

atatsionnykh rezhimov raboty v stepnykh i lesostepnykh raionakh Zapadnoi Sibiri: avtoref. diss. ... dokt. tekhn. nauk. – SPb., 1991. – 37 с.

7. Abramov A.T. Ekonomicheskoe obosnovanie inzhenernykh reshenii v diplomnykh proektakh: metodicheskie rekomendatsii. – Bar-naul: Izd-vo AGAU, 2002. – 68 s.



УДК 621.3.066.6 А.А. Болтенков, Е.А. Сарсенбаев, М.В. Селивёрстов, В.П. Шерышев
A.A. Boltenkov, Ye.A. Sarsenbayev, M.V. Seliverstov, V.P. Sheryshev

РАСЧЁТ ВРЕМЕНИ НАГРЕВА СИММЕТРИЧНОЙ ЭЛЕКТРОКОНТАКТНОЙ ПАРЫ ДО ТЕМПЕРАТУРЫ РЕКРИСТАЛЛИЗАЦИИ МАТЕРИАЛА КОНТАКТ-ДЕТАЛЕЙ

THE CALCULATION OF HEATING-UP TIME OF ELECTROCONTACT SYMMETRICAL PAIR TO RECRYSTALLIZATION TEMPERATURE OF CONTACT PIECES' MATERIAL

Ключевые слова: математическая модель, электроконтактный нагрев, контакт-деталь, время нагрева, температура рекристаллизации, прогнозирование теплового состояния.

С помощью математического моделирования процесса электроконтактного нагрева при резко переменной нагрузке показана возможность определения времени достижения контактной поверхностью электрического контактного соединения температуры рекристаллизации материала одной из контакт-деталей симметричной в тепловом отношении контактной пары. В материалах контакт-деталей выделяется составной стержень, тепловыми потерями с боковой поверхности которого можно пренебречь. Исходная математическая модель теплового процесса в одном контактном элементе (контакт-детали) представляет собой смешанную краевую задачу теплопроводности. На доступном для прямых измерений торце стержня задаётся измеренная температура, на контактном торце — удельная мощность, выделенная на переходном контактном сопротивлении. Осуществляется переход от исходной математической модели к краевой задаче с адиабатическим условием на открытом торце стержня, справедливой при действии резко переменной нагрузки на соответствующем промежутке времени. Получена и уточнена с помощью метода наименьших квадратов и априори известного точного аналитического решения упрощённой модельной задачи приближённая расчётная формула для определения температуры контактной поверхности. Получена расчётная формула для определения времени достижения контактной поверхностью контакт-деталей температуры рекристаллизации материала. Показана возможность применения полученной формулы к решению за-

дачи прогнозирования теплового состояния электроконтактной системы, используемой при реализации технологического процесса восстановления деталей почвообрабатывающих машин методом электроконтактного термомеханического деформирования.

Keywords: mathematical model, electrocontact heating, contact piece, heating-up time, recrystallization temperature, thermal state prediction.

By means of mathematical modeling of electrocontact heating at abruptly variable load, the possibility to determine the time required to reach the recrystallization temperature of the material of one of the contact pieces in a thermally symmetrical contact pair is shown. There is a composite rod in the material of the contact pieces; the heat losses from the lateral surface of this rod may be neglected. The original mathematical model of the thermal process in one contact element (contact piece) is a mixed boundary value problem of heat conduction. The measured temperature is reached at the rod end accessible for direct measurements. At the contact rod end, the specific power released at the transitional contact resistor is reached. The transition from the initial mathematical model to the boundary value problem with adiabatic condition at the open end of the rod is carried out; the condition is true at the action of abruptly variable load in the relevant time interval. Simplified approximate calculation equation for determining the temperature of the contact surface is obtained and verified by using the least squares method and a priori known exact analytical solutions of the model problem. The calculation equation to determine the time of reaching the recrystallization temperature of the material of contact pieces is obtained. The possibility of using the ob-

tained equation to solve the problem of forecasting the thermal state of the electrocontact system used in the technological processes of the recovery of

tillage equipment parts by electric-thermomechanical deformation is shown.

