

УДК 621.365.5

Аналитическое исследование нагрева диэлектрического материала в микроволновом поле

И. Л. Бошкова¹, Н. В. Волгушева², Л. З. Бошков³, О. С. Бодюл⁴

Одесская национальная академия пищевых технологий, ул. Канатная, 112, Одесса, 65039, Украина

e-mail: ¹boshkova.irina@gmail.com, ²natvolgusheva@gmail.com, ³leonidboshkov@gmail.com, ⁴bodyulolena@ukr.net

ORCID: ¹<http://orcid.org/0000-0001-5989-9223>; ²<http://orcid.org/0000-0002-9984-6502>;

³<http://orcid.org/0000-0002-2196-1519>; ⁴<https://orcid.org/0000-0001-9925-434X>

Представлены результаты аналитического исследования процесса нагрева диэлектрического материала в микроволновом поле. Применяемые зависимости для расчета температур получены на основе решений математических моделей теплопроводности с учетом внутренних источников теплоты, положительного, обусловленного действием микроволнового поля, и отрицательного, связанного с испарением влаги. На основе анализа кинетики нагрева при различных начальных условиях определены области применимости аналитических зависимостей для расчета локальных и средних температур.

Ключевые слова: Микроволновое поле; Диэлектрический материал; Математическая модель; Нагрев; Сушка; Температура.

Аналітичне дослідження нагріву діелектричного матеріалу в мікрохвильовому полі

І. Л. Бошкова, Н. В. Волгушева, Л. З. Бошков, О. С. Бодюл

Одеська національна академія харчових технологій, вул. Канатна, 112, Одеса, 65039, Україна

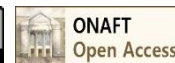
Представлено результати аналітичного дослідження нагріву діелектричного матеріалу в мікрохвильовому полі. Залежності для розрахунку локальних температур отримано при вирішенні задач теплопровідності в тілі в умовах дії двох джерел теплоти (позитивного, обумовленого перетворенням енергії електромагнітного поля в теплоту, і негативного, що визначається випаровуванням) для напівобмеженого масиву при граничних умовах першого і третього роду. Залежності апробовано при розрахунку температури як для умов виключно нагріву в мікрохвильовому полі, так і з урахуванням видалення вологи в процесі мікрохвильової сушки. Проведено аналіз впливу питомої потужності внутрішніх джерел, початкової температури, коефіцієнта тепловіддачі на кінетику нагрівання. Для граничних умов I роду відзначається коректність рішень за умови, що температура матеріалу не перевищує температуру його поверхні більш ніж на 12%. Аналіз результатів розрахунку середньої температури тіла при граничних умовах III роду показав задовільне узгодження розрахункових і експериментальних даних, отриманих при дослідженні сушки вівса в мікрохвильовому полі. При цьому показано, що області застосування аналітичних залежностей обмежені значеннями потужності внутрішніх джерел теплоти і коефіцієнтів тепловіддачі.

Ключові слова: Мікрохвильове поле; Діелектричний матеріал; Математична модель; Нагрівання; Сушка; Температура.

© The Author(s) 2018. This article is an open access publication

This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY)

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



1. Введение

Нагрев материалов в микроволновом электромагнитном поле при рациональном выборе режимных параметров является высокоэффективным в отношении скорости, энергозатрат и качества конечной продукции. Изучение процесса нагрева в микроволновом поле целесообразно сопровождать аналитическими исследованиями, которые позволяют получить данные по распределению температуры в материале, являющиеся базовыми для оценки эффективности преобразования энер-

гии микроволнового поля и оценки влияния входных характеристик на кинетику процесса. Составление математических моделей, адекватно отражающих физическую сущность протекающих явлений под действием микроволнового поля, сопряжено с определенными трудностями, связанными с многофакторностью взаимодействия электромагнитного поля с полярными диэлектриками и необходимостью (при переходе к тепловой схеме модели) определения эффектов, являющихся вторичными. Корректные математические модели, предназначенные для получения информации о распре-

делении температуры в теле, можно получить, основываясь на моделях, предложенных А.В. Лыковым [1], в основе которых лежит уравнение теплопроводности с учетом внутренних источников теплоты, которые могут быть как положительными, так и отрицательными. Объемный характер нагрева материала в микроволновом поле позволяет рассматривать материал как среду, в которой действуют внутренние положительные источники теплоты. Аналитическое решение задач теплопроводности в теле в условиях действия двух источников теплоты (положительный, обусловленный преобразованием энергии электромагнитного поля в тепловую, и отрицательный, определяемый испарением) получено для полуограниченного массива при граничных условиях первого и третьего рода [2 - 6]. Слой материала рассматривается как полуограниченный стержень с тепловой изоляцией боковой поверхности при начальной температуре t_0 . Внутри стержня действует положительный источник тепла, обусловленный действием микроволнового поля, удельная мощность которого q_{v1} , Вт/м³, и отрицательный, обусловленный испарением, с удельной мощностью q_{v2} , Вт/м³. Решение дифференциального уравнения с принятыми условиями однозначности позволяет рассчитать локальную температуру тела как для условий исключительно нагрева в микроволновом поле, так и при удалении влаги в процессе микроволновой сушки. Информацию о температурном поле в теле при микроволновом нагреве, который сопровождается испарением влаги из материала, можно получить как решение задачи теплопроводности в условиях действия двух источников теплоты.

