

УДК 536.24

## УГОЛЬНЫЙ СЛОЙ ПРИ МИКРОВОЛНОВОМ НАГРЕВЕ: АНАЛИТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИ СМЕШАННЫХ ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЯХ I И II РОДА

**Саломатов Владимир Васильевич,**

д-р техн. наук, профессор, главный научный сотрудник  
Института теплофизики СО РАН, Россия, 630090, г. Новосибирск,  
пр. Акад. Лаврентьева, 1. E-mail: vvs@itp.nsc.ru

**Карелин Вадим Александрович,**

магистрант Национального исследовательского Новосибирского  
государственного университета, Россия, 630090, г. Новосибирск,  
ул. Пирогова, 2. E-mail: vad2hen@mail.ru

**Заворин Александр Сергеевич,**

д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой парогенераторостроения  
и парогенераторных установок Национального исследовательского  
Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск,  
пр. Ленина, 30. E-mail: zavorin@tpu.ru

**Саломатов Василий Владимирович,**

канд. физ.-мат. наук, ведущий программист Института теплофизики  
СО РАН, Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Акад. Лаврентьева, 1.  
E-mail: vvsalomatov@mail.ru

**Пащенко Сергей Эдуардович,**

канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник Национального  
исследовательского Новосибирского государственного университета,  
Россия, 630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2.  
E-mail: pashenko-ecolog@yandex.ru

**Актуальность работы** обусловлена перспективностью применения СВЧ-излучения в технологиях энергетического топливоиспользования на стадиях подготовки твердого топлива к пылеугольному сжиганию, включая подсушку и предгорелочную термическую обработку. Немногочисленные известные результаты лабораторных экспериментов свидетельствуют о наличии структурных эффектов, приводящих к повышению реакционной способности и уменьшению недожога топлива, а также к сокращению генерации токсинов.

**Цель работы.** Получение аналитического выражения для температурного поля в угольном массиве, необходимого для параметрического анализа технологических условий микроволнового воздействия.

**Методы исследования.** Построение аналитически строгих задач теплопереноса, решение которых, как правило, возможно только в условиях существенных упрощений. При принятом постоянстве электрофизических и технологических свойств угля физическая картина процесса определяется падающей на угольный слой плоской электромагнитной волной, которая формирует внутренний источник тепла по закону Бугера. Уравнение энергии в форме Фурье в этом случае рассматривается независимо от уравнений электродинамики Максвелла. В данной постановке решение выделенных задач проведено с помощью метода интегрального преобразования Лапласа.

**Результаты.** Выведенные аналитические решения по температурным полям получены при смешанных граничных условиях с достаточно произвольными изменениями во времени температуры одной поверхности и плотности потока на противоположной границе. Для ряда частных случаев на этой основе может быть получен обширный ряд упрощенных решений, доступных для параметрического анализа, с обоснованием оптимальных управляющих параметров технологии, востребованных инженерной практикой при проектной разработке и эксплуатации СВЧ-систем обработки твердого топлива в энергетике, а также в углехимии.

### **Ключевые слова:**

Уголь, микроволновая энергия, уравнения Максвелла, уравнение теплопроводности Фурье, закон Бугера, смешанные граничные условия, тепловой режим.

### **Введение**

Новые области применения СВЧ-излучения связаны с тем, что данное излучение проявляет свои специфические особенности по сравнению с традиционными способами нагрева, а именно: селективность поглощения в зависимости от диэлек-

трических свойств материала, возможность модулировать энергию в пространстве и времени, использовать ее в сочетании с другими источниками энергии для получения оптимальных температурных режимов. Результаты практического применения микроволновой энергии показали сокраще-

ние времени проведения технологического процесса нагрева, продемонстрировали энергоэффективность использования СВЧ-энергии, позволили достичь объемного нагрева вещества, дали возможность интенсифицировать технологию нагрева [1].