Болтенков Андрей Анатольевич, к.т.н., доцент, декан фак-та заочного образования, Алтайский государственный аграрный университет. Тел.: (3852) 628-056. E-mail: Boltenkov_A@mail.ru.

Сарсенбаев Ерлан Алиаскарович, докторант, Казахский национальный исследовательский технический университет им. К.И. Сатпаева, г. Алматы, Республика Казахстан. E-mail: erlansar@mail.ru.

Селиверстов Максим Владимирович, ассистент, Алтайский государственный аграрный университет. Тел.: (3852) 628-056. E-mail: Seliv-Maks@yandex.ru.

Шерышев Валерий Павлович, д.т.н., гл. н.с., Казахский национальный исследовательский технический университет им. К.И. Сатпаева, г. Алматы, Республика Казахстан. E-mail: vpsh5@rambler.ru.

Boltenkov Andrey Anatolyevich, Cand. Tech. Sci., Assoc. Prof., Dean, Dept. of Extramural Education, Altai State Agricultural University. Ph.: (3852) 628-056. E-mail: Boltenkov_A@mail.ru.

Sarsenbayev Yerlan Aliaskarovich, Doctoral degree applicant, Kazakh National Research Technical University named after K.I. Satpayev, Almaty, Republic of Kazakhstan. E-mail: erlansar@mail.ru.

Seliverstov Maksim Vladimirovich, Asst., Altai State Agricultural University. Ph.: (3852) 628-056. E-mail: Seliv-Maks@yandex.ru.

Sheryshev Valeriy Pavlovich, Dr. Tech. Sci., Chief Staff Scientist, Kazakh National Research Technical University named after K.I. Satpayev, Almaty, Republic of Kazakhstan. E-mail: vpsh5@rambler.ru.

Введение

Исследование тепловых процессов лежит в основе проектирования большого числа технологических процессов, базирующихся на электроконтактном нагреве, в частности, электроконтактного напекания и термомеханического деформирования [1, 2]. Узловым моментом при этом является определение температуры трудно доступной для прямых измерений контактной поверхности.

Косвенное измерение температуры контактной поверхности обычно проводится с помощью решения граничной обратной задачи теплопроводности (ОЗТ), анализ решения которой представлен в монографии [3]. Вместе с тем сама по себе ОЗТ в математическом смысле является некорректно поставленной задачей математической физики. Поэтому в работе [4] для определения температуры поверхности (труднодоступной) полупроводниковой пластины, взаимодействующей с потоком низкотемпературной плазмы, эта задача поставлена в виде прямой задачи теплопроводности, постановка которой корректна как в физическом, так и в математическом смысле. В работе [5] получено её решение в форме, доступной для реализации с помощью современной микропроцессорной техники [6]. Разработана математическая модель температуры контактной поверхности (температуры недоступной поверхности (ТНП) симметричной электроконтактной системы. Показана возможность её применения к расчёту времени достижения контактной поверхностью температуры рекристаллизации материала контакт-деталей.

Математическая модель температуры контактной поверхности симметричной электроконтактной системы

В общем случае при детальном моделировании процесса элетронагрева контактных соединений необходимо рассматривать трёхмерные электротепловые модели, включающие совместный расчёт взаимосвязанных тепловых и электромагнитных полей. Но поскольку в данном случае построению подлежит достаточно простая математическая модель, реализуемая средствами микропроцессорной техники, мы ограничиваемся одномерной моделью теплового процесса. Электрические параметры (переходное контактное сопротивление и сила тока) входят в выражение для тепловых источников — джоулевы источники теплоты в граничном условии смешанной краевой задачи для уравнения теплопроводности [4].

Следуя подходу, представленному в работе [6], выделим в контактном соединении тонкий составной стержень из материалов контакт-деталей (рис. 1).