2. Температурное поле в теле с непрерывно действующими источниками теплоты

2.1. Температурное поле при граничных условиях I рода

Математическая формулировка задачи теплопроводности в дифференциальной форме представляется следующим образом [2]:

$$\begin{aligned}
 t(x, \tau) = & (1 - \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{a\tau}})t_0 + \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{a\tau}} \cdot t_{nos} - \\
 & - \frac{q_{v10}}{c\rho a\gamma^2} \left[e^{-\gamma x} - \frac{1}{2} e^{\gamma^2 a\tau - \gamma x} \operatorname{erfc} \left(\frac{x}{2\sqrt{a\tau}} - \gamma\sqrt{a\tau} \right) + \frac{1}{2} e^{\gamma^2 a\tau + \gamma x} \operatorname{erfc} \left(\frac{x}{2\sqrt{a\tau}} + \gamma\sqrt{a\tau} \right) - \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{a\tau}} \right] - \\
 & - \frac{q_{v20}}{c\rho a\beta^2} \left[e^{-\beta x} - \frac{1}{2} e^{\beta^2 a\tau - \beta x} \operatorname{erfc} \left(\frac{x}{2\sqrt{a\tau}} - \beta\sqrt{a\tau} \right) + \frac{1}{2} e^{\beta^2 a\tau + \beta x} \operatorname{erfc} \left(\frac{x}{2\sqrt{a\tau}} + \beta\sqrt{a\tau} \right) - \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{a\tau}} \right]
 \end{aligned} \quad (6)$$

Применяя зависимости (5) и (6), получены расчетные данные по распределению влагосодержания и температуры материала в процессе сушки при микроволновом подводе энергии. Все теплофизические параметры слоя зерна принимали согласно рекомендациям [7]. Значения максимальных удельных мощностей источников q_{v1} и q_{v2} , а также коэффициентов поглощения γ и β , получены экспериментально (табл. 1). Здесь W_0 – скорость сушки в первом периоде. Масса загрузки зерна (овес) – 0,3 кг

Значение q_{v10} , используемое в расчете, было получено из соответствия расчетных и экспериментальных

$$\frac{\partial t(x, \tau)}{\partial \tau} = a \cdot \frac{\partial^2 t(x, \tau)}{\partial x^2} + \frac{q_{v1}}{c \cdot \rho} + \frac{q_{v2}}{c \cdot \rho} \quad (1)$$

$$t(x, 0) = t_0 \quad (2) \quad \frac{\partial t(\infty, \tau)}{\partial x} = 0 \quad (3)$$

$$T(0, \tau) = T_{nos} = const \quad (4)$$

где t – температура материала, x – текущая координата, τ – время, a , λ , c , ρ – соответственно коэффициенты теплопроводности, теплопроводности, удельная теплоемкость и плотность слоя материала; t_{nos} – температура поверхности материала. Принималось, что локальное (на глубине x) значение удельной мощности положительного источника q_{v1} определяется удельной мощностью положительного источника на поверхности q_{v0} и коэффициентом ослабления γ : $q_{v1} = q_{v0} \cdot \gamma$, а изменение удельной мощности отрицательного источника учитывалось введением коэффициента β : $q_{v2} = q_{v20} \cdot \beta$.

Материал рассматривался в виде полуограниченного массива, находящегося при температуре t_0 . В начальный момент времени температура поверхности принимает температуру t_{nos} , которая остается постоянной на протяжении всего процесса. Решение дифференциального уравнения (1) для заданной формы позволило получить зависимости для расчета локальных температур полуограниченного массива [2]. Для периода нагрева материала в микроволновом поле ($q_{v2} = 0$) зависимость имеет следующий вид:

$$\begin{aligned}
 t(x, \tau) = & (1 - \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{a\tau}})t_0 + \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{a\tau}} \cdot t_{nos} - \\
 & - \frac{q_{v10}}{c\rho a\gamma^2} \left[e^{-\alpha x} - \frac{1}{2} e^{\alpha^2 a\tau - \gamma x} \operatorname{erfc} \left(\frac{x}{2\sqrt{a\tau}} - \gamma\sqrt{a\tau} \right) + \right. \\
 & \left. + \frac{1}{2} e^{\alpha^2 a\tau + \gamma x} \operatorname{erfc} \left(\frac{x}{2\sqrt{a\tau}} + \gamma\sqrt{a\tau} \right) - \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{a\tau}} \right]
 \end{aligned} \quad (5)$$