К настоящему моменту Э. Окрессом, Г. Пюшнером, А.Н. Диденко и др. [1–7] были выполнены фундаментальные теоретические и экспериментальные работы по воздействию сверхвысокочастотного излучения на материалы, включая и уголь. Исследование СВЧ-нагрева диэлектрических материалов с разными целевыми установками проводили А.В. Нетушил, Ю.С. Архангельский, Р.Г. Ругинец, Р.Ш. Килькеев, С.К. Брыков, Л.Э. Рикенглаз и др. [8–18]. Математическое моделирование электромагнитных и тепловых полей при СВЧ-нагреве диэлектрических сред выполнили В.И. Анфиногентов, Г.А. Морозов, Т.К. Гараев и др. специалисты Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева [18, 19]. В Иркутском государственном техническом университете Н.П. Коноваловым, П.Н. Коноваловым, В.В. Федчишиным, А.А. Хайдуровой проводились экспериментальные исследования влияния СВЧ-излучения на уголь [6, 20, 21]. Проведенными исследованиями проблема диэлектрического нагрева электромагнитным излучением не исчерпывается. Не вызывает сомнения необходимость и целесообразность выполнения дальнейшей программы теории СВЧ-нагрева.

Метод СВЧ-нагрева основан на поглощении энергии веществом. Электромагнитное поле, проникая в объект, взаимодействует с заряженными частицами тела и вызывает их колебания, что генерирует излучение этих заряженных частиц. Совокупность таких микроскопических процессов приводит к поглощению энергии поля в объекте. Диэлектрический нагрев имеет существенное преимущество, так как позволяет:

- концентрировать очень большие мощности в малых объемах;
- получать равномерный нагрев материала даже с низкой теплопроводностью при большой интенсивности нагрева;
- легко осуществлять избирательный нагрев;
- регулировать заданный температурный режим и др.

Наибольший интерес для теории и практики представляют, прежде всего, аналитически строгие решения задач СВЧ-нагрева. С их помощью легко осуществляется параметрический анализ микроволнового нагрева, проводятся экспресс-расчеты тепловых процессов, выявляются фундаментальные закономерности. Цель данного исследования связана с поиском таких решений, в частности с часто встречающимися на практике случаями СВЧ-воздействия на угольный слой со смешанными условиями теплоотвода с его внешних поверхностей.

## 1. Решение первой задачи

Задача связана с поиском температурного поля при наличии произвольных по времени граничных условий I и II рода. При этом решению подлежит следующая система уравнений микроволнового нагрева угольного слоя:

$$\frac{\partial T(x,t)}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T(x,t)}{\partial x^2} + \frac{q_{v_0}}{c\rho} e^{-\kappa x}, \quad (1.1)$$

$$T(x,0) = f(x), \quad (1.2)$$

$$T(0,t) = T_1(t), \quad (1.3)$$

$$\frac{\partial T(\delta,t)}{\partial x} = \frac{q_2(t)}{\lambda}, \quad (1.4)$$

где  $T(x,t)$  – текущее температурное поле, К;  $x$  – поперечная координата, м;  $t$  – время, с;  $a$  – температуропроводность, м<sup>2</sup>/с;  $q_{v_0}$  – максимальное значение внутреннего источника тепла, Вт/м<sup>3</sup>;  $c$  – теплоемкость, кДж/кг·К;  $\rho$  – плотность, кг/м<sup>3</sup>;  $\kappa$  – коэффициент поглощения в законе Бугера, 1/м;  $T_1(t)$  – переменная по времени температура наружной поверхности, К;  $q_2(t)$  – нестационарная плотность теплого потока на внутренней поверхности, Вт/м<sup>2</sup>;  $\lambda$  – теплопроводность угля, Вт/м·К.

Схема этой задачи представлена на рис. 1.

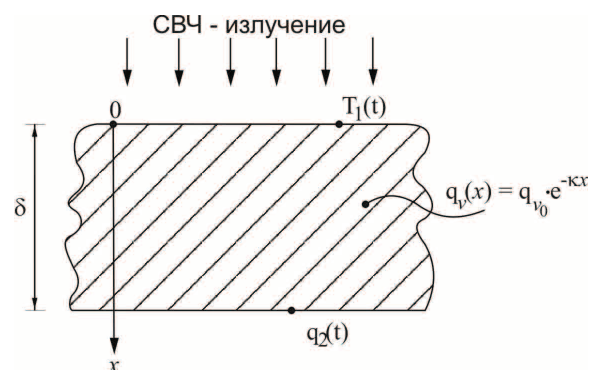


Рис. 1. Схема задачи микроволнового нагрева угольной пластины при смешанных граничных условиях

Fig. 1. Scheme of microwave heating of coal plates with mixed boundary conditions