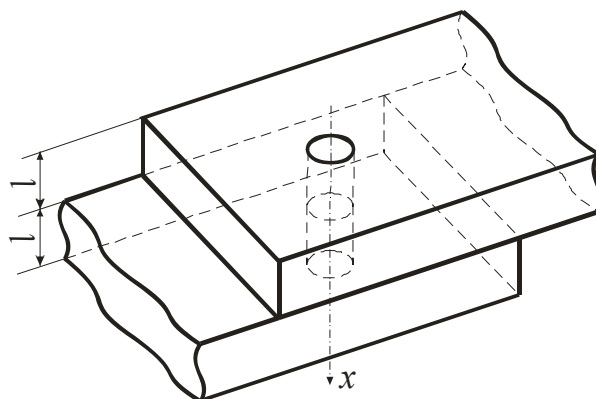


Рис. 1. Выделение составного стержня из материалов контакт-деталей

Поскольку выделенный стержень окружён большим количеством идентичных составных стержней, имеющих распределение температур по длине, практически совпадающее с распределением температур внутри выделенного стержня, то теплоотводом с его боковой поверхности можно пренебречь, т.е. тепловой процесс можно считать одномерным, протекающим вдоль оси стержня.

Рассматривается симметричный относительно плоскости касания электроконтактный нагрев. Симметричная контактная система образована контакт-деталью 1 и 2 (рис. 2), к которым приложено усилие нажатия F .

При прохождении тока I на контактной поверхности электрического контакта 3 выделяется тепловая мощность, генерирующая поверхностную плотность теплового потока q_1 ; q_2 – плотность теплового потока, проходящего через открытую поверхность контакт-детали. Вся контактная система нагревается в результате воздействия на неё теплового потока с плотностью, вычисленной по формуле:

$$q_1 = \frac{I^2 R_k}{2S_{\text{фп}}}, \quad (1)$$

где R_k – переходное контактное сопротивление;

$S_{\text{фп}}$ – фактическая площадь контактной поверхности ($S_{\text{фп}} = \eta \cdot a \cdot b$);

η – эмпирический коэффициент, учитывающий усилие нажатия F и сопротивление металла на смятие.

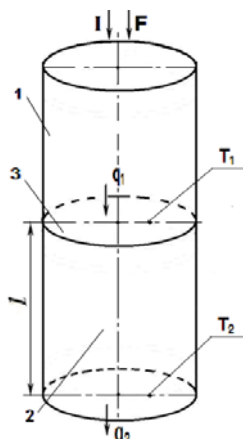


Рис. 2. Схема теплового процесса в стержневой контактной системе:
 1 – первый контактный элемент;
 2 – второй контактный элемент;
 3 – область тепловыделения

В силу симметрии теплового процесса при расчётах можно ограничиться рассмотрением только одного из элементов контактной системы, например, элементом 2 (рис. 2). Предполагаем, что тепловая мощность, выделенная на переходном сопротивлении, распределена равномерно по контактной поверхности и тепловой контакт между контакт-

деталью идеальным. Тепловой процесс считаем одномерным и направленным вдоль оси Ox , совпадающей с осью выделенного составного стержня.

Поскольку в рассматриваемом случае возможность достаточно точного измерения силы тока I и усилия нажатия F позволяет дать достаточно точную оценку плотности теплового потока, проходящего через электрический контакт, то задача определения температуры контактной поверхности (ТНП) может быть поставлена как смешанная краевая задача теплопроводности:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{c\gamma} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, \quad 0 < x < l, t > 0; \quad (2)$$

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial x} = q_1, \quad x = 0, t > 0; \quad (3)$$

$$T(l, t) = \hat{T}_2(t), \quad x = l, t > 0; \quad (4)$$

$$T(x, 0) = T_0, \quad 0 \leq x \leq l, t = 0. \quad (5)$$

где $T(x, t)$ – температурное поле контакт-детали 2 (рис. 2);

l – толщина контакт-детали;

λ – коэффициент теплопроводности;

c – удельная теплоёмкость;

γ – плотность;

$\hat{T}_2(t)$ – измеренная температура доступной для прямых измерений свободной поверхности контакт-детали (температура доступной поверхности – ТДП);

T_0 – начальная температура.