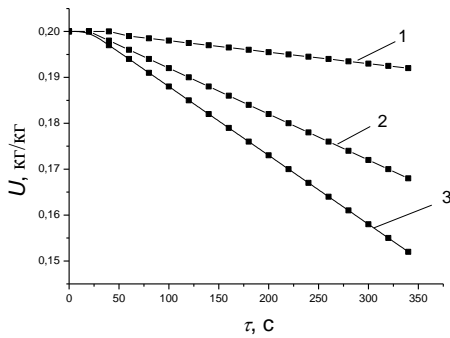
При учете испарения влаги (период постоянной скорости сушки) решение имеет следующий вид:

температур. При расчете q_{v10} по значению выходной мощности магнетрона и с учетом КПД значения отличались, причем эти различия увеличивались с увеличением выходной мощности магнетрона. На рис.1 приведены графики изменения влагосодержания (а), построенного в соответствии с экспериментальными данными по скорости сушки в первом периоде, и температуры (б) в зависимости от мощности микроволнового источника, расчеты выполнены по исходным данным 1 (табл. 1). С течением времени температура возрастает, причем в период прогрева рост происходит более стремительно.

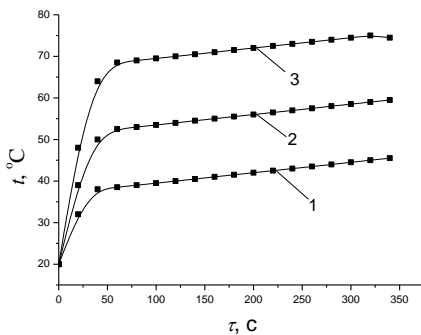
Таблиця 1. Исходные данные для расчета полей влагосодержания и температуры

$P_{\text{вых}}, \text{Вт}$	$W_0 \cdot 10^5, \text{1/с}$	$q_{v10}, \text{Вт/м}^3$	$\gamma, \text{1/м}$	$\beta, \text{1/м}$
160	2,67	760	32,5	-2,7
240	10,7	920	32,5	-2,7
400	15,1	1500	32,5	-2,7

Темп изменения температуры в периоде постоянной скорости сушки практически не зависит от мощности положительного источника (микроволновое поле) в выбранном диапазоне его изменения (рис. 1б), что связано с компенсирующим влиянием увеличения отрицательного источника (поток испарившейся влаги).



а



б

Рисунок 1 – Изменение локального влагосодержания (а) и температуры (б) при $P_{\text{вых}}=\text{var}$ в сечении $x=0,015 \text{ м}$: 1- $P_{\text{вых}} = 160 \text{ Вт}$; 2- $P_{\text{вых}} = 240 \text{ Вт}$; 3- $P_{\text{вых}} = 400 \text{ Вт}$.

Видно, что с ростом выходной мощности магнетрона температура материала увеличивается, а влагосодержание уменьшается. Для заданных условий можно установить максимальное значение подводимого теплового потока, при котором не будет превышать допустимая для данного материала температура. Следует отметить, что получаемые решения корректны при условии, что температура материала не превышает температуру его поверхности более чем на 12 %. На рис. 2 показано влияние температуры поверхности на температуру материала (зерно пшеницы), рассчитываемую по зависимости (6). При начальной температуре материала $t_0 = 50 \text{ }^\circ\text{C}$ и температуре поверхности $t_{\text{нов}} = 70 \text{ }^\circ\text{C}$ после начального участка, соответствующему прогреву, темп изменения температуры заметно снижается, одна-

ко наблюдается ее некоторый рост по времени (кривая 1), что соответствовало наблюдаемому в эксперименте. При температуре поверхности $t_{\text{нов}} = 35 \text{ }^\circ\text{C}$ температура после периода нагрева снижается, что не соответствовало реальному процессу. Таким образом, применимость модели ограничивается условиями начального распределения температур.

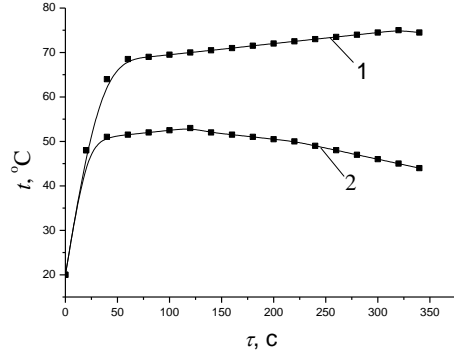


Рисунок 2 – Изменение температуры материала в сечении $x=0,015 \text{ м}$ при различных значениях температуры поверхности $t_{\text{нов}}$. Выходная мощность магнетрона $P_{\text{вых}} = 400 \text{ Вт}$, масса материала (овес) $m=0,3 \text{ кг}$: 1 - $t_{\text{нов}}=70 \text{ }^\circ\text{C}$, 2 - $t_{\text{нов}}=35 \text{ }^\circ\text{C}$.