Для упрощения процедуры построения итогового решения системы (1.1)–(1.4) переведем эту систему с помощью нового преобразования

$$u(x,t) = T(x,t) - T_1(t) - x \frac{q_2(t)}{\lambda} \quad (1.5)$$

к виду с однородными граничными условиями:

$$\frac{\partial u(x,t)}{\partial t} = a \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial x^2} + q_v(x,t), \quad (1.6)$$

где  $q_v(x,t) = \frac{q_{v_0}}{c\rho} e^{-\kappa x} - T_1'(t) - x \frac{q_2'(t)}{\lambda}$ , «'» – знак первой производной по времени.

$$u(x,0) = F(x), \quad (1.7)$$

$$F(x) = f(x) - T_1(0) - x \frac{q_2(0)}{\lambda},$$

$$u(0,t)=0, \tag{1.8}$$

$$\frac{\partial u(\delta,t)}{\partial x} = 0. \tag{1.9}$$

Применяя к (1.6)–(1.9) трансформанту интегрального преобразования Лапласа [22], решая преобразованную задачу относительно изображения температурной функции и переходя к оригиналам по правилам обратного преобразования, получим выражение для температурного поля угольного слоя в достаточно общем виде:

$$T(x,t) =$$

$$= \int_0^t \int_0^\delta \left\{ 2 \sum_{n=1}^{\infty} e^{-an^2\pi^2 \frac{t-\tau}{\delta^2}} \left[ \begin{array}{l} \cos\left(n\pi \frac{x-\eta}{2\delta}\right) - \\ -\cos\left(n\pi \frac{x+\eta}{2\delta}\right) + \\ +\cos\left(n\pi \frac{x+\eta-2\delta}{2\delta}\right) - \\ -\cos\left(n\pi \frac{x-\eta-2\delta}{2\delta}\right) \end{array} \right] \times \right. \tag{1.10}$$

$$\times \left[ \frac{q_{v_0}}{c\rho} e^{-k\eta} - T_1'(\tau) - \eta \frac{q_2'(\tau)}{\lambda} \right] d\eta d\tau$$

$$+ \int_0^\delta \left\{ 2 \sum_{n=1}^{\infty} e^{-an^2\pi^2 \frac{t}{\delta^2}} \left[ \begin{array}{l} \cos\left(n\pi \frac{x-\eta}{2\delta}\right) - \\ -\cos\left(n\pi \frac{x+\eta}{2\delta}\right) + \\ +\cos\left(n\pi \frac{x+\eta-2\delta}{2\delta}\right) - \\ -\cos\left(n\pi \frac{x-\eta-2\delta}{2\delta}\right) \end{array} \right] \times \right.$$

$$\times \left[ f(\eta) - T_1(0) - \eta \frac{q_2(0)}{\lambda} \right] d\eta$$

## 2. Решение второй задачи

Рассмотрим еще один пример разогрева угольной пластины микроволновым излучением в условиях смешанного отвода тепла с граничных поверхностей, который допускает получение строгого аналитического решения. Схема такой задачи приведена на рис. 2.

Математическая постановка задачи состоит из следующей системы уравнений:

$$\frac{\partial T(x,t)}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T(x,t)}{\partial x^2} + \frac{q_{v_0}}{c\rho} e^{-kx}, \tag{2.1}$$

$$T(x,0)=f(x), \tag{2.2}$$

$$\frac{\partial T(0,t)}{\partial x} = \frac{q_1(t)}{\lambda}, \tag{2.3}$$

$$T(\delta,t)=T_2(t). \tag{2.4}$$

С помощью новой независимой переменной

$$u(x,t) = T(x,t) - (x-\delta) \frac{q_1(t)}{\lambda} - T_2(t) \tag{2.5}$$

переведем систему (2.1)–(2.4) к более простой с однородными граничными условиями:

$$\frac{\partial u(x,t)}{\partial t} = a \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial x^2} + q_v(x,t), \tag{2.6}$$

где  $q_v(x,t) = \frac{q_{v_0}}{c\rho} e^{-kx} - (x-\delta) \frac{q_1'(t)}{\lambda} - T_2'(t)$ , «'» – знак

