

Тогда

$$B6 = \frac{\tau_{\varphi_0}(1+\varepsilon)}{\rho C_p (T_\delta - T_0)}. \quad (24)$$

Запишем сумму членов (19), (20), (21), (22), (23), (24)

$$B1 + B2 + B3 + B4 = B5 + B6,$$

и изменив знак, окончательно получаем выражение для интегрального соотношения уравнения энергии пространственного пограничного слоя:

$$\begin{aligned} & \frac{1}{H_\varphi} \frac{\partial(\delta_{r\varphi}^{**})}{\partial\varphi} + \frac{1}{H_\psi} \frac{\partial(\delta_{r\psi}^{**})}{\partial\psi} + \frac{1}{H_\varphi H_\psi} \frac{\partial H_\psi}{\partial\varphi} \delta_{r\varphi}^{**} + \frac{1}{H_\varphi H_\psi} \frac{\partial H_\varphi}{\partial\psi} \delta_{r\psi}^{**} = \\ & = \frac{\alpha}{\rho C_p U} - \frac{\tau_{\varphi_0}(1+\varepsilon^2)}{\rho C_p (T_\delta - T_0)}, \end{aligned}$$

где критерий Стантона:

$$St = \frac{\alpha}{\rho C_p U}.$$

Выводы

Получено интегральное соотношение уравнения энергии температурного пространственного пограничного слоя, позволяющее вести интегрирование при поперечном градиенте давления по граничным поверхностям турбомшины.

Литература

1. Краев М.М., Кишкин А.А., Карасев В.П. Оценка момента сопротивления на корпусе малорасходного центробежного насоса. // Известия вузов. Авиационная техника. – Казань, №3, 1992.
2. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя / Г. Шлихтинг. – М: Наука, 1969. – 744 с.

УДК 537.8:517.4

АНАЛИТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ РАСЧЕТА ТЕМПЕРАТУРЫ В МАТЕРИАЛЕ ПРИ ДЕЙСТВИИ ВНУТРЕННИХ ИСТОЧНИКОВ ТЕПЛОТЫ

Бошкова И.Л., канд. техн. наук, доцент; Георгиев Е.В., аспирант
Одесская национальная академия пищевых технологий, г. Одесса

Обосновывается актуальность получения аналитического метода расчета температуры в материале при нагреве в микроволновом поле. Анализируются имеющиеся зависимости для расчета температуры. Приводится зависимость, позволяющая удовлетворительно определять среднюю температуру материала. Показано, что правильный учет КПД камеры существенно уменьшает погрешность расчета.

The urgency of obtaining an analytical method for calculating the temperature in the material when heated in a microwave field. Analyzes available depending on the calculation of temperature. Shows the dependence of allowing satisfactorily determine the average temperature of the material. It is shown that proper accounting of the camera significantly reduces the efficiency calculation error.

Ключевые слова: нагрев, микроволновая энергия, полярный диэлектрик, температура, тепловые потери.

Наиболее трудноконтролируемым и в то же время наиболее распространенным процессом в промышленности является нагрев [1]. Электрический объемный нагрев (ЭОН), к примеру, нагрев в микроволновом поле — относительно новый процесс, обладающий многими преимуществами по сравнению с конвекцией, кондукцией и излучением, при которых теплота подводится к поверхности, а внутри материала передается кондукцией. При ЭОН нагревается весь объем материала.

В наши дни микроволновой нагрев используется в пищевой промышленности, в технологиях сушки и медицине [2, 3, 4, 5]. Благодаря эффекту селективного и объемного нагрева, микроволны приносят новые характеристики в технологии, как, например, увеличение скорости процесса, улучшение конечного качества продукта и уменьшение энергопотребления.

В связи с потребностью получения достоверных данных по характеристикам процесса нагрева в микроволновом поле, ряд исследований фокусируются на математическом и компьютерном моделировании нагрева как важного метода, способного предоставить информацию относительно параметров состояния обрабатываемого продукта [6]. Эти данные позволяют проведение теоретических исследований микроволнового нагрева и способствуют пониманию явлений взаимодействия микроволнового поля с материалом, а также являются основой для моделирования и организации технологического процесса [7].