Смешанная краевая задача теплопроводности (2)-(5) для однородного дифференциального уравнения теплопроводности с постоянными коэффициентами имеет аналитическое решение [4]. Вместе с тем это решение сложно реализуемо в виде отдельного автономного устройства, поэтому необходимо провести упрощения.

Введём в рассмотрение безразмерные переменные ξ, τ и $\bar{T}(\xi, \tau)$:

$$\xi = \frac{x}{l}; \quad \tau = \frac{\lambda t}{c l^2}; \quad (6)$$

$$\bar{T}(\xi, \tau) = [T(x, t) - T_0] / [q_1 l / \lambda], \quad (7)$$

где ξ – безразмерная координата;

τ – безразмерное время;

$\bar{T}(\xi, \tau)$ – безразмерная температура и вместо исходной смешанной краевой задачи (2)-(5) будем решать упрощённую близкую к ней на малом интервале времени ($t \sim 1c$) при резко изменившемся воздействии удельной мощности ($q_1 \sim 10^6$ Вт/м²) вторую краевую задачу:

$$\frac{\partial \vartheta}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial \xi^2}, 0 < \xi < 1, \tau > 0; \quad (8)$$

$$-\frac{\partial \vartheta}{\partial \xi} = 1, \xi = 0, \tau > 0; \quad (9)$$

$$-\frac{\partial \vartheta}{\partial x} = 0, \xi = 1, \tau > 0; \quad (10)$$

$$\vartheta(\xi, 0) = 0, 0 \leq \xi \leq 1, \tau = 0. \quad (11)$$

Заменяя в уравнении (8) вторую производную отношениями конечных разностей [7] и учитывая граничное условие (9), получаем:

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{\frac{\theta - \bar{T}_1}{2} - \left(\frac{\theta - \hat{T}_2}{2} \right)}{\frac{1}{2}} = 1 - \frac{\left(\frac{\theta - \hat{T}_2}{2} \right)}{\frac{1}{2}}, \quad (12)$$

$$\frac{1 - \left(\frac{\theta - \hat{T}_2}{2} \right)}{\frac{1}{2}} = 2 - 4\theta + 4\hat{T}_2$$

откуда вытекает задача Коши для обыкновенного дифференциального уравнения первого порядка (приближённая математическая модель температуры срединной поверхности стержня второго контактного элемента):

$$0,25 \frac{d\theta}{dt} + \theta = 0,5 + \hat{T}_2(\bar{t}); \quad \theta(0) = 0, \quad (13)$$

где $\hat{T}_2(\bar{t})$ – безразмерная измеренная температура доступной для измерения температуры открытой поверхности второго контактного элемента.

Поскольку измеренная температура $\hat{T}_2(\bar{t})$ представляет собой кусочно-постоянную функцию времени, на каждом шаге постоянства правой части решение уравнения (13) имеет вид:

$$\theta(\tau^{(k)}) = \left[0,5 + \hat{T}_2(\tau^{(k)}) \right] \times \left[1 - e^{-\frac{\tau^{(k)}}{0,25}} \right], \quad (14)$$

$$k = 1, 2, \dots, n$$

где $\tau^{(k)}$ – отсчёты безразмерного времени;
 k – текущий номер измерения;
 n – конечное значение текущего номера измерений.

С учётом (14) и соотношения $\theta = \frac{T_1 + T_2}{2}$ приближённая расчётная формула для опре-

деления безразмерного значения ТНП записывается в виде:

$$\bar{T}_1(\tau^{(k)}) = 2 \times \left[0,5 + \hat{T}_2(\tau^{(k)}) \right] \times \left[1 - e^{-\frac{\tau^{(k)}}{0,25}} \right] - \hat{T}_2(\tau^{(k)}), k = 1, 2, \dots, n \quad (15)$$

На рисунке 3 приведены результаты вычислений безразмерной температуры контактной поверхности, выполненные по формуле (15) с использованием данных таблицы.

Полученные результаты показывают необходимость уточнения математической модели – приближённой расчётной формулы (15).

