

## КОНДУКТОМЕТРИЯ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ ПАРАМЕТРОВ ТЕПЛОВОЙ КИНЕТИКИ В ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ

В. М. Коротких, Т. М. Халина, М. В. Дорожкин

*Предполагается, что проводимость системы в копланарно-электродной области растет пропорционально изменению положения фронта горения самораспространяющегося высокотемпературного синтеза. По изменению электрической проводимости определены пространственно-временные функциональные связи тепловой кинетики процесса. Результаты исследований дают возможность утверждать об эффективности применения данной методики при разработке управляемых электротехнологий восстановления и ремонта изношенной сельскохозяйственной техники синтезируемыми материалами.*

*Ключевые слова: ремонт, сельхозтехника, кондуктометрия, электрическая проводимость, температуропроводность, скорость фронта горения, самораспространяющийся высокотемпературный синтез (СВС)*

Укрепление материально-технической базы сельскохозяйственного производства невозможно без современных технологий ремонта инструмента и оборудования.

К 2000 г. количество сельскохозяйственной техники за счёт старения и износа сократилось, более чем в 2 раза, 80 % техники находится в возрасте 10 лет и более. Затраты на приобретение новых запасных частей взамен предельно изношенных достигают 70 и более процентов. Себестоимость же восстановления составляет всего от 15 до 70 % себестоимости изготовления [1]. В этой связи особое значение приобретают вопросы создания способов и технологий восстановления, исходя из сложности ремонтных работ, энергозатрат, наличия расходных материалов и оборудования, их стоимости. Вот почему получение новых высокотвердых износостойких синтезируемых покрытий, с высокой энергоэффективностью при их производстве, применение которых возможно даже на предприятиях с малой ресурсозергообеспеченностью без наличия специального оборудования может решить многие проблемы.

Открытый акад. А. Г. Мержановым и его научной школой самораспространяющийся высокотемпературный синтез (СВС) [2] является процессом, обладающим значительным технологическим потенциалом. Он служит основой создания энергоэффективных технологий получения продуктов различных классов, в том числе для восстановления изношенных рабочих поверхностей оборудования и инструмента сельского хозяйства. СВС допускает различные типы дополнительных

внешних воздействий, посредством которых возможно регулирование структуры и свойств целевых продуктов. Он характеризуется интенсивной экзотермией, поэтому определение теплофизических параметров и управление тепловой кинетикой является важной задачей, решение которой позволяет не только получать поверхности с заданными свойствами, но и выбирать технологические режимы и методы, характеризующиеся более высоким коэффициентом полезного использования энергетических ресурсов. Для рациональной организации восстановления деталей сельскохозяйственной техники с оптимальными комплексами эффективных свойств, исключительно зависящих от кинетики и механизма реакций, набора и типа энергетических воздействий, необходимо диагностировать важнейшие характеристики материалов в пространственно-временной связи. Такой характеристикой является коэффициент температуропроводности в области высоких температур. От этой величины во многом зависит не только процесс твердофазного взаимодействия частиц в многокомпонентной смеси исходных продуктов, но и циклограмма технологического процесса, которая включает такие стадии, как разогрев, СВС, компактирование и т. д.

В работе [3] показана возможность определения коэффициента температуропроводности в ходе развития локального очага воспламенения бинарной смеси Ti-Al в режиме теплового взрыва по скорости фронта горения. Экспериментальный тепловизионный комплекс в исследовании температурной и

## КОНДУКТОМЕТРИЯ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ ПАРАМЕТРОВ ТЕПЛОВОЙ КИНЕТИКИ В ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ

пространственной динамики тепловых процессов на поверхности шихты [3, 4], позволяет добиться хороших результатов выделения электрических сигналов для управления внешними воздействиями в лабораторных условиях, но ограничивает применение метода в активно-управляемых производственно-технологических системах с "закрытыми" реакторами. Теоретическое обоснование замены специальных реакторов с оптико-электронными сенсорами на кондуктометрические с теми же практическими возможностями, а в конечном итоге создание новой технологии – являются целью работы.