Одним из наиболее важных следствий нелинейной природы такого нагрева, имеющих место в промышленности, является нестабильность, приводящая к неконтролируемому внезапному повышению температуры при небольших изменениях электрической мощности. Когда такая термическая нестабильность локализована, в некоторых областях внутри материала температура становится выше, чем в окружающем материале. Такие области ведут себя как термические фронты, которые могут формироваться и распространяться на значительные расстояния в материале, релаксируя в стационарный профиль температур. Локальная область с высокой температурой получила название “Hot spot”. В общем случае наличие термического фронта может быть полезно при соединении или плавлении керамики, производстве специальных металлов и сплавов. Однако оно очень нежелательно при равномерном нагреве, когда необходимо обеспечить равномерную плотность теплового потока. В связи с этим формирование и динамика термических фронтов представляет значительный практический интерес. Изучению описанного явления посвящена работа [8]. Отмечается, что существует два приближения при моделировании термических фронтов при МВ нагреве. Первое рассматривает термические аспекты и использует только теплое уравнение (уравнение теплопроводности) с нелинейным источником и предполагает постоянную амплитуду электрического поля. Второе более реально, в этом случае принимается во внимание пространственное изменение электрического поля и включает в систему волновое уравнение Максвелла в дополнение к уравнению теплопроводности. Термический фронт в цилиндрическом резонаторе с низкой проводимостью изучался в [8]. Однако аналитическое решение, позволяющее прогнозировать развитие термических фронтов, пока не получено. В рамках данной работы рассматривается вопрос аналитического определения температуры материала при микроволновом нагреве, т.е. в условиях действия внутренних источников теплоты. С этой целью были выбраны и проанализированы существующие аналитические зависимости. При их выборе ограничением являлись условия, определяемые соответствием задачи, решаемой аналитически, и особенностями реального процесса.

Поиск аналитической модели расчета температуры тела при нагревании в условиях действия внутренних источников теплоты в нашем случае был вызван необходимостью расчета температуры в материале растительного происхождения, которое используется в ряде новых технологий, основанных на микроволновом нагреве. Это — зерно в виде плотного слоя, предназначенное для сушки или предпосевной стимуляции, солома как основа субстрата дереворазрушающих грибов, растения, из которых предполагается извлекать биологически активные вещества (БАВ). Рассматривая задачу экстрагирования БАВ, возникла необходимость расчета температуры для оценки условий, при которых достигаются оптимальные режимы. В связи с этим были проанализированы работы, предлагающие зависимости для расчета температуры. В [9] приведены результаты математического моделирования тепло- и массопереноса при микроволновом нагреве на примере винограда. Для расчета температурного поля в виноградине, которая рассматривалась как неограниченный цилиндр, использовалось одномерное нестационарное уравнение теплопроводности. В нем учтены положительный (МВ энергия) и отрицательный (расход тепла на испарение влаги) источник теплоты, а также конвективный перенос энергии воздухом, который рассматривается как ГУ III рода.

$$\rho \cdot C_p \frac{\partial T}{\partial \tau} + \rho \cdot C_p u \frac{\partial T}{\partial x} = k_T \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + Q - \frac{m_{w,loss} h_{fg}}{V}. \quad (1)$$

В этом уравнении член $\rho \cdot C_p \frac{\partial T}{\partial \tau}$ учитывает скорость аккумуляции энергии, $\rho \cdot C_p u \frac{\partial T}{\partial x}$ — конвективный поток энергии, $k_T \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$ — распространение теплоты путем теплопроводности, Q — теплота микроволновой генерации, $\frac{m_{w,loss} h_{fg}}{V}$ — расход энергии на испарение влаги (отрицательный источник).

Принято, что u — скорость воздуха, k_T — коэффициент теплопроводности, $m_{w,loss}$ — массовый расход

испарившейся влаги, h_{fg} — энтальпия испарения. Это уравнение решается заданием граничных условий III рода.