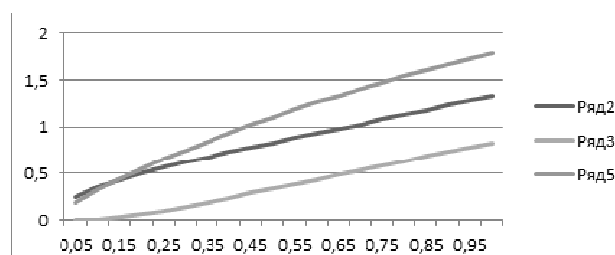


Рис. 3. Безразмерная температура контактной поверхности контактного соединения, вычисленная по формуле (15); ряд 2 – температура контактной поверхности, вычисленная по формуле (17) (вторая колонка таблицы 1); ряд 3 – температура открытой поверхности контакт-детали, вычисленная по формуле (18) (третья колонка таблицы 1); Ряд 5 – температура контактной поверхности, вычисленная по приближённой формуле (15)

Уточнение приближённой расчётной формулы

Решение задачи (8)-(11) имеет вид [3]:

$$\vartheta(\xi, \tau) = \tau + \frac{1}{3} - \xi + \frac{1}{2} \xi^2 - \frac{2}{\pi^2} \sum_{j=1}^{\infty} \frac{1}{j^2} e^{-j^2 \pi^2 \tau} \cos(j \pi \xi) \quad (16)$$

и, в частности, при $\xi = 0$ и при $\xi = 1$:

$$\vartheta(0, \tau) = \tau + \frac{1}{3} - \frac{2}{\pi^2} \sum_{j=1}^{\infty} \frac{1}{j^2} e^{-j^2 \pi^2 \tau}, \quad (17)$$

$$\vartheta(1, \tau) = \tau - \frac{1}{6} - \frac{2}{\pi^2} \sum_{j=1}^{\infty} \frac{1}{j^2} e^{-j^2 \pi^2 \tau} \cos(j \pi). \quad (18)$$

Формулы (17) и (18) представляют собой модели температуры контактной системы в недоступной для измерений точке и доступной соответственно. В таблице приведены значения решения задачи (8)-(11), вычисленные по формулам (17) и (18).

Введём в приближённую формулу (15) поправочный коэффициент k_1 :

$$\bar{T}_1(\tau^{(k)}) = k_1 \left\{ 2 \left[0,5 + \bar{T}_2(\tau^{(k)}) \right] \times \left[1 - e^{-\frac{\tau^{(k)}}{0,25}} \right] - \bar{T}_2(\tau^{(k)}) \right\}, \quad k = 1, 2, \dots, n, \quad (19)$$

который может быть найден методом наименьших квадратов. Для минимизации среднеквадратичного уклонения расчётного безразмерного значения искомой температуры $\bar{T}_1(\tau^{(k)})$ от её точного значения $\vartheta(0, \tau^{(k)}) = \vartheta_1(\tau^{(k)})$ продифференцируем по параметру k_1 функцию:

$$f(k_1) = \sum_{k=1}^n \left\{ k_1 \left\{ 2 \left[0,5 + \bar{T}_2(\tau^{(k)}) \right] \times \left[1 - e^{-\frac{\tau^{(k)}}{0,25}} \right] - \bar{T}_2(\tau^{(k)}) \right\} - \vartheta_1(\tau^{(k)}) \right\}^2 \quad (20)$$

и приравняем полученный результат к нулю. Тогда получим:

$$\frac{d[f(k_1)]}{dk_1} = \frac{d}{dk_1} \left\{ \sum_{k=1}^n \left\{ k_1 \left\{ 2 \left[0,5 + \bar{T}_2(\tau^{(k)}) \right] \times \left[1 - e^{-\frac{\tau^{(k)}}{0,25}} \right] - \bar{T}_2(\tau^{(k)}) \right\} - \vartheta_1(\tau^{(k)}) \right\}^2 \right\} = \quad (21),$$

$$= 2 \sum_{k=1}^n \left\{ k_1 \left\{ 2 \left[0,5 + \bar{T}_2(\tau^{(k)}) \right] \times \left[1 - e^{-\frac{\tau^{(k)}}{0,25}} \right] - \bar{T}_2(\tau^{(k)}) \right\} - \vartheta_1(\tau^{(k)}) \right\} \times \left\{ 2 \left[0,5 + \bar{T}_2(\tau^{(k)}) \right] \times \left[1 - e^{-\frac{\tau^{(k)}}{0,25}} \right] - \bar{T}_2(\tau^{(k)}) \right\} = 0$$

