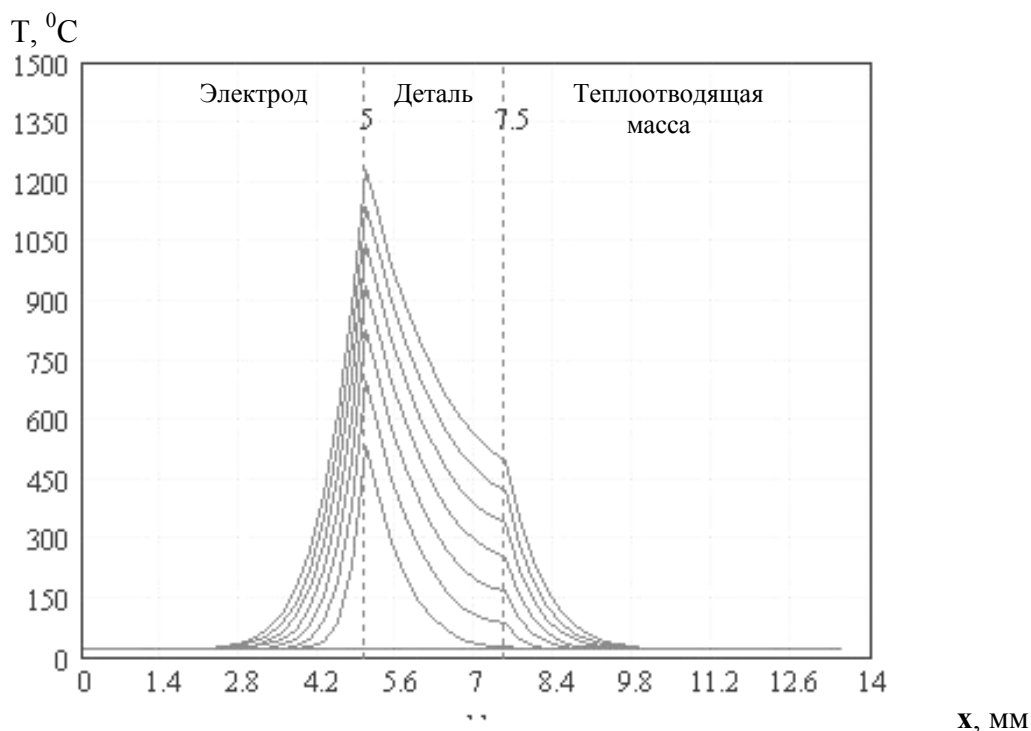


Рис. 4. Зависимости температуры от пространственной координаты

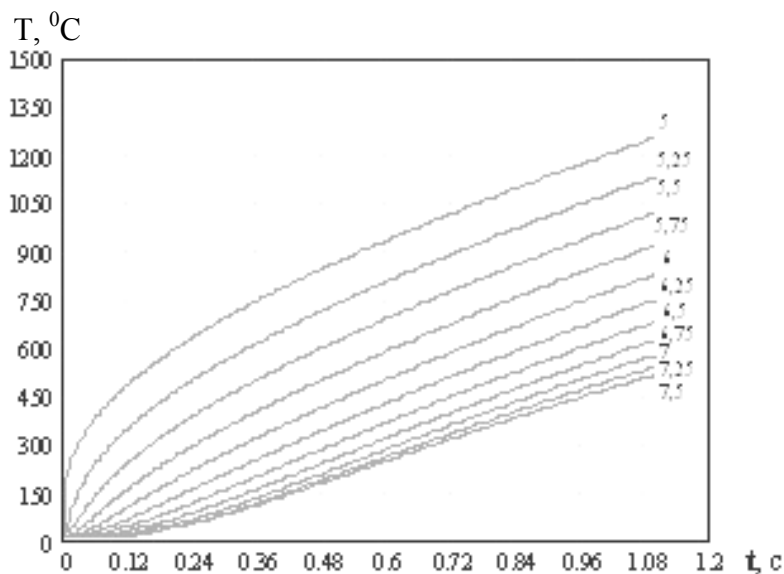


Рис. 5. Зависимости температуры от времени в различных точках сечения детали

**Библиографический список**

1. Чижов В.Н. Восстановление дисков сошников сеялок с использованием метода электроконтактного нагрева / В.Н. Чижов, А.В. Бодякин, М.В. Селивёрстов // Продукция предприятий Алтайского края для АПК России: сб. – Барнаул, 2003. – С. 67-68.
2. Чижов В.Н. К расчету объема металла для восстановления дисков сельскохозяйственных машин / В.Н. Чижов, О.Г. Бельчикова, М.В. Селивёрстов // Вестник Алтайского государственного аг-

- рарного университета. – 2005. – № 2 (18). – С. 80-82.
3. Аскинази Б.М. Упрочнение и восстановление деталей машин электрохимической обработкой / Б.М. Аскинази. – М.: Машиностроение, 1989. – 200 с.
4. Рыкалин Н.Н. Расчеты тепловых процессов при сварке / Н.Н. Рыкалин. – М.: Машгиз, 1951.
5. Самарский А.А. Теория разностных схем / А.А. Самарский. – М.: Наука, 1983. – 592 с.