На рис. 3 приведены результаты расчета температуры материала по координате, отсчитываемой от поверхности массива, выполненные по зависимости (6). Материал – вода и зерно пшеницы, начальная температура равна начальной температуре материала: $t_c = t_0 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$. Линии 1,2 получены для $\tau = 60 \text{ с}$, линии 3,4 – для $\tau = 360 \text{ с}$, линии 5,6 – для $\tau = 600 \text{ с}$. Вследствие низких значений диэлектрических характеристик зерна относительно характеристик воды, скорость нагрева воды выше. На начальном этапе нагрева из-за большого коэффициента поглощения температура изменяется не на всех координатных точках, а на определенном расстоянии от начала координат, за пределами которого температура остается постоянной. При увеличении экспозиции изменение температурного поля охватывает последующие слои, что связано с переносом теплоты теплопроводностью.

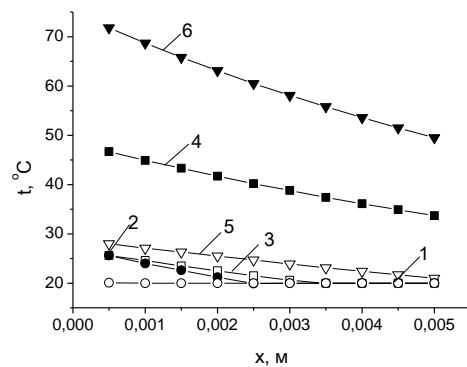


Рисунок 3 – Температура массива в зависимости от координаты при различной экспозиции в МВ поле. Линии 1,3,5 – зерно; 2,4,6 – вода.

2.2. Температурное поле при граничных условиях III рода

Математическая формулировка данной задачи в дифференциальной форме представлена зависимостями (1-3), однако в условии однозначности включалось граничное условие (7):

$$\alpha(t(0, \tau) - t_{\text{возд}}) = -\lambda \frac{\partial t(0, \tau)}{\partial x}, \quad (7)$$

где α – коэффициент теплоотдачи.

Применяя преобразование Лапласа, было получено решение задачи в явном виде [3]. Полученная зависимость позволяет рассчитать температурное поле для трех периодов сушки: нулевым (период прогрева), первым (период постоянной скорости сушки) и вторым (период падающей скорости сушки). Отличия в периодах задаются соответствующими значениями величин, входящих в исходные данные. Так, для нулевого периода принимается, что вода не испаряется, т.е. отрицательный источник теплоты равен нулю. В первом периоде следует задаться скоростью сушки W , которая определяет значение отрицательного источника: $q_{v20} = -\rho W r$ (r – удельная теплота парообразования). Скорость сушки при проведении расчетов определяется данными экспериментов.

Для оценки соответствия полученной модели реальным физическим процессам, проходящим при сушке плотного слоя материала в условиях действия внутренних источников теплоты, проведены расчеты при различных значениях коэффициентов теплоотдачи, удельной мощности магнетронов (положительный источник), коэффициента теплопроводности материала. Исходные данные для расчета соответствовали условиям отдельных экспериментов [8, 9]. Материал для исследований – овес с начальным влагосодержанием $u = 0,2$ и массой $m = 0,1$ кг, выходная мощность магнетрона – от 100 до 600 Вт. Теплофизические свойства слоя рассчитывались как эффективные величины с учетом его порозности $\varepsilon = 0,4$. Расчетные и экспериментальные данные по температуре поверхности материала удовлетворительно коррелируются (рис. 4).

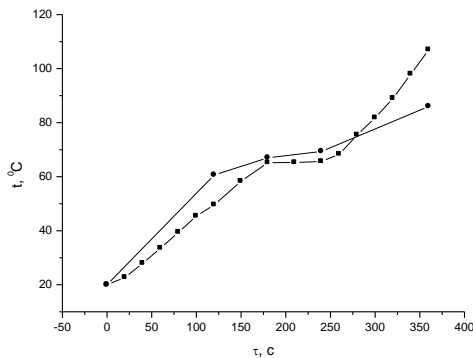


Рисунок 4 – Температура поверхности материала, определенная экспериментально (●) и аналитически (■). Коэффициент теплоотдачи $\alpha = 15$ Вт/(м²К), выходная мощность магнетрона $P_{\text{вых}} = 180$ Вт.