откуда:

$$k_1 = \frac{\sum_{k=1}^n \vartheta_1(\tau^{(k)}) \left\{ 2 \left[0,5 + \bar{T}_2(\tau^{(k)}) \right] \times \left[1 - e^{-\frac{\tau^{(k)}}{0,25}} \right] - \bar{T}_2(\tau^{(k)}) \right\}}{\sum_{k=1}^n \left\{ 2 \left[0,5 + \bar{T}_2(\tau^{(k)}) \right] \times \left[1 - e^{-\frac{\tau^{(k)}}{0,25}} \right] - \bar{T}_2(\tau^{(k)}) \right\}^2}. \quad (22)$$

Таблица

Безразмерные значения модельных температур

k	$\tau^{(k)}$	$\vartheta(0, \tau^{(k)}) = \vartheta_1(\tau^{(k)})$	$\vartheta(1, \tau^{(k)}) = \vartheta_2(\tau^{(k)})$
1	0,05	0,252313	0,000269
2	0,10	0,356826	0,007885
3	0,15	0,437089	0,029306
4	0,20	0,505165	0,061464
5	0,25	0,566146	0,100516
6	0,30	0,622842	0,143824
7	0,35	0,676928	0,189738
8	0,40	0,729443	0,237244
9	0,45	0,780946	0,285721
10	0,50	0,831876	0,334791
11	0,55	0,882444	0,384223
12	0,60	0,932790	0,433877
13	0,65	0,983002	0,483665
14	0,70	1,033131	0,533536
15	0,75	1,083210	0,583457
16	0,80	1,133258	0,633409
17	0,85	1,183287	0,683379
18	0,90	1,233305	0,733361
19	0,95	1,283316	0,783351
20	1,00	1,333323	0,833344

Поправочный коэффициент, вычисленный по формуле (22) с использованием данных таблицы 1 при $\bar{T}_2(\tau^{(k)}) = \vartheta_2(\tau^{(k)})$, равен 0,752. На рисунке 4 приведены результаты восстановления безразмерной температуры ТНП, полученные при $k_1=0,752$.

Сравнение графиков, представленных на рисунках 3 и 4, показывает, что вычисления, выполненные по формуле (19), намного более точные, чем вычисления по формуле (15). Фор-

мула (19) в сочетании с формулой (7) может быть использована для вычисления времени t_r достижения контактной поверхностью температуры рекристаллизации материала T_r .

Но более простая расчётная формула получается из справедливой для больших времён ($\tau \geq 0,5$) формулы [3]:

$$\vartheta(0, \tau) = \tau + \frac{1}{3}, \quad (23)$$

согласно которой: $t_r = \frac{cl}{q_1}(T_r - T_0) - \frac{cl^2}{3\lambda}$.

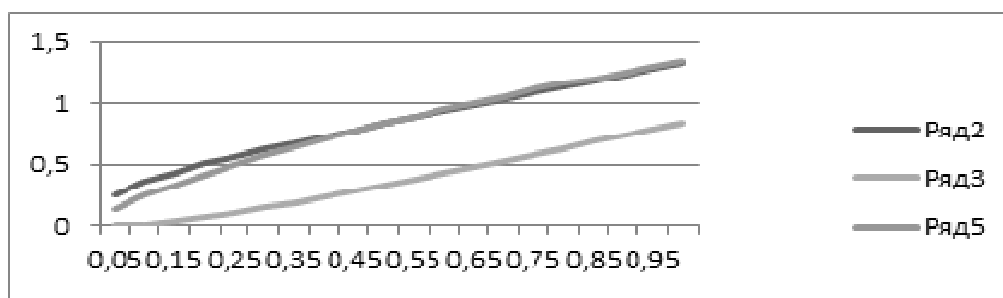


Рис. 4. Безразмерная температура контактной поверхности контактного соединения, вычисленная по формуле (19):
ряд 2 — температура контактной поверхности, вычисленная по формуле (17) (вторая колонка таблицы); ряд 3 — температура открытой поверхности, вычисленная по формуле (18) (третья колонка таблицы);
ряд 5 — температура контактной поверхности, вычисленная по формуле (19)