В модели В.А. Лыкова [10] тело рассматривается в виде тонкого полуограниченного стержня с тепловой изоляцией боковой поверхности с температурой T_0 . Внутри стержня действует источник тепла, удельная мощность которого w , Вт/м³, принято граничное условие третьего рода. Математическая запись данной задачи представляется следующим образом:

$$\frac{\partial T(x, \tau)}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 T(x, \tau)}{\partial x^2} + \frac{w}{c \cdot \gamma} \quad (2)$$

$$T(x, 0) = T_0; \quad \frac{\partial T(\infty, \tau)}{\partial x} = 0; \quad \frac{\partial T(0, \tau)}{\partial x} + H[T_c - T(0, \tau)] = 0. \quad (3)$$

Решение этой модели позволяет найти распределение температуры по длине стержня в произвольный момент времени:

$$\begin{aligned} \theta = & \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{a \cdot \tau}} - e^{H \cdot x - H^2 \cdot a \cdot \tau} \cdot \operatorname{erfc} \left(\frac{x}{2\sqrt{a \cdot \tau}} + H \cdot \sqrt{a \cdot \tau} \right) + \frac{w_0 \cdot \tau^{1 + \frac{1}{2} \cdot n}}{c \cdot \gamma \cdot (T_c - T_0) \cdot \left(1 + \frac{1}{2} n\right)} + \\ & + \frac{w_0 \cdot \Gamma \left(1 + \frac{1}{2} \cdot n\right)}{c \cdot \gamma \cdot (T_c - T_0) \cdot a^{\frac{1}{2} n} \cdot (-H)^{n+2}} \times \\ & \times \left[e^{H \cdot x + H^2 \cdot a \cdot \tau} \cdot \operatorname{erfc} \left(\frac{x}{2 \cdot \sqrt{a \cdot \tau}} + H \cdot \sqrt{a \cdot \tau} \right) - \sum_{m=0}^{n+2} (-2H \cdot \sqrt{a \cdot \tau})^m \cdot i^m \cdot \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{a \cdot \tau}} \right] \end{aligned} \quad (4)$$

Также в [10] приведены решения для других классических тел, для полуограниченного массива, при граничных условиях первого и третьего рода. Однако расчет температуры по этим зависимостям, как и по зависимостям (1) и (4), не привел к удовлетворительным результатам, что связано с неполным описанием специфики нагрева в микроволновом поле. Хорошую сходимость результатов (теоретических и экспериментальных) показала зависимость, полученная в результате решения уравнения (5) с граничным условием (6):

$$\rho c \frac{d\bar{t}}{d\tau} = \alpha(\bar{t} - t_{жс}) \frac{F}{V} + J_1; \quad (5)$$

$$\bar{t}|_{\tau=0} = t_{o.c.}, \quad (6)$$

где ρ — плотность материала, кг/м³;

c — его теплоемкость, Дж/кг·К;

α — коэффициент теплоотдачи от поверхности к окружающей среде, Вт/(м²·К);

V — объем, занимаемый материалом, м³;

$t_{жс}$ — температура окружающей среды, °С;

F — площадь поверхности, м²;

J_1 — внутренний источник теплоты, обусловленный действием МВ поля, Вт/м³.

В уравнении (5) $\alpha(\bar{t} - t_{жс}) \frac{F}{V}$ учитывает теплоту, отводимую от поверхности тела путем естественной конвекции. Таким образом, учитывается, что изменение температуры связано с действием внутренних источников теплоты, которые приводят к росту температуры материала, и теплоотдачей с поверхности, которая вызывает падение температуры.

Принято, что внутри тела действует источник теплоты (микроволновое поле), который зависит от времени в экспоненциальной форме:

$$J_1 = J_{10} e^{-\gamma_1 \tau}; \quad J_{10} = P_{ввх} \cdot \eta_k / V,$$

где J_{10} — максимальная удельная мощность источника, обусловленная действием генератора микроволновой энергии, Вт/м³; γ_1 — коэффициент ослабления электромагнитной энергии в материале, 1/с.

Решение этого уравнения с помощью преобразований Лапласа привело к получению следующей зависимости (7):

$$\bar{t} = \frac{J_{10}}{\frac{\alpha F}{V} - \gamma_1 \rho c} e^{-\gamma_1 \tau} + t_{o.c.} + A e^{-\frac{\alpha F}{\rho c V} \tau}, \quad (7)$$

где постоянная $A = -\frac{J_{10}}{\frac{\alpha F}{V} - \gamma_1 \rho c}$ определена с учетом условия (6).