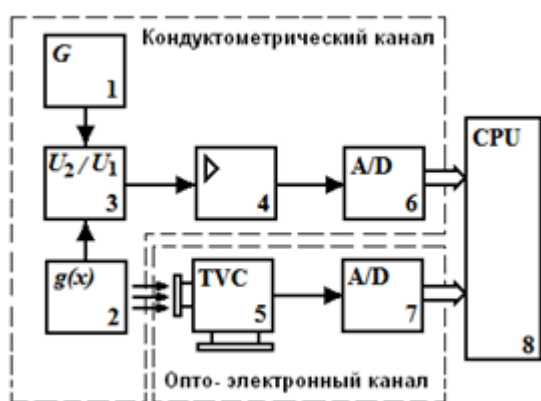


Рисунок 1 – Функциональная схема экспериментального комплекса

Сопоставительному исследованию подверглись оба метода, для чего был разработан диагностический комплекс (рисунок 1). Кондуктометрический канал измерения сравнивался с оптико-электронным во фронтальном СВС системы Ti-Al. Порошок алюминия с размерами частиц  $d=10$  мкм перемешивался с порошком титана с размерами частиц  $d=150$  мкм в соотношении масс, соответствующем стехиометрии соединения  $TiAl_3$ . Проводимость  $G$  такой смеси в свободной насыпке пренебрежительно мала и сопротивление между двумя вертикальными электродами (рисунок 2, а, поз. 1) в начальный момент времени можно считать равной бесконечности. При инициализации СВС копланарным сетчатым нагревателем осуществлялся синтез интерметаллида в режиме фронтального горения (поз. 2). Структура фазовой диаграммы системы Ti-Al [5] указывает на то, что основным продуктом синтеза (поз. 3) является интерметаллид  $TiAl_3$ . Остальные фазы синтезируются достаточно медленно после достижения максимальных температур саморазогрева [6].

Таким образом, параметры саморазогрева определяются кинетикой синтеза интерметаллида  $TiAl_3$ . Анализируя температурные поля (рисунок 2, а), можно сделать вывод, что фронт горения распространяется с постоянной скоростью, причем соответствующие температурные градиенты также постоянны, поэтому в качестве приближенной модели можно применить модель стационарного фронта, удовлетворяющую классической задаче Стефана с подвижной границей [7].

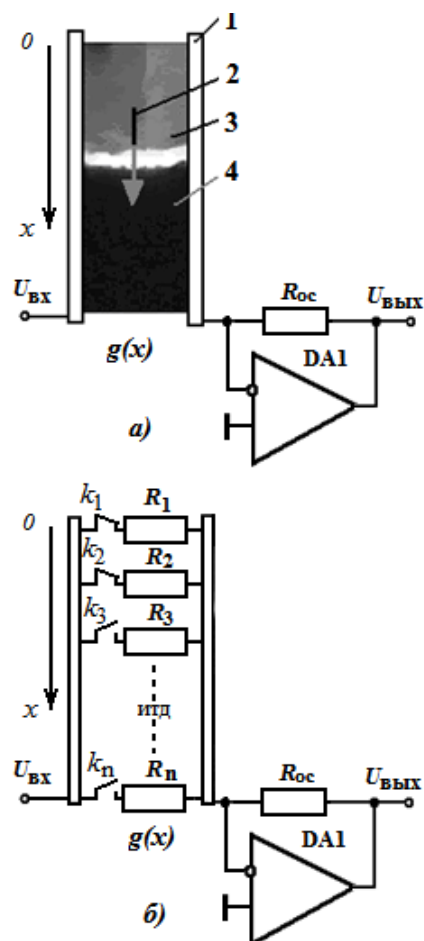


Рисунок 2 – Экспериментальная схема первичного преобразователя электрической проводимости в электрический сигнал: а) конденсированная электропроводная среда; б) схема замещения