Полученные расчётные формулы предполагают использование значений плотности теплового потока q_1 , полученных по формуле (1).

Заключение

Предложенный подход к получению простых расчётных формул для определения температуры контактных поверхностей электрических контактных соединений в настоящее время используется при создании семейства интеллектуальных датчиков температуры недоступных поверхностей [6]. Введение в расчётную формулу (19) дополнительных поправочных коэффициентов позволит увеличить точность расчётов. Это открывает возможность применения разработанной методики при совершенствовании технологических процессов восстановления деталей почвообрабатывающей техники, основанных на электроконтактном нагреве.

Библиографический список

1. Boltenkov A.A., Chizhov V.N, Sheryshev V.P., Modelling and prediction of the conditions of the process of electric resistance sintering of metallic powder materials in reconditioning of components // Welding International. — 2002. — Vol. 16. — № 1. — С. 69-72. (Сварочное производство. — 2001. — № 8. — С. 24-27).
2. Шерышев В.П., Чижов В.Н., Селивёрстов М.В., Телгожаева Ф.С. Стержневые системы в задачах моделирования тепловых

процессов в деталях почвообрабатывающих машин при их восстановлении с помощью электроконтактного нагрева // Матер. Междунар. науч. конф. «Моделирование-2010». — Киев, 2010. — Т. III — С. 202-208.

3. Бек Дж., Блакуэлл Б., Сент-Клэр Ч. мл. Некорректные обратные задачи теплопроводности: пер. с англ. — М.: Мир, 1989. — 312 с.

4. Казанский Н.Л., Колпаков А.И., Колпаков В.А., Паранин В.Д. Метод определения температуры поверхности в области ее взаимодействия с потоком низкотемпературной плазмы // Журн. техн. физики. — 2007. — Т. 77. — Вып. 12. — С. 21-25.

5. Бекбаев А.Б., Карбозова А.М., Шерышев В.П. Контроль теплового состояния электрического контакта // Тематический выпуск: Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика: научно-технический журнал. — 2012. — Вып. 3/(19). — С. 575-578.

6. Бекбаев А.Б., Жалмухамед Е., Утебаев Р.М., Колтун Н.А. Лабораторная экспериментальная установка для испытания интеллектуального датчика температуры недоступной поверхности // Вестник КазНТУ им. К.И. Сатпаева. — 2013. — № 6 (100). — С. 36-42.

7. Годунов С.К., Рябенький В.С. Введение в теорию разностных схем. — М.: Физматгиз, 1962.