первой производной по времени,

$$u(x,0)=F(x), \tag{2.7}$$

где  $F(x) = f(x) - (x-\delta) \frac{q_1(0)}{\lambda} - T_2(0)$ ,

$$\frac{\partial u(0,t)}{\partial x} = 0, \tag{2.8}$$

$$u(\delta,t)=0. \tag{2.9}$$

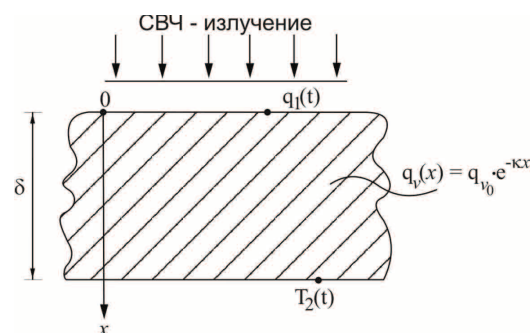


Рис. 2. Схема задачи нагрева неограниченного угольного слоя энергией СВЧ при смешанных граничных условиях теплоотвода

Fig. 2. Scheme of heating of unlimited coal layer of microwave energy with mixed boundary conditions of the heat sink

Решение системы уравнений (2.6)–(2.9) строится наиболее эффективно с применением интегрального преобразования Лапласа [22]. Переводя сформулированную задачу в область изображений, решая её относительно изображения искомой температурной функции, возвращаясь к оригиналам по правилам обратного преобразования, получим выражение температурного поля в угольном слое в наиболее общем виде:

$$T(x,t) =$$

$$= \int_0^t \int_0^\delta \left\{ 2 \sum_{n=1}^{\infty} e^{-an^2\pi^2 \frac{t-\tau}{\delta^2}} \left[ \begin{array}{l} \cos\left(n\pi \frac{x-\eta}{4\delta}\right) + \\ +\cos\left(n\pi \frac{x+\eta}{4\delta}\right) - \\ -\cos\left(n\pi \frac{x+\eta-2\delta}{4\delta}\right) - \\ -\cos\left(n\pi \frac{x-\eta-2\delta}{4\delta}\right) \end{array} \right] \times \right.$$

$$\times \left[ \frac{q_{v_0}}{c\rho} e^{-k\eta} - (\eta-\delta) \frac{q_1(\tau)}{\lambda} - T_2(\tau) \right]$$

$$\begin{aligned} & \times d\eta d\tau + \\ & + \int_0^{\delta} 2 \sum_{n=1}^{\infty} e^{-an^2 \pi^2 \frac{t}{\delta}} \times \\ & \left. \left\{ \begin{aligned} & \left[ \begin{aligned} & \cos\left(n\pi \frac{x-\eta}{4\delta}\right) + \\ & + \cos\left(n\pi \frac{x+\eta}{4\delta}\right) - \\ & - \cos\left(n\pi \frac{x+\eta-2\delta}{4\delta}\right) - \\ & \cos\left(n\pi \frac{x-\eta-2\delta}{4\delta}\right) \end{aligned} \right] \times \\ & \times \left[ f(\eta) - (\eta-\delta) \frac{q_1(0)}{\lambda} - T_2(0) \right] d\eta \end{aligned} \right\} \end{aligned} \quad (2.10)$$

### Обсуждение

Выведенные аналитически строгие решения по температурным полям (1.10) и (2.10) достаточно общего вида допускают широкий спектр частных упрощенных решений с возможностью их детального параметрического анализа. Выведенная информация по температурным полям является базовой для оценки параметров СВЧ-зажигания угольного топлива, определения терморазрушающих напряжений, поиска управляющих воздействий автоматизированного СВЧ-нагрева, реализации оптимальных параметров СВЧ-технологии для угольных массивов и др.

Полученные решения несут в себе важную информацию, так как позволяют найти целый ряд параметров технологии СВЧ-нагрева угольного массива:

- 1) исследование на экстремум температурных функций  $T(x,t)$  в (1.10) и (2.10) позволяет вычи-

слить координату максимальной температуры, а подставив ее значение в текущую функцию температурного поля, – определить и само значение максимальной температуры;

- 2) момент зажигания находится из равенства максимальной температуры угольного слоя температуре зажигания;
- 3) уровень опасных терморазрушающих напряжений находится из максимальной разности температур по угольному слою:  $\Delta T_{\max} = T_{\max} - T_{\min}$ ;
- 4) другие технологические параметры, в частности по оптимизации и автоматизации.