В случае установления стационарного режима распространения фронта горения должно выполняться соотношение:

$$-\lambda \left( \frac{dT}{dx} \right)_f F = \frac{dQ}{dt} = q \frac{dm}{dt} \quad (1)$$

Здесь производная  $\frac{dT}{dx}$  берется на границе фронта горения,  $q$  – удельный тепловой эф-

факт реакции,  $t$  – время. С учетом того, что приращение массы  $dm = \rho F dx$  идет за счет приращения координаты  $dx$ , где,  $F$  – площадь сечения реактора,  $\rho$  – эффективная плотность шихты, то уравнение (1) переписывается как:

$$-\lambda \left( \frac{dT}{dx} \right)_f F = \rho q \frac{dx}{dt}. \quad (2)$$

Поделив (2) на  $c_p \rho$ , где  $c_p = \frac{q}{T_{\max} - T_0}$  –

удельная теплоемкость, получим:

$$-a \left( \frac{dT}{dx} \right)_f = (T_{\max} - T_0) \frac{dx}{dt}. \quad (3)$$

Здесь  $(T_{\max} - T_0)$  – разность между максимальной температурой разогрева шихты и температура начала реакции,  $a$  – коэффициент температуропроводности. Тогда имеем:

$$a = \left[ (T_{\max} - T_0) \frac{dx}{dt} \right] / \left| \frac{dT}{dx} \right|_f. \quad (4)$$

Решение (4) обеспечивается измерением  $\frac{dx}{dt}$  и  $\frac{dT}{dx}$  оптико-электронным или кондуктометрическим способом.

Для кондуктометрии используется тот же экспериментальный реактор (рисунок 3). Он выполнен из термостойкого электроизоляционного материала – керамики, с кварцевыми стеклами по торцам для оптического контроля. Реакционная смесь свободной насыпки имеет пренебрежительно малую электрическую проводимость между двумя плоскими электродами, которые расположены вдоль стенок реактора. Проводимость появляется в зоне реакции, а по мере продвижения фронта растет. Рост её во время реакции обусловлен увеличением площади поперечного сечения проводящего слоя  $dS = a dx$  за счёт пропорционального роста координаты  $x$ . Скорость роста проводимости СВС продукта  $v_G = \frac{dg}{dt}$  происходит со скоростью, равной или кратной скорости фронта горения  $v_\phi = \frac{dx}{dt}$ . Первичным преобразователем (датчиком) параметрического типа является сам продукт СВС. Включение его с изменяемой проводимостью  $g$  осуществляется во входную цепь операционного усилителя (DA1) с опорным напря-

жением на входе  $U_{оп} = U_{вх}$  (рисунок 2, а). При моделировании сигналов в параметрах электропроводности имеем усилительный каскад, в котором глубина цепи обратной связи зависит от проводимости  $g$ . Эквивалентная схема его включения изображена на рисунке 2, б и на рисунке 4, блок 2.

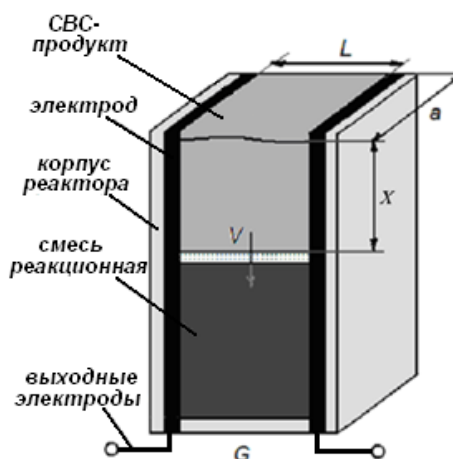


Рисунок 3 – Экспериментальный реактор

Для электрического узла (инвертирующий вход ОУ), с учётом бесконечно большого входного сопротивления ОУ, имеем:

$$-U_{вх} g(x) = \frac{U_{вых}}{R_{oc}}$$

или

$$U_{вых} = -U_{вх} k(g)_v, \quad (5)$$

где  $k(g)_v = \frac{1}{\gamma(g)}$  – коэффициент уси-

ления,  $\gamma(g) = -\frac{1}{g R_{oc}}$  – коэффициент об-

ратной связи. В свою очередь, проводимость среды СВС (рисунок 3) зависит от геометрических размеров реактора и скорости фронта горения. Это видно из соотношения

$$g = \frac{1}{r(x)}, \quad (6)$$

где  $r(x) = \sigma_T \frac{L}{ax}$ ,

$\sigma_T$  – удельное электрическое сопротивление конденсированной электропроводной среды продукта СВС,

$L$  – расстояние между электродами,  
 $a$  – ширина электродов,

КОНДУКТОМЕТРИЯ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ ПАРАМЕТРОВ ТЕПЛОВОЙ КИНЕТИКИ  
В ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ

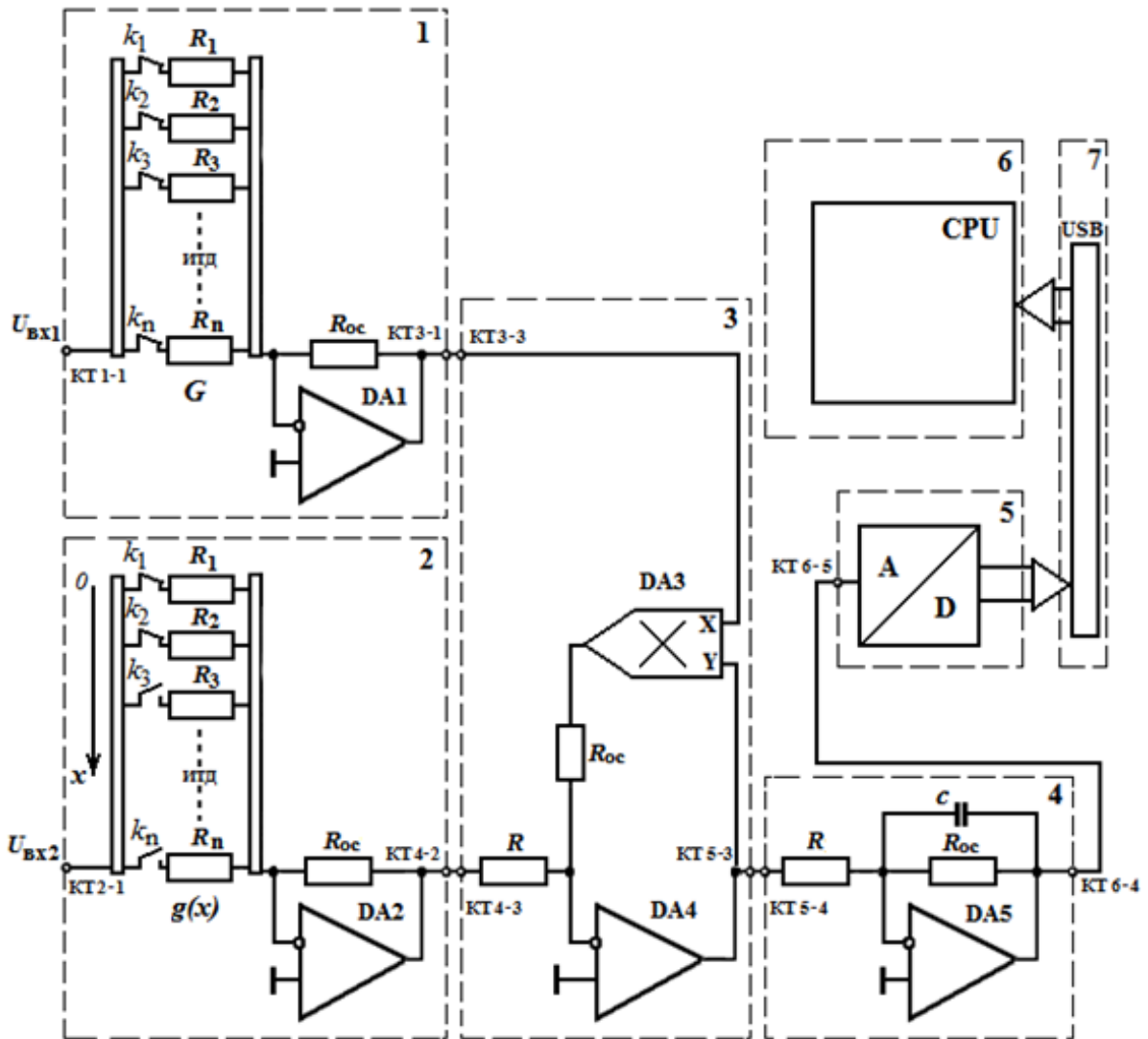


Рисунок 4 – Электрическая схема экспериментального аналогового процессора для исследования динамики относительной проводимости продукта СВС

$x$  – расстояние (координата), пройденное фронтом горения за время  $t$ .

С учётом геометрических размеров выражение (6) переписывается  $g = \frac{ax}{\sigma_T L}$ , а если

допустить, что расстояние между электродами равно ширине электродов  $a = L$ , то

$$x = \sigma_T g. \quad (7)$$

Продифференцировав (7) по времени получим скорость фронта горения:

$$V_f = \frac{dx}{dt} = \sigma_T \frac{dg}{dt}$$

или

$$V_f = \sigma_T V_g. \quad (8)$$

Выразив температуры системы  $T$  через удельные сопротивления  $\rho$  и температурный коэффициент сопротивления  $\alpha$ , имеем:

$$T_{\max} - T_0 = \frac{\rho_T - \rho_0}{\alpha \rho_0}. \quad (9)$$