Коэффициент теплопроводности: $\lambda_{\text{эф}} = 3\pi\lambda_g \lg \frac{0.74 - 0.31\beta}{0.74 - \beta}$, Вт/(м·К), коэффициент тем-

пературопроводности $a_{\text{эф}} = \frac{\lambda_{\text{эф}}}{\rho_{\text{сл}} c_{\text{сл}}}$, м/с, плотность слоя

$\rho_{\text{сл}} = \rho_m(1 - \varepsilon)$, кг/м³, теплоемкость слоя $c_{\text{сл}} = c_g \cdot \varepsilon + c_m(1 - \varepsilon)$, Дж/(кг·К), $\beta = 1 - \varepsilon$ – объемная концентрация частиц. Индекс «в» относится к воздушной (газовой) фазе, «m» – твердым частицам.

При расчетах скорость сушки выбиралась в соответствии со значениями, полученными в эксперименте. Эти данные приведены в табл. 2.

Таблица 2. Экспериментальные данные по скорости сушки плотного слоя зерна овса.

Время τ , с	120	180	240	360	420
Скорость сушки W , с ⁻¹	$5,8 \cdot 10^{-5}$	$2,0 \cdot 10^{-4}$	$2,0 \cdot 10^{-4}$	$6,0 \cdot 10^{-4}$	$4,1 \cdot 10^{-4}$

С увеличением вклада испарения, т.е. отрицательного источника теплоты, температура материала понижается, что соответствует реальному процессу. Исследован характер изменения температуры в условиях действия отрицательного источника теплоты. С увеличением его значения температура материала падает (рис. 5), что связано с потерей энергии при испарении.

Видно, что самая высокая температура материала будет при нулевом значении удельной мощности отрицательного источника (т.е. отсутствии испарения). Расчет температуры при различных значениях коэффициента ослабления β показал, что при его увеличении температура материала растет, что связано с уменьшением вклада испарения.

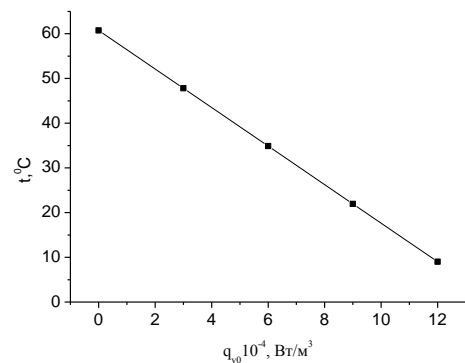


Рисунок 5– Зависимость температуры материала от удельной мощности отрицательного источника теплоты. $x = 0$ м, $\tau = 120$ с, $\beta = 1,025$.

В то же время полученная зависимость обнаружила области, для которых расчеты не соответствуют реальной физической картине. При значениях $q_{v10} \geq 0,3 \cdot 10^5$ Вт/м³ температурное поле в теле не соответствует истинному: начиная с определенной глубины, температура материала начинает снижаться, принимая значения, меньше заданного. Также увеличение коэффициента теплоотдачи $\alpha > 20$ Вт/(м²К) (при массе загрузки 0,1 кг и выходной мощности магнетрона 450 Вт)

расчетная температура поверхности принимала значения, существенно отличающиеся от реальных.

2.3. Средняя температура тела при граничных условиях III рода

Дальнейшие исследования моделей теплопроводности с внутренними источниками теплоты предпринято с целью определения возможности расчетным путем получить данные по средней температуре материала, что представляет значимость для алгоритмов расчета процесса нагрева материалов в микроволновом поле. Подобные модели приведены в [1], на основании которых получены зависимости для температур. Для проверки соответствия решений [1] физической модели нагрева в микроволновом поле проведены вычисления по зависимости (8), полученной для средней температуры шара для условий, соответствующих режимам микроволнового нагрева:

$$\bar{\Theta} = \frac{t(\tau) - t_0}{t_c - t_0} = 1 + \frac{1}{15} Po \left(1 + \frac{5}{Bi} \right) - \sum_{n=1}^{\infty} \left(1 + \frac{Po}{\mu_n^2} \right) B_n \exp(-\mu_n^2 Fo) \quad (8)$$

где $Po = \frac{q_{v1} R^2}{\lambda(t_0 - t_c)}$ – критерий Померанцева, q_{v1} – удельная мощность внутренних источников теплоты, Вт/м³, t_0 – начальная температура материала, t_c – температура окружающей среды, $Bi = \frac{\alpha \cdot R_0}{\lambda}$ – Число Био;

$Fo = \frac{a_m \cdot \tau}{R_0^2}$ – число Фурье; μ_n – характеристические числа.