### Заключение

Построены аналитически строгие решения двух задач микроволнового нагрева угольного слоя со смешанными и с достаточно произвольными граничными условиями I и II рода. Возможность получения таких решений связана с тем, что в условиях постоянства электрофизических и теплофизических характеристик угля или принятия их постоянными на отдельных интервалах задача микроволнового нагрева решается отдельно от электродинамической задачи Максвелла. Сам внутренний источник тепла от поглощения плоской электромагнитной волны СВЧ подчиняется закону Бугера. При решении эффективен метод интегрального преобразования Лапласа. Полученное обобщенное решение температурных задач позволяет выдать широкий спектр частных результатов, которые востребованы инженерной практикой. Последние являются фундаментом создания энергоэффективных, экологически щадящих и биологически безопасных СВЧ-технологий тепловой обработки угольных массивов.

*Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант № 13-08-01458.*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Угольные технологии с использованием СВЧ-излучения / Вл.В. Саломатов, С.О. Сладков, С.Э. Пащенко, Вас.В. Саломатов // Горение и плазмохимия. – 2014. – Т. 12. – № 2. – С. 77–96.
2. Диденко А.Н. СВЧ-энергетика: теория и практика. – М.: Наука, 2003. – 446 с.
3. Диденко А.Н., Зверев Б.В. СВЧ-энергетика. – М.: Наука, 2000. – 264 с.
4. СВЧ-энергетика / под ред. Э. Окреса. – М.: Мир, 1971. – 272 с.
5. Пюшнер Г. Нагрев энергией сверхвысоких частот: пер. с англ. – М.: Энергия, 1968. – 311 с.
6. Коновалов Н.П. Технология деструкции бурых углей методом нагрева энергией сверхвысокой частоты. – Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2000. – 97 с.
7. Саломатов В.В., Сладков С.О., Пащенко С.Э. СВЧ-технологии в угольной энергетике // Инж.-физ. журнал. – 2012. – № 85 (3). – С. 535–549.
8. Иваницкий В.В. О возможности применения сверхвысокочастотных методов нагрева материалов // Известия высших учебных заведений. Проблемы полиграфии и издательского дела. – 2000. – № 3–4. – С. 42–46.
9. Семенов А.С., Байбури В.В. СВЧ-энергия и ее применение. Особенности, оборудование, технологические процессы. – Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1999. – 114 с.
10. Comparison and modeling of microwave tempering and infrared assisted microwave tempering of frozen potato puree / N. Seyhun, H. Ramaswamy, G. Sumnu, S. Sahin, J. Ahmed // Journal of Food Engineering. – 2009. – № 92 (3). – P. 339–344.
11. Chemkhi S., Zagrouba F., Bellagi A. Modeling and simulation of drying phenomena with rheological behavior // Brazilian Journal of Chemical Engineering. – 2005. – № 22 (2). – P. 153–163.
12. Коломейцев В.А., Комаров В.В. Микроволновые системы с равномерным объемным нагревом. – Саратов: Изд-во СГТУ, 1997. – 160 с.
13. Высокочастотный нагрев диэлектриков и полупроводников / А.В. Нетушил, Б.Я. Жуховицкий, В.Н. Кудин, Е.П. Парини. – М.; Л.: Госэнергоиздат, 1959. – 480 с.
14. Архангельский Ю.С., Девяткин И.И. Сверхвысокочастотные нагревательные установки для интенсификации технологических процессов. – Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1983. – 140 с.
15. Ругинец Р.Г., Килькеев Р.Ш. Локализация тепловыделения в диэлектрике при воздействии СВЧ электромагнитного поля // Инж.-физ. журнал. – 1989. – № 4. – С. 645–650.



16. Ругинец Р.Г., Брыков С.К., Лохару Э.Х. Тепловые режимы при сверхвысокочастотном нагреве диэлектриков // Инж.-физ. журнал. – 1990. – № 59 (5). – С. 853–858.
17. Рикенглаз Л.Э. К теории нагрева диэлектриков мощными электромагнитными полями // Инж.-физ. журнал. – 1974. – 27 (6). – С. 1061–1068.
18. Анфиногентов В.И. Математическое моделирование СВЧ-нагрева диэлектриков. – Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2006. – 140 с.
19. Анфиногентов В.И., Гараев Т.К., Морозов Г.А. Об одной задаче теории СВЧ-нагрева диэлектриков // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. – 2002. – № 3 (27). – С. 21–22.
20. Хайдурова А.А., Федчишин В.В., Коновалов Н.П. Микроволновая сушка бурых углей и повышение их технологических характеристик // Изв. вузов. Проблемы энергетики. – 2010. – № 1–2. – С. 31–35.
21. Хайдурова А.А., Коновалов Н.П., Федчишин В.В. Воздействие микроволновой энергии на бурый уголь для улучшения его технологических характеристик // Теплофизические основы энергетических технологий. – Томск: Изд-во ТПУ, 2009. – С. 109–113.
22. Дёч Г. Руководство к практическому применению преобразования Лапласа. – М.: Наука, 1971. – 288 с.

