

ТЕПЛО- И ВЛАГОПЕРЕНОС ПРИ СВЧ-КОНВЕКТИВНОЙ СУШКЕ РАСТИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

П. В. Акулич¹, А. В. Акулич², А. В. Темрук³

¹Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси, г. Минск, Беларусь

²Могилевский государственный университет продовольствия, г. Могилев, Беларусь

³НППЦ НАН Беларуси по продовольствию, г. Минск, Беларусь

В электромагнитном поле высокой частоты нагрев материалов, представляющих собой диэлектрики, основан на явлении различных видов поляризации (электронной, ионной и дипольной). Высокочастотная энергия, затрачиваемая на поляризацию (смещение зарядов) диэлектрика превращается в теплоту. Особенностью механизма сушки материалов в поле токов высокой и сверхвысокой частоты является интенсивный и сравнительно равномерный объемный нагрев, создающий градиент температуры, направленный вовнутрь образца. В результате направление переноса влаги под действием градиента температуры ∇T совпадает с направлением влагопереноса.

На практике наиболее часто применяются комбинированные способы энергоподвода с использованием СВЧ-поля (конвективный + СВЧ, вакуумный или сублимационный + СВЧ) [1–5]. В [5] экспериментально исследован СВЧ-конвективный способ сушки некоторых растительных материалов, показано сокращение времени обезвоживания и уменьшение энергозатрат.

В настоящей работе рассматривается процесс сушки частицы сырого картофеля в виде параллелепипеда, находящейся в перемешиваемом посредством мешалки слое, продуваемом газом с постоянной температурой T_{cp} и скоростью v при воздействии СВЧ-излучения напряженностью E [6]. Поскольку длина частиц намного больше размеров поперечного сечения решается двумерная задача (рис. 1). Вследствие перемешивания материала допускается равномерное тепловое и гидродинамическое воздействие на поверхность частицы.

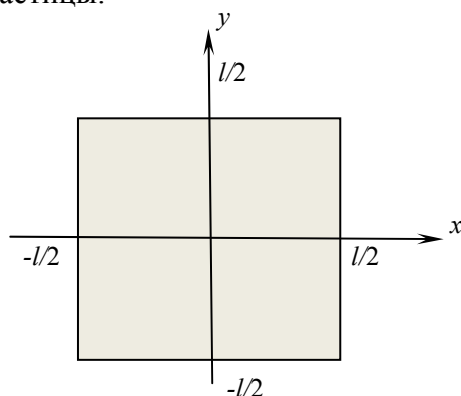


Рис. 1. К постановке задачи

Математическая модель. Уравнения тепломассопереноса для двумерного случая в декартовой системе координат запишутся [7] как

$$(c_c + c_{ж}u)\rho_c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda(u) \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda(u) \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \varepsilon^* r \rho_c \frac{\partial u}{\partial t} + I, \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D(u, T) \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D(u, T) \frac{\partial u}{\partial y} \right). \quad (2)$$

Начальные и граничные условия:

$$t = 0, \quad T(x, y, 0) = T_0, \quad u(x, y, 0) = u_0, \quad (3)$$

$$\lambda(u) \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=\pm l/2} = \lambda(u) \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=\pm l/2} = \alpha (T_{\text{ср}} - T) - (1 - \varepsilon^*) r \beta [p_{\text{п. пов}}(u, T) - p_{\text{ср}}], \quad (4)$$

$$D(u, T) \frac{\partial u}{\partial x} \Big|_{x=\pm l/2} = D(u, T) \frac{\partial u}{\partial y} \Big|_{y=\pm l/2} = \frac{\beta}{\rho_{\text{с}}} [p_{\text{ср}} - p_{\text{п. пов}}(u, T)]. \quad (5)$$

Парциальное давление пара у поверхности частицы определяется по изотерме десорбции $p_{\text{п. пов}} = F(u_{\text{п}}, T_{\text{пов}})$. Из изотермы десорбции следует, что при испарении свободной влаги парциальное давление пара у поверхности материала стремится к давлению насыщения пара при температуре поверхности $p_{\text{п. пов}} = p_{\text{н}}(T_{\text{пов}})$.

Изотерма сорбции (десорбции) определяет зависимость $u_{\text{п}} = f(p_{\text{п}}, T)$. Изотерму десорбции опишем аппроксимационной формулой вида [8]:

$$u_{\text{п}} = u_{0.5}(T) \left(\frac{\varphi}{1 - \varphi} \right)^{\frac{1}{n}}, \quad (6)$$

где $u_{0.5}(T)$ – зависимость равновесного влагосодержания от температуры при $\varphi = p_{\text{п}} / p_{\text{н}} = 0.5$. Показатель n является величиной постоянной для одного и того же материала.

Функцию $u_{0.5}(T)$ опишем зависимостью

$$u_{0.5}(T) = A \exp[-B(T - T_0)]. \quad (7)$$

В результате аппроксимации данных работы [9], для картофеля показатель приближенно равен $n = 2.4$, а постоянные $-A = 0.135$, $B = 0.0087$, $T_0 = 293$.