Подставим в формулу (4) выражения (8), (9), и с учётом того, что производная  $\frac{dT}{dx}$  берётся

на границе фронта горения как величина постоянная для данной реакции, выразим коэффициент температуропроводности через электропроводимость:

$$a = \left[ \left( \frac{\rho_T - \rho_0}{\alpha \rho_0} \right) \sigma_T \frac{dg}{dt} \right] / \left. \frac{dT}{dx} \right|_f$$

или

$$a = \beta V_g, \quad (10)$$

где  $\beta$  – теплоэлектрическая константа реакции.

Для подтверждения правильности полученной модели исследовалась относительная проводимость с использованием разработанного экспериментального аналогового процессора, электрическая схема которого представлена на рисунке 4. Блок 1, создает сигнал сравнения пропорциональный проводимости  $G$ . Параметры усилительных каскадов (блок 1, 2) определяются параметрами цепей обратной связи, зависящими от изменяющейся проводимости  $g(x)$  и постоянной проводимости  $G$ . Для электрического узла (инвертирующий вход), с учётом бесконечно большого входного сопротивления ОУ, имеем:

$$-U_{BX1}G = \frac{U_{ВЫХ1}}{R_{OC}} \text{ и } -U_{BX2}g = \frac{U_{ВЫХ2}}{R_{OC}};$$

$$U_{ВЫХ1} = -U_{BX1}k(G)_V$$

и

$$U_{ВЫХ2} = -U_{BX2}k(g)_V, \quad (11)$$

для контрольных точек КТ3-1 и КТ4-2 соответственно, где  $k(G)_V = \frac{1}{\gamma(G)}$  и

$k(g)_V = \frac{1}{\gamma(g)}$  – соответствующие коэффициенты усиления,  $\gamma(G) = -\frac{1}{GR_{OC}}$  и

$\gamma(g) = -\frac{1}{gR_{OC}}$  – соответствующие коэффициенты обратной связи. С учетом коэффициентов обратной связи и  $U_{BX1} = U_{OP}$ ,