В табл. 3 приведены данные, полученные при расчете температуры тела сферической формы с определяющим размером $R_0 = 0,3$ м. Температура окружающей среды $t_0 = 20$ °С, начальная температура тела $t_n = 40$ °С, коэффициент теплоотдачи $\alpha = 5$ Вт/(м²К). Теплофизические свойства соответствовали свойствам воды.

Таблица 3. Изменение температуры воды в условиях действия внутренних источников теплоты. $t_0 = 20$ °С, $t_n = 40$ °С, $\alpha = 5$ Вт/(м²К).

$q_{v10},$ Вт/м ³	$\tau=10$ с	$\tau=60$ с	$\tau=180$ с	$\tau=360$ с
100	39,90	39,89	39,89	39,88
10000	17,70	18,67	20,60	23,49
1000000	-184,10	-174,30	-154,78	-125,52

При небольшой удельной мощности внутренних источников теплоты ($q_{v10} = 100$) температура материала принимает реальные значения. При $q_{v20} = 10000$ температура не соответствует действительной, однако отмечается тенденция к ее росту с течением времени, и при еще большем увеличении q_{v10} расчет становится совершенно неверным – температура принимает отрицательные значения и со временем уменьшается.

В табл. 4 приведены результаты расчета для следующих условий: температура среды $t_0 = 400$ °С, нача-

льная температура тела $t_n = 20$ °С, коэффициент теплоотдачи $\alpha = 25$ Вт/(м²К). Видно, что данные соответствуют реальным физическим представлениям: температура материала с течением времени растет, увеличение мощности внутренних источников также приводит к росту температуры.

Таблица 4. Изменение температуры воды при действии внутренних источников теплоты при $t_0 = 400$ °С, $t_n = 20$ °С, $\alpha = 25$ Вт/(м²К).

$q_{v10},$ Вт/м ³	$\tau=10$ с	$\tau=60$ с	$\tau=180$ с	$\tau=360$ с
100	23,59	24,35	26,11	28,72
10000	23,65	24,35	26,14	28,77
1000000	24,17	25,20	28,90	34,36

Следует отметить, что зависимость для безразмерной избыточной средней температуры (9) была получена из решения для локальных температур. Для оценки применимости точных аналитических решений к моделированию развития температуры при действии внутренних источников возникла необходимость проверки соответствия математических моделей и реальных объектов при изменении направления теплового потока. Необходимость проверки вызвана тем, что для всех решений [1], описывающих температурное поле при действии внутренних источников теплоты, отмечалось условие $t_c > t_0$. Расчетные кривые, отражающие изменение температуры материала, приведены на рис. 6.

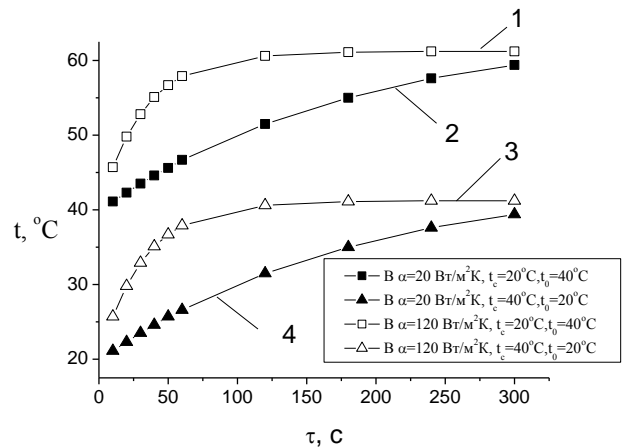


Рисунок 6 – Температура материала (вода) при нагреве в микроволновом поле. $q_{v1} = 1,5 \cdot 10^5$ Вт/м³, $R = 0,0025$ м.

Кривые 1,3 – $\alpha = 120$ Вт/(м²К), кривые 2,4 – $\alpha = 20$ Вт/(м²К).

Кривые 1 и 2 получены для условия $t_c < t_0$: $t_c = 20$ °С, $t_0 = 40$ °С. Расчеты проведены для двух значений коэффициентов теплоотдачи: $\alpha = 20$ Вт/(м²К) и $\alpha = 120$ Вт/(м²К). Увеличение α приводит к увеличе-

нию температуры воды на одинаковых отрезках времени, что не соответствует реальному процессу. Кривые 3 и 4 получены для условия $t_c > t_0$: в этом случае увеличение коэффициента теплоотдачи, соответственно, увеличение теплового потока от окружающей среды к материалу, приводит к увеличению температуры, что правильно отражает физическую картину зависимости температуры от направлений теплового потока. Следует отметить, что при получении расчетных данных для случая теплоотдачи от материала в окружающую среду (кривые 1,2), что характерно для нагрева в СВ поле, безразмерные избыточные температуры путем замены переменной были приведены к форме, соответствующей задаче охлаждения. Полученные результаты позволяют заключить, что нагрев от внутренних источников с одновременным стоком теплоты в окружающую среду не может быть рассчитан по имеющимся зависимостям [1]. Таким образом, для аналитического исследования температурного поля и изменений средней температуры материала при условии $t_c < t_0$ необходима корректировка математической модели.