При удалении связанной влаги уравнение сорбции необходимо для определения удельной теплоты испарения и источников члена. В гигроскопической области состояния влаги давление пара находится из уравнения изотермы десорбции $p_{\text{п}} = F(u_{\text{п}}, T)$, а удельная теплота испарения влаги из уравнения Клапейрона-Клаузиуса

$$r = \frac{RT^2}{M_{\text{п}}} \frac{1}{p_{\text{п}}} \left(\frac{\partial p_{\text{п}}}{\partial T} \right)_{u_{\text{п}}}, \quad (8)$$

которое учитывает необходимые затраты теплоты при сушке на преодоление энергии связи влаги с материалом.

С учетом формулы (6) выражение для удельной теплоты испарения примет вид

$$r = \frac{RT^2}{M_{\text{п}}} \left(\frac{1}{p_{\text{н}}} \frac{\partial p_{\text{н}}}{\partial T} - \frac{nu_{0.5}^{n-1}}{u_{0.5}^n + u_{\text{п}}^n} \frac{\partial u_{0.5}}{\partial T} \right), \quad (9)$$

где $\partial u_{0.5}/\partial T = -Bu_{0.5}(T)$.

Давление насыщенного пара в зависимости от температуры определим по формуле Антуана

$$\lg \left(\frac{p_{\text{н}}}{133.3} \right) = A' - \frac{B'}{T - C'}, \quad (10)$$

где $A' = 8.07414$; $B' = 1733$; $C' = 39.31$.

Откуда

$$p_{\text{н}} = 133.3 \cdot 10^{\frac{A' - B'}{T - C'}}. \quad (11)$$

$$\frac{\partial p_{\text{н}}}{\partial T} = 133.3 \cdot 10^{\frac{A' - B'}{T - C'}} \frac{\ln(10) B'}{(T - C')^2}. \quad (12)$$

Удельная теплота испарения свободной влаги

$$r = R_{\text{п}} T^2 \frac{B' \ln(10)}{(T - C')^2}. \quad (13)$$

Удельная тепловая мощность, выделяемая в единице объема материала, при воздействии электромагнитного поля I ($\text{Вт}/\text{м}^3$) определяется выражением

$$I = 5.56 \cdot 10^{-11} E^2 f \varepsilon' \operatorname{tg} \delta. \quad (14)$$

Коэффициент влагопроводности определим по эмпирической формуле [10]

$$D(u, T) = a_0 \exp(-a_1/u) \exp(-a_2/T), \quad (15)$$

где $a_0 = 1.29 \cdot 10^{-6}$, $a_1 = 0.0725$, $a_2 = 2044$.

Уравнение (15) справедливо в диапазоне параметров $0.01 < u < 5$, $333 < T < 373$.

Коэффициент теплопроводности [$\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$] картофеля в зависимости от влагосодержания определялся по выражению [11]

$$\lambda = 0.13 + 0.52 \frac{u}{u + 1}. \quad (16)$$

Для определения коэффициента теплоотдачи воспользуемся критериальным уравнением для неподвижного слоя, поскольку скорость перемешивания частиц невелика [12]:

$$Nu_3 = 0.395 Re_3^{0.64} Pr^{0.33}, \quad (17)$$

где $Re_3 = v_3 d_3 / \nu = 4v / (a'v) = 4v / [a'_0 (1 - \varepsilon)v]$ – число Рейнольдса; $Nu_3 = \alpha d_3 / \lambda_\Gamma$ – число Нуссельта; $Pr = \nu / a$ – число Прандтля.

Допуская аналогию процессов тепло- и массообмена, коэффициент массоотдачи определялся по формуле подобной (17). Диффузионное число Нуссельта $Nu'_3 = \beta' d_3 / D_\Pi$, $\beta' = \beta R_\Pi T$.

Расчеты проводились при следующих параметрах: $u_0 = 3.07$ кг/кг; $T_0 = 293$ К; $c_c = 1465$ Дж/(кг·К); $c_{жк} = 4190$ Дж/(кг·К); $\rho_c = 230$ кг/м³; $R_\Pi = 461.6$ Дж/(кг·К); $R = 8314.2$ Дж/(кмоль·К); $M_\Pi = 18.02$ кг/кмоль; $\varepsilon^* = 0.75$; $\alpha = 54$ Вт/(м²·К); $\beta = 0.36 \cdot 10^{-6}$ кг/(м²·Па·с); $p_{ср} = 3500$ Па; $T_{ср} = 333$ К; $l = 4$ мм; $v = 1.2$ м/с; $\varepsilon' = 57$; $\text{tg } \delta = 0.26$; $f = 2.45 \cdot 10^9$ Гц; $E = 500$ В/м.

Для экспериментального исследования процесса сушки материалов растительного происхождения при комбинированном СВЧ-конвективном энергоподводе разработана и изготовлена экспериментальная установка. Схема сушильной камеры приведена на рис. 2. Влажный материал подается в камеру 1, в которой пронизывается восходящим потоком нагретого воздуха при непрерывном перемешивании и воздействии электромагнитного СВЧ-излучения.