Поступила 23.10.2015 г.

UDC 536.24

## COAL LAYER UNDER MICROWAVE HEATING: ANALYTICAL STUDY UNDER MIXED BOUNDARY CONDITIONS I AND II OF THE GENUS

**Vladimir V. Salomatov,**

Institute of Thermal Physics SB RAS, 1, Academician Lavrentiev Avenue,  
Novosibirsk, 630090, Russia. E-mail: vvs@itp.nsc.ru

**Vadim A. Karelin,**

National Research Novosibirsk State University, 2, Pirogov Street, Novosibirsk,  
630090, Russia. E-mail: vad2hen@mail.ru

**Alexander S. Zavorin,**

National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Avenue, Tomsk,  
634050, Russia. E-mail: zavorin@tpu.ru

**Vasily V. Salomatov,**

Institute of Thermal Physics SB RAS, 1, Academician Lavrentiev Avenue,  
Novosibirsk, 630090, Russia. E-mail: vvsalomatov@mail.ru

**Sergey E. Pashchenko,**

National Research Novosibirsk State University, 2, Pirogov Street, Novosibirsk,  
630090, Russia. E-mail: pashenko-ecolog@yandex.ru

**The relevance** of the work is due to the prospect of the use of microwave radiation in the energy technologies of fuel use at the stages of preparation of solid fuels for coal-fired incineration, including drying and heat treatment. A few well-known results of laboratory experiments indicate structural effects, resulting in increased reactivity and reduction of unburnt fuel.

**Objective:** to obtain an analytical expression for the temperature field in the coal array required for parametric analysis of technological conditions of microwave exposure.

**Methods:** construction of analytically rigorous heat transfer problems, the solution of which is usually possible only in conditions of significant simplifications. If adopted by the constancy of the electrical and technological properties of coal physical picture of the process is determined by the incident on the coal layer of a plane electromagnetic wave that generates internal heat source of Buger law. The energy equation in the form of Fourier is solved independently of Maxwell equations. In this formulation the solution of allocated tasks is carried out by the method of integral transformation of Laplace.

**Results.** The derived analytical solutions of temperature fields are received with mixed boundary conditions with fairly arbitrary changes in time and temperature of a surface flux density of fire on the border. For some special cases on this basis can be obtained an extensive series of simplified solutions available for parametric analysis of the rationale of optimal control parameters of the technology demanded by the engineering practice in project development and operation of microwave systems for processing of solid fuels in the energy sector.

**Key words:**

Coal, microwave energy, Maxwell equations, Fourier heat equation, Buger law, mixed boundary conditions, thermal conditions.

The research was supported by the Russian Foundation for Basic Research, grant 13-08-01458.