$U_{ВХ2} = U_{OP}$  (11) переписывается:

$$U_{ВЫХ1} = \frac{U_{OP}}{\gamma(G)} = -U_{OP}GR_{OC},$$

$$U_{ВЫХ2} = \frac{U_{OP}}{\gamma(g)} = -U_{OP}gR_{OC}.$$

Модель сигнала относительной проводимости формируется на аналоговом четырехквadrантном перемножителе (ДА3), который включен в цепь обратной связи ОУ (ДА4) с учетом

$$\frac{-U_{OP}gR_{OC}}{R} = -\frac{(-U_{OP}GR_{OC})(U_{ВЫХ3})}{R}$$

имеет вид:

$$U_{ВЫХ3} = -\frac{-U_{OP}gR_{OC}R}{-U_{OP}GR_{OC}R}$$

или с учетом равенства всех сопротивлений

$$\text{величине } R, U_{ВЫХ3} = -\frac{g}{G}.$$

Блок 4 является масштабным инвертирующим усилителем и фильтром нижних частот. Аналоговые сигналы в контрольных точках сведены в таблице 1.

Таблица 1 – Напряжения контрольных точек

КТ1-1	$U_{BX1}=U_{OP}$
КТ2-1	$U_{BX2}=U_{OP}$
КТ3-1	$U_{ВЫХ1}=U_{OP}RG$
КТ4-2	$U_{ВЫХ2}=U_{OP}Rg$
КТ5-3	$U_{ВЫХ3}=g(x)/G$
КТ6-4	$U_{ВЫХ4}=k g/G$

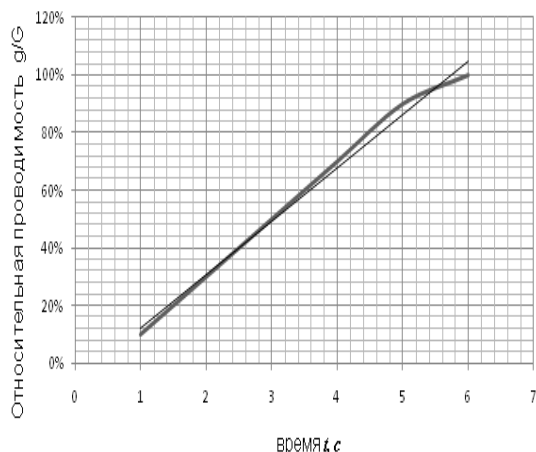
Аналого-цифровое преобразование и автоматический ввод в ЭВМ осуществляется с помощью виртуального цифрового осциллографа (таблица 2).

Таблица 2 – Технические характеристики аналого-цифрового преобразователя

Количество каналов	2
Частота дискретизации	100 Гц ... 200 КГц (осциллограф) 0,01 Гц ... 200 КГц (самописец)
Глубина памяти чтения через буфер	1126 отсчетов/канал (1 канал), 563 отсчетов/канал (2 канала)
Потоковое чтение	64К отсчетов/канал (1 или 2 канала)
Входное напряжение	-20 ... +20 В (аппаратно 2 поддиапазона)
Разрядность АЦП	10 бит
Синхронизация	абсолютная (по нарастающему/спадающему фронту)

Диаграмма зависимости относительной проводимости от времени во фронте горения отражена на рисунке 5, жирная линия имеет отклик системы на внешнее энергетическое воздействие – незначительный нагрев шихты через время  $t = 3 \div 5$  с, как следствие, увеличение скорости фронта горения. Через время  $t = 5$  с повышенная концентрация инертных в шихте приводит к замедлению скорости. Тонкая линия на графике – процесс без внешних энергетических воздействий.