Зависимость (7) позволяет рассчитать среднюю температуру материала с учетом теплоотдачи при нестационарном нагреве в МВ поле. Недостатком является то, что локальные температуры не могут быть определены, в то же время при использовании в качестве таких экстрагентов как вода, спирт, пропиленгликоль вследствие малой глубины проникновения изменение температуры по глубине будет существенно. Исходные данные для расчета соответствовали условиям эксперимента, проводимого на воде, нагреваемой в цилиндрическом сосуде в микроволновой камере. Для определения средней температуры в эксперименте вода тщательно перемешивалась.

При мощности магнетрона $N_{\text{вых}} = 180$ Вт и при загрузке в МВ камеру воды объемом $V = 10^{-4}$ м³ удельная мощность составляет $J_{10} = 12,6 \cdot 10^5$ Вт/м³. Коэффициент ослабления $\gamma_1 = 7 \cdot 10^{-5}$ 1/с. Длительность нагрева — от 30 до 300 с, шаг — 30 с. Результаты расчета приведены в табл. 1. Расчеты проведены для коэффициента теплоотдачи $\alpha = 12$ Вт/м²·К. При расчете удельной мощности источника следует учитывать КПД микроволновой камеры, который зависит от объема загрузки: $J_0 = N_{\text{вых}} \cdot \eta$. При расчете было принято $\eta = 0,7$.

Таблица 1 – Нагрев воды в микроволновом поле: сопоставление расчетных и экспериментальных данных: $\alpha = 12$ Вт/м²·К, $\eta = 0,7$, $V = 10^{-4}$ м³

№ п/п	τ , с	$\bar{t}_{\text{расч}}$, °С	$\bar{t}_{\text{экс}}$, °С
1	30	26,450	31,1
2	60	32,745	33,5
3	90	38,992	37,2
4	120	45,156	40,9
5	150	51,240	47,2
6	180	57,242	48,9
7	210	63,165	52,8
8	240	69,009	55,6
9	270	74,776	57,2
10	300	80,465	58,9

Расхождение расчетных и экспериментальных данных наглядно демонстрируется графиком (рис. 1).

Видно, что температуры существенно различаются. Причины этого могут быть следующие:

1) КПД камеры завышен; 2) коэффициент теплоотдачи отличается от принятого; 3) не учитывается изменение диэлектрических свойств воды при изменении температуры.

Для корректировки значения КПД следовало уточнить значение тепловых потерь, в которые входит лучистая и конвективная составляющие. Расчеты показали, что потери теплоты на конвекцию $Q_{\text{конв}} = 1,934$ Вт, потери на лучистый теплообмен $Q_{\text{луч}} = 2,232$, теплота, затраченная на нагрев материала $Q_{\text{пол}} = 50,32$ Вт. Теплота процесса нагрева $Q_{\text{номр}} = 50,32 + 2,232 + 1,934 = 54,486$ Вт. Тогда КПД камеры $\eta = 54,486/180 = 0,3027$. Результаты расчета с учетом полученного КПД представлены в табл. 2. При этом удельная мощность источников составляла $J_0 = 5,45 \cdot 10^5$ Вт/м³.

Таблица 2 – Нагрев воды в микроволновом поле: сопоставление расчетных и экспериментальных данных. $\alpha = 12$ Вт/м²·К, $\eta = 0,3$, $V = 10^{-4}$ м³

№ п/п	τ , мин	$\bar{t}_{\text{расч}}$, °С	$\bar{t}_{\text{экс}}$, °С
1	30	28,884	31,1
2	60	32,718	33,5
3	90	36,501	37,2
4	120	40,234	40,9
5	150	43,917	47,2
6	180	47,552	48,9
7	210	51,139	52,8
8	240	54,678	55,6
9	270	58,170	57,2
10	300	61,615	58,9

Ход експериментальної і теоретическої кривої температур представлено на рис. 2.