References

1. Boltenev A.A., Chizhov V.N., Sheryshev V.P. Modelling and prediction of the conditions of the process of electric resistance sintering of metallic powder materials in reconditioning of components // *Welding International*. – 2002. – Vol. 16 (1). – S. 69-72 (*Svarochnoe proizvodstvo*. – 2001. – № 8. – S. 24-27).
2. Sheryshev V.P., Chizhov V.N., Seliverstov M.V., Telgozhaeva F.S. Sterzhnevye sistemy v zadachakh modelirovaniya teplovykh protsessov v detalyakh pochvoobrabatyvayushchikh mashin pri ikh vosstanovlenii s pomoshch'yu elektrokontaktного нагрева // *Materialy mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii «Modelirovanie-2010»*. – Kiev, 2010. – T. III. – С. 202-208.
3. Bek Dzh., Blakuell B., Sent-Kler Ch., ml. Nekorrektnye obratnye zadachi teploprovodnosti / per. s angl. – M.: Mir, 1989. – 312 s.
4. Kazanskii N.L., Kolpakov A.I., Kolpakov V.A., Paranin V.D. Metod opredeleniya temperatury poverkhnosti v oblasti ee vzaimodeistviya s potokom nizkotemperaturnoi plazmy // *Zhurn. tekhn. fiziki*. – 2007. – T. 77. – Vyp. 12. – S. 21-25.
5. Bekbaev A.B., Karbozova A.M., Sheryshev V.P. Kontrol' teplovogo sostoyaniya elektricheskogo kontakta // *Tematicheskii vypusk: Problemy avtomatizirovannogo elektroprivoda. Teoriya i praktika: nauchno-tekhnicheskii zhurnal Kremenchug*. – 2012. – Vyp. 3 (19). – S. 575-578.
6. Bekbaev A.B., Zhalmukhamed E., Utebaev R.M., Koltun N.A. Laboratornaya eksperimental'naya ustanovka dlya ispytaniya intellektual'nogo datchika temperatury nedostupnoi poverkhnosti // *Vestnik KazNTU im. K.I. Satpaeva*. – 2013. – № 6 (100). – S. 36-42.
7. Godunov S.K., Ryaben'kii V.S. Vvedenie v teoriyu raznostnykh skhem. – M.: Fizmatgiz, 1962.



УДК 631 374 621 867

О. Рахматов
O. Rakhmatov

**К ВОПРОСУ ТЕПЛОВОЙ ОПТИМИЗАЦИИ РЕЖИМА ЭКСПЛУАТАЦИИ
СОЛНЕЧНО-ТОПЛИВНОЙ СУШИЛЬНОЙ УСТАНОВКИ
КОНВЕКТИВНОГО ТИПА**

**THE ISSUE OF THERMAL OPTIMIZATION
OF THE OPERATING REGIME OF SOLAR-FUEL CONVECTION DRYER**

Ключевые слова: установка, солнечная радиация, сельхозпродукция, сушка, сушильный агент, камера, коллектор, слой продукта, теплота, конвекция, порозность, оптимизация, коэффициент, массообмен.

Сушка является одним из энергоемких процессов перерабатывающей промышленности. Возрастающее энергопотребление особенно для сушки высоко влажных сельхозпродуктов как виноград, дыня, яблоки и др. требует наряду с рациональным и экономичным использованием традиционных топливных ресурсов (газ, уголь, нефть, электроэнергия и т.п.) поиска и разработки новых альтернативных и возобновляемых источников энергии. В условиях Центрально-Азиатских республик важное место занимает солнечная энергия ввиду её доступности и экологичности. Применение воздушно-солнечного способа сушки на открытых площадях или гелиосушилок ограничено и зависит от климатических условий. В последнее время усилия были направлены на создание энергосберегающей технологии сушки с использованием комбинированных (по энергии) солнечно-топливных сушильных установок. На основе анализа существующих методов

сушки и конструктивных решений сушильных установок автор выдвинул свою концепцию по модернизации и оптимизации процесса сушки, а также энергосбережения. Разработанная им (в соавторстве) двухкамерная комбинированная солнечно-топливная сушильная установка сочетает использование солнечной энергии и традиционной электрической. Конструктивно решен вопрос обеспечения осциллирующего режима сушки как интенсифицирующего фактора данного процесса. Рассмотрен вопрос повышения КПД сушильной установки, даны теоретические предпосылки и аналитические расчеты и выведена обобщенная формула для определения тепловой эффективности. По результатам экспериментов получены кривые зависимости эффективности сушильной установки от температуры нагрева поверхности камеры и отработанного сушильного агента на выходе из сушильной камеры. Доказано, что с повышением температуры отработанного сушильного агента, тепловая эффективность падает. Оптимальной температурой сбросового теплоагента считается $t_2 \approx 35-40^\circ\text{C}$. Также обоснована целесообразность использования теплоаккумулирующей бытовой насадки, позволяющей сэкономить до 14% тепловой энергии, необходимой для процесса сушки.