## REFERENCES

1. Salomatov V.I., Sladkov S.O., Pashchenko S.E., Salomatov V.S. Ugolnye tekhnologii s ispolzovaniem SVCh-izlucheniya [Microwave technologies in coal power engineering]. *Gorenie i Plazmohimiya*, 2014, vol. 12, no. 2, pp. 77–96.
2. Didenko A.N. *SVCh-energetika: teoriya i praktika* [SHF-energetics: theory and practice]. Moscow, Nauka Publ., 2003. 446 p.
3. Didenko A.N., Zverev B.V. *SVCh-energetika* [Microwave energy]. Moscow, Nauka Publ., 2000. 264 p.
4. *SVCh-energetika* [Microwave energy]. Ed. by E. Okressa. Moscow, Mir Publ., 1971. 272 p.
5. Pyushner G. *Nagrev energiy sverkhvysokikh chastot* [Heating microwave energy]. Transl. from English. Moscow, Energiya Publ., 1968. 311 p.
6. Kononov N.P. *Tekhnologiya destruktivnoy burykh ugley metodom nagreva energiy sverkhvysokoy chastoty* [Microwave heating brown coal degradation technology]. Irkutsk, Publishing House of Irkutsk State Technical University, 2000. 97 p.
7. Salomatov V.I., Sladkov S.O., Pashchenko S.E. SVCh-tekhnologii v ugolnoy energetike [Microwave technology in coal energy]. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2012, no. 85 (3), pp. 535–549.
8. Ivanitskiy V.V. O vozmozhnosti primeneniya sverkhvysokochastotnykh metodov nagreva materialov [Possibility of using of microwave heating methods of materials]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Problemy poligrafii i izdatelskogo dela*, 2000, no. 3–4, pp. 42–46.
9. Semenov A.S., Bayburin V.B. *SVCh-energiya i ee primeneniye. Osobennosti, oborudovaniye, tekhnologicheskiye protsessy* [Microwave energy and its application. Features, equipment, technological processes]. Saratov, Publishing House of Saratov University, 1999. 114 p.
10. Seyhun N., Ramaswamy H., Sumnu G., Sahin S., Ahmed J. Comparison and modeling of microwave tempering and infrared assisted microwave tempering of frozen potato puree. *Journal of Food Engineering*, 2009, no. 92 (3), pp. 339–344.
11. Chemkhi S., Zagrouba F., Bellagi A. Modeling and simulation of drying phenomena with rheological behavior. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 2005, no. 22 (2), pp. 153–163.
12. Kolomeyts V.A., Komarov V.V. *Mikrovolnovyye sistemy s ravnomernym obemnym nagrevom* [Microwave systems with a uniform volumetric heating]. Saratov, Publishing House of Saratov State Technical University, 1997. 160 p.
13. Netushil A.V., Zhukhovitskiy B.Ya., Kudin V.N., Parini E.P. *Vysokochastotnyy nagrev dielektrikov i poluprovodnikov* [The high-frequency heating of dielectrics and semiconductors]. Moscow, Leningrad, Gosenergoizdat Publ., 1959. 480 p.
14. Arkhangel'skiy Yu.S., Devyatkin I.I. *Sverkhvysokochastotnyye nagrevatelnye ustanovki dlya intensivatsii tekhnologicheskikh protsessov* [Microwave heating devices for intensification of technological processes]. Saratov, Publishing House of Saratov University, 1983. 140 p.
15. Ruginets R.G., Kilkeev R.Sh. Lokalizatsiya teplovydeleniya v dielektrike pri vozdeystvii SVCh elektromagnitnogo polya [Localization of heat when exposed to a dielectric microwave electromagnetic field]. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 1989, no. 56 (4), pp. 645–650.
16. Ruginets R.G., Brykov S.K., Lokharu E.Kh. Teplovyye rezhimy pri sverkhvysokochastotnom nagreve dielektrikov [Thermal regimes during the microwave heating of dielectrics]. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 1990, no. 59 (5), pp. 853–858.
17. Rikenglaz L.E. K teorii nagreva dielektrikov moshchnymi elektromagnitnymi polyami [On the theory of dielectric heating of powerful electromagnetic fields]. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 1974, no. 27 (6), pp. 1061–1068.
18. Anfingentov V.I. *Matematicheskoye modelirovaniye SVCh-nagreva dielektrikov* [Mathematical modeling of microwave heating of dielectrics]. Kazan, Publishing House of Kazan State University, 2006. 140 p.
19. Anfingentov V.I., Garaev T.K., Morozov G.A. Ob odnoy zadache teorii SVCh nagreva dielektrikov [A problem in the theory of microwave dielectric heating]. *Vestnik KGTU im. A.N. Tupoleva*, 2002, no. 3 (27), pp. 21–22.
20. Khaydurova A.A., Fedchishin V.V., Kononov N.P. Mikrovolnovaya sushka burykh ugley i povysheniye ikh tekhnologicheskikh kharakteristik [Microwave drying of brown coal and increasing its technological characteristics]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Problemy energetiki*, 2010, no. 1–2, pp. 31–35.
21. Khaydurova A.A., Kononov N.P., Fedchishin V.V. Vozdeystvie mikrovolnovoy energii na buryy ugol dlya uluchsheniya ego tekhnologicheskikh kharakteristik [Effects of microwave energy to the brown coal to improve its processing characteristics]. *Teplofizicheskiye osnovy energeticheskikh tekhnologiy* [Thermophysical basics of energy technologies]. Tomsk, TPU Publ., 2009. pp. 109–113.
22. Dech G. *Rukovodstvo k prakticheskomu primeneniyu preobrazovaniya Laplasa* [Guide to the practical application of the Laplace transform]. Moscow, Nauka Publ., 1971. 288 p.

Received: 23 October 2015.