Выводы

Аналитические зависимости для расчета температур диэлектрического материала, полученные из решения уравнения теплопроводности с учетом двух источников теплоты: положительного, определяемого действием микроволнового поля, и отрицательного, возникающего вследствие выхода потока энергии с испарившейся влагой, удовлетворительно работают в области режимных параметров, соответствующим режимам сушки зерновых: начальное влагосодержание $u = 0,2$ кг/кг, скорость сушки $W = 10^{-5} \dots 10^{-4}$ с⁻¹. Для получения достоверных данных по температурам материала по аналитическим зависимостям, полученным для безразмерной избыточной температуры, требуется выполнение условия $t_c > t_0$ (температура среды выше температуры материала). Расчет локальных и средних температур по разработанным математическим моделям с учетом двух внутренних источников теплоты, положительном и отрицательном, позволяет получать удовлетворительные данные при различном соотношении начальных температур среды и материала, а также при условии $t_c = t_0$.

Литература

1. Прутских Д. А. Гидродинамика и теплообмен в регенераторе с дисперсной насадкой // Автореферат дисс. на соискание уч. степени к. т. н. Специальность: 05.14.04 – Промышленная теплоэнергетика. – Воронеж: 2009. – 22 с
2. Медведев В. Б. Моделирование и расчет тепловых процессов в регенеративных утилизаторах теплоты с циркулирующей гранулированной насадкой : автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.17.08 // В.Б. Медведев; [Ивановский гос. энергетический унив-т]. – Иваново, 2009. – 17с
3. Yulong D., Yurong H., Wei Ngoc Y. Hydrodynamics and heat transfer of gas–solid two-phase mixtures flowing through packed beds // Progress in Natural Science. – 2008.-Vol. 18. – P. 1185-1196.
4. Snider D. M., Dale M. S. Three fundamental granular flow experiments and CPFD predictions // Power Technology. – 2007. – Vol. 176.– P. 36-46.
5. Рева Л. С. Методы гидродинамического и теплового расчета теплообменников с зернистой насадкой: дисс. ... канд. техн. наук. – Волгоград, 1984. – 260 с.
6. Yu J., Zhang M., Fan W., Zhou Y., Zhao G. Study on performance of the ball packed-bed regenerator: experiments and simulation // Applied Thermal Engineering. – 2014. – Vol. 69. P.113–122.
7. Nie X. D., Besant R. W., Evitts R. W. Heat transfer between gas-solid phases within packed particle beds // Particulate science and technology: an international journal. – 2010. –Vol. 29, №2. P.151-162.
8. Бошкова И.Л., Солодка А.В. Исследование эффективности теплообмена в теплообменниках-утилизаторах с гранулированной насадкой // Аспекты регионального развития Матеріали міжнародної наукової конференції. – Молдова, Кишинів: Інститут енергетики АН Молдови, 2016. – С. 373-377.
9. Монаркин Н.Н., Наймов А.Н., Сеницын А.А., Роггулина Т.В. Математическая модель процесса аккумуляции тепловой энергии в стационарном переключающемся регенеративном теплоутилизаторе // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 11. – С. 759-764.
10. Шваб А.В., Марценко М.С. Исследование движения плотного слоя гранулированной среды и процесса смешения в сужающемся канале // Вестник Томского государственного университета. 2010 Математика и механика № 4(12). – С. 123-130.
11. Промышленная теплоэнергетика и теплотехника. Справочник / Под общ. ред. В.А. Григорьева, В.М. Зорина. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 588 с
12. Solodka A. V., Volgusheva N.V., Boshkova I. L., Titlov A. S., Rozhentsev A. V. Investigation of heat exchange in a blown dense layer of granular materials // East-European Journal of Enterprise Technology: Energy-saving technologies and equipment. – 2017. –Vol 5, No. 8 (89).– P. 58-64.
13. Василенко Ю. Н. Выбор теплообменника при интенсификации теплообмена путем увеличения площади поверхности теплопередачи между теплоносителями // Промышленная энергетика. – 2013. – №11. – с. 14-15.
14. Солодка А.В. Методики расчета контактных теплообменников с движущимся продуваемом плотном слое // Збірник наукових праць III Міжнародної науково-технічної конференції «Холод в енергетиці і на транспорті: сучасні проблеми кондиціонування та рефрижерації, 24–25 вересня 2015. –Миколаїв, НУК ім. адмірала Макарова. – 2015 – С. 67-73.