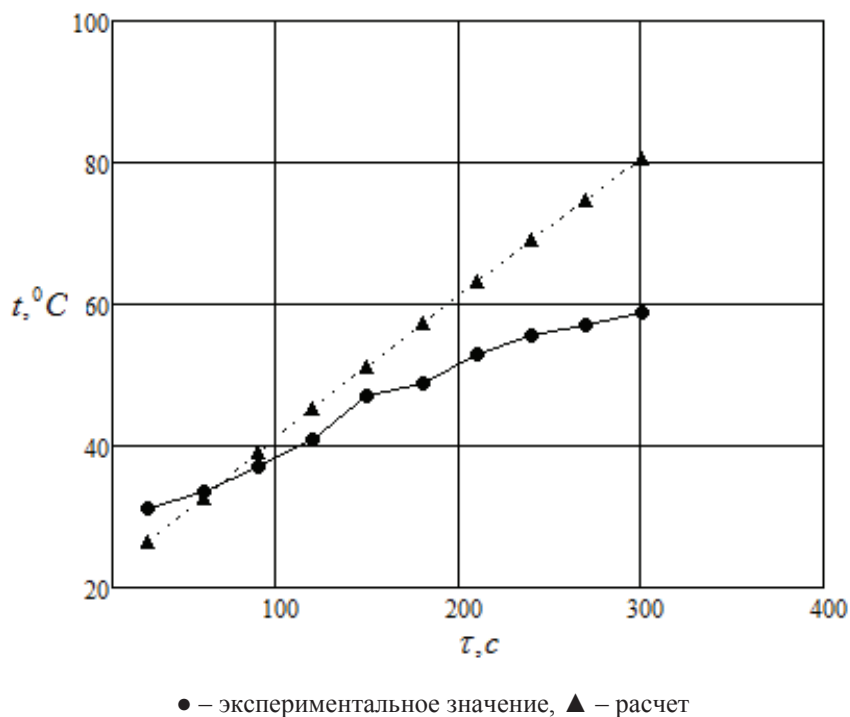


Рис. 1 – Середня температура води при нагріві в мікрохвильовому полі, $\eta = 0,7$

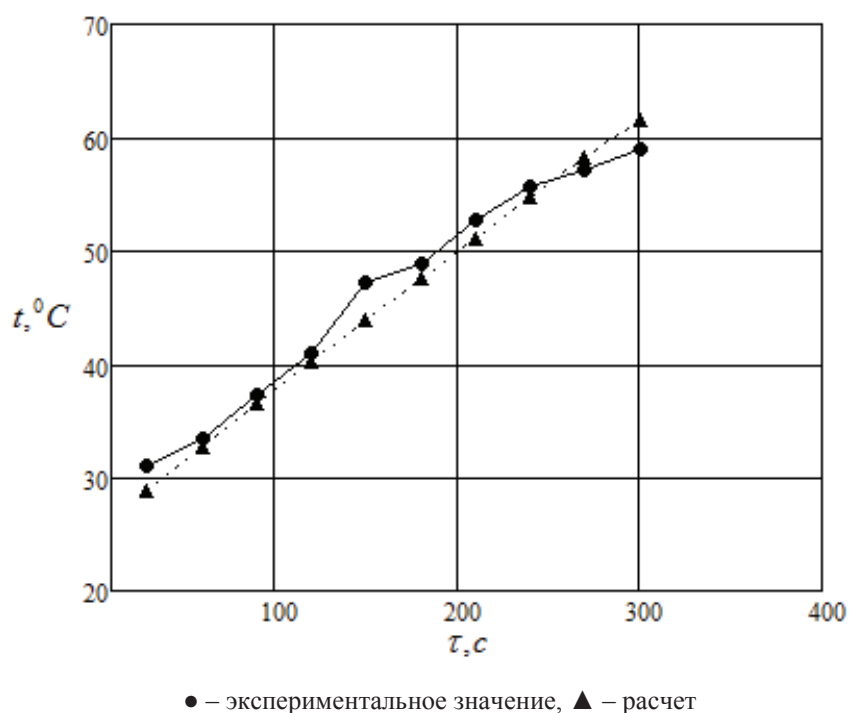


Рис. 1 – Середня температура води при нагріві в мікрохвильовому полі, $\eta = 0,3$

Видно, що правильний урахунок КПД камери суттєво зменшує погрешність.