## КОНДУКТОМЕТРИЯ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ ПАРАМЕТРОВ ТЕПЛОВОЙ КИНЕТИКИ В ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ



*Рисунок 5 – Зависимость относительной проводимости от времени во фронте горения*

Таким образом, для определения коэффициента температуропроводности достаточно экспериментальных данных о скорости изменения электропроводности:

- из диаграммы зависимости относительной проводимости от времени видно, что электропроводность, и, следовательно, фронт горения имеют постоянные скорости, что подтверждает корректность применения формулы (10) и соответствие модели стационарного распространения волны горения. Это позволяет рассматривать коэффициент температуропроводности и теплоэлектрическую константу, как константы реагирующей смеси;

- из приведенной на рисунке 5 зависимости изменения проводимости следует, что пространственно-временная связь может быть описана линейными уравнениями. При высоте реактора  $x = 83$  мм скорость фронта горения равна 13,83 мм/с, а оценка величины коэффициента температуропроводности дает значение  $a = 0,217$  см<sup>2</sup>/с, что удовлетворительно согласуется с величинами, приводимыми в [3] и [6] для TiAl<sub>3</sub> при нормальных условиях;

- возможность контроля и непосредственного управления энергетическим воздействием в ходе синтеза, например за счёт пропускания электрического тока через реагирующие компоненты [8], расширяет область применения методики получения материалов с заданными свойствами и может быть распространена на аналогичные задачи в управляемых энергоэффективных электротехнологиях ревитализации сельскохозяйственной техники.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Соломкин, А. П. Восстановление изношенных деталей сельхозтехники / А. П. Соломкин, П. А. Комаренко, В. А. Бабушкин. – Режим доступа: <http://www.tspc.ru/about/lit/agrotechprotection> (дата обращения: 10.11.2010).
2. Евстигнеев, В. В. Интегральные технологии самораспространяющегося высокотемпературного синтеза / В. В. Евстигнеев, Б. М. Вольпе и др. – М. : Высш. Шк., 1996. – 273 с.
3. Гуляев, П. Ю. Теплофизические характеристики синтеза алюминидов титана в режиме теплового взрыва / П. Ю. Гуляев, В. В. Евстигнеев, В. Ю. Филимонов, В. М. Коротких // Вестник АлтГТУ. – Барнаул, – 1999, – № 2.
4. Коротких, В. М. Телевизионные методы регистрации и контроля теплофизических параметров в технологиях самораспространяющегося высокотемпературного синтеза : автореферат диссертации на соискание учёной степени кандидата технических наук / В. М. Коротких. – Барнаул, 1999, – С. 11.
5. Кирдяшкин, А. И. Структурные превращения компонентов порошковой смеси в волне безгазового горения / А. И. Кирдяшкин, О. К. Лепаква, Ю. М. Максимов и др. // ФГВ, – 1989, – т. 25, – № 6. – С. 67–72.
6. Самсонов, Г. В. Тугоплавкие соединения / Г. В. Самсонов, И. М. Винницкий. – М. : "Металлургия", 1976. – 560 с.
7. Лыков, А. В. Теория теплопроводности / А. В. Лыков. – М. : "Высшая школа", 1967. – с. 421–427.
8. Коротких, В. М. Экспериментальное получение функциональной зависимости скорости распространения фронта горения от начальной температуры / В. М. Коротких, С. П. Рябов // Самораспространяющийся высокотемпературный синтез : сборник научных трудов. – Новосибирск : Изд-во "Наука", 2001. – с. 132–136.

**Коротких В. М.**, к.т.н., профессор, E-mail: [vkorot@mail.ru](mailto:vkorot@mail.ru), **Халина Т. М.**, д.т.н., профессор, E-mail: [temf@yandex.ru](mailto:temf@yandex.ru), **Дорожкин М. В.**, инженер, E-mail: [maxmusicd@mail.ru](mailto:maxmusicd@mail.ru), Россия, Алтайский край, г. Барнаул, ФГБОУ ВПО "Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова", кафедра «Электротехника и автоматизированный электропривод». +7(385-2)29-07-88.