Отримана в редакції 07.02.2018, прийнята до друку 20.03.2018

Analytical study of heating of dielectric material in microwave field

I. L. Boshkova, N. V. Volgusheva, L. Z. Boshkov, O. S. Bodiul

Odessa National Academy of Food Technologies, 112 Kanatnaya St., Odessa, 65039, Ukraine

The results of an analytical study of the heating of a dielectric material in a microwave field are presented. Dependences for the calculation of local temperatures were obtained for solving the problems of thermal conductivity in the body under the conditions of the action of two heat sources (positive, caused by the transformation of the energy of the electromagnetic field into thermal energy, and negative, determined by evaporation) for a semibounded massive under boundary conditions of the first and third kind. The dependencies are approved in the calculation of the temperature for both the conditions of exclusively heating in the microwave field and taking into account the removal of moisture in the microwave drying process. The influence of the specific power of internal sources, initial temperature, and heat transfer coefficient on heating kinetics is analyzed. For boundary conditions of the first kind, the correctness of solutions is noted, provided that the temperature of the material does not exceed the surface temperature by more than 12%. An analysis of the results of calculating the average body temperature under kind III boundary conditions showed a satisfactory agreement between the calculated and experimental data obtained in the study of drying oats in a microwave field. It is shown that the areas of applicability of analytical dependencies are limited by the values of the power of internal heat sources and heat transfer coefficients..

Keywords: Microwave field, Dielectric material, Mathematical model, Heating, Drying, Temperature.

References

1. Lyikov, A. V. 1967. Teoriya teploprovodnosti [Tekst] / A. V. Lyikov. – M., – 559 p. (in Russian).
2. Volgusheva, N. V. 2005. Kinetika sushki plotnogo sloya dispersnogo materiala (na primere grechihi) pri razlichnykh sposobakh podvoda teploty [Tekst]: diss... kand. tehn. nauk : 05.14.05 / Volgusheva N.V. – O., – 225 p. (in Russian).
3. Dementeva, T. Yu. 2011. Analiticheskoe predstavlenie protsessu mikrovolnovoy sushki zerna [Tekst] / T. Yu. Dementeva // Problemi energoefekt. ta yakosti v protsesah sushInnya harch. sirovini. VseukraYinska nauk.-prakt. konf. Zb. nauk. prats. H.: HDUHT. – P. 17-18. (in Russian).
4. Boshkova, O. L. 2007. Osobennosti rezhima sushki makaronnykh izdeliy [Tekst] / L.G. Kalinin, O.L. Boshkova // Nauk. pr. / ONAHT. – O. – Vol. 30, t.1. – P. 133-137. (in Russian).
5. Kalenderyan, V. A. 2008. Matematicheskie modeli teploperenosa v protsesse sushki dispersnykh materialov v plotnom dvizhuschemsya sloe pri razlichnykh sposobakh podvoda teploty [Tekst] / V.A. Kalenderyan, I.L. Boshkova, N.V. Volgusheva // Holodilna tehnika I tehnologiya. O.: ODAH, – No 11(11). – P. 65-68. (in Russian).
6. Boshkova, I. L. 2012. Analiticheskoe issledovanie temperaturnogo polya v tele s nepreryivno deystvuyuschimi istochnikami teploty [Tekst] / I.L. Boshkova, T.Yu. Dementeva // Sovrem. problemyi holod. tehniki i tehnologii. – O.: ODAH, – P. 42-45. (in Russian).
7. Gorbis, Z. R., Kalenderyan V.A. 1975. Teploobmenniki s protochnymi dispersnyimi teplonositelyami [Tekst] / Z. R. Gorbis, V.A. Kalenderyan. – M.: Energiya. – 296 p. (in Russian).
8. Kalenderyan, V.A. 2011. K otsenke effektivnosti sushki zemovykh kultur v nepodvizhnom sloe pri razlichnykh rezhimakh podvoda energii [Tekst] / V.A. Kalenderyan, I.L. Boshkova, N.V. Volgusheva, T.Yu. Dementeva // Nauk. pr. / ONAHT. O. – Vip. 39, t.2. – P. 211-215. (in Russian).
9. Boshkova, O. L. 2007. Osobennosti rezhima sushki makaronnykh izdeliy [Tekst] / L.G. Kalinin, O.L. Boshkova // Nauk. pr. / ONAHT. – O. – Vip. 30, t.1. – S. 133-137. (in Russian).
10. Boshkova, I. L. 2014. Analiticheskie modeli rascheta temperatury v materiale pri deystvii vnutrennykh istochnikov teploty [Tekst] / I.L. Boshkova, E.V. Georgiesh // Aktualni problemi energetiki ta ekologiyi. Zb. nauk. pr. / ONAHT. – O. – Vyip. 45, t. 1. – S. 33-38. (in Russian).

Received 07 February 2018

Approved 20 March 2018

Available in Internet 30 June 2018