Выводы

Зависимость для расчета средней температуры материала, нагреваемого в микроволновом поле, полученная с учетом теплоотдачи с окружающей средой, позволяет с достаточной точностью определять температуру, однако при этом следует располагать данными по КПД камеры для правильной оценки удельной мощности внутренних источников теплоты.

Литература

1. Meredith R.J. Engineers Handbook of Industrial and Microwave Heating. The Instruction of electrical engineers. 1998. 382 p.
2. Gunasekaran S (1998) Pulsed microwave-vacuum drying of food materials. *Drying Technol* 17(3):395–412].
3. A. K. Haghi, H. Ghanadzadeh. Experimental study on combined infrared and microwave drying of porous media with particular application in wood industry // *Int. J. of Applied Mechanics and Engineering*. – 2006. – vol.11. – No. 4. – pp. 985-991.
4. K.J. Chua, S.K. Chou. A comparative study between intermittent microwave and infrared drying of bioproducts // *Int.J. of Food Science and Technology* 2005, 40, pp.23–39.
5. V. R. Sagar. P.S. Kumar. Recent advances in drying and dehydration of fruits and vegetables// *J Food Sci Technol* – 2010. – 47(1). – pp.15–26.
6. V. R. Sagar. P.S. Kumar. Recent advances in drying and dehydration of fruits and vegetables// *J Food Sci Technol* – 2010. – 47(1). – pp.15–26.
7. Gábor Bihercz János Beke, Zoltan Kurják Simulation of drying process of corn kernels during microwave and convective treatment//*Chemical Engineering*. – Vol. 2. – Iss. 1. – pp. 75-150.
8. Garcia-Reimbert, C, Minzoni, A, Smyth, N. Effect of radiation losses on hotshot formation and propagation in microwave heating//*IMA j. Appl. Math*, 1996, 57, 165-179.
9. Bingol G., Pan Z., Roberts J. et al. Mathematical modeling of microwave-assisted convective heating and drying of grapes//*Int. J. Agric and Biol Eng*. 2008. Vol. 1, No.2, pp. 46-54.
10. Лыков А.В. Теория теплопроводности/ Алексей Васильевич Лыков. – М., 1967. – 559 с.

УДК 621.311.22.002.52

ИНЖЕНЕРНАЯ МЕТОДИКА РАСЧЕТА ТЕПЛОМАССОБМЕНА В ЭЖЕКЦИОННОМ АППАРАТЕ

Кологривов М.М., канд. техн. наук, доцент, Бузовский В.П., аспирант
Институт холода, криотехнологий и экоэнергетики им. В.С. Мартыновского, г. Одесса

Рассматривается работа прямого контактного эжекционного аппарата, в котором происходит конденсация паров бензина на охлажденных каплях рассола. Выполнен сравнительный анализ двух методик расчета теплообмена в данном аппарате: первая — основана на критериальном уравнении интенсивности теплообмена, предложенное Андреевым [2]; вторая — основана на математической модели Пажи-Галустова [3, 4]. Найден новый коэффициент и показатели степеней в уравнении Андреева путем обобщения данных, полученных по модели Пажи-Галустова.

The work of direct contact ejection apparatus, in which the condensation of gasoline vapor on chilled drops of brine takes place is considered in this article. A comparative analysis of the two methods of calculation of heat transfer in this apparatus was made. The first is based on the dimensionless equation of heat and mass transfer intensity, which was supposed by Andreev [2]. The second is based on the mathematical model, which was supposed by Pazhi and Galustov [3, 4]. We found new coefficient and the exponent in Andreev's equation by collation of data that we got by using Pazhi-Galustov's model.

Ключевые слова: эжекционный аппарат, конденсация паров бензина, критериальное уравнение, математическая модель.

Введение

Рассматривается работа эжекционного аппарата с горизонтальным факелом рабочего потока. Такой аппарат предлагается использовать для конденсации паров углеводородов из паровоздушной смеси (пвс) на каплях хладоносителя — водного солевого раствора [10]. Предлагаемый аппарат обладает рядом преимуществ перед аналогичными контактными аппаратами [9]. Основное из преимуществ — высокая по-