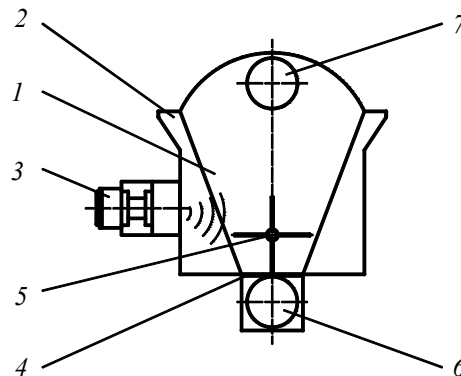


Рис. 2. Схема СВЧ-конвективной камеры: 1 – рабочая камера; 2 – корпус; 3 – магнетрон; 4 – газораспределительная решетка; 5 – мешалка; 6, 7 – патрубки для подачи и отвода сушильного агента

Обсуждение результатов расчетов и их сравнение с экспериментальными данными. В результате численного решения системы дифференциальных уравнений (1) и (2) с начальными и граничными условиями (3)–(5) исследована динамика и кинетика тепло- и влагопереноса в процессе сушки частиц нарезанного картофеля размером в сечении 4×4 мм при комбинированном СВЧ-конвективном воздействии. На рис. 3 представлены поля влагосодержания и температуры образца в конце процесса сушки для момента времени $t = 2700$ с. Из их анализа, а также из зависимостей влагосодержания и температуры от времени на всем протяжении процесса в различных точках образца следует, что влагосодержание в центре образца выше, чем в поверхностных слоях. Наиболее быстро влагосодержание убывает на краях образца, а медленнее всего в его центре. В конце процесса наблюдается некоторая неравномерность влагосодержания по сечению образца, с наибольшим значением влагосодержания в его центре. При прогреве образца, в первом периоде и в начале второго периода температура в его центре ниже, чем в поверхностных слоях, а в конце второго периода температура в центре образца становится выше, чем на поверхности. Это вызвано воздействием СВЧ-поля, которое разогревает внутренние слои продукта. На кинетической кривой влагосодержания выделяется первый период сушки, когда скорость сушки является постоянной величиной ($du/dt = \text{const}$), и второй – период падающей скорости сушки. На температурной кривой отчетливо наблюдается период прогрева, период постоянной температуры адиабатического насыщения (мокрого термометра) и период возрастания температуры.

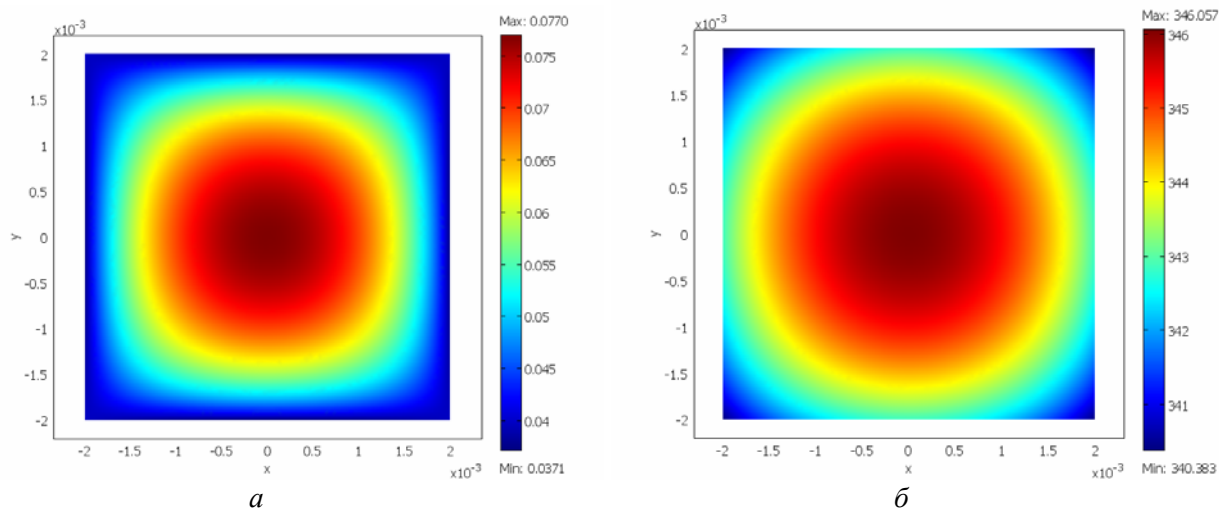


Рис. 3. Поля влагосодержания (*а*) и температуры (*б*) в момент времени $t = 2700$ с

На рис. 4 видно, что расчетная зависимость среднего влагосодержания от времени удовлетворительно согласуется с экспериментальными данными. Увеличение интенсивности СВЧ-поля приводит к повышению скорости влагопереноса и нагрева образца. При этом возрастает скорость сушки как внутренних слоев образца, так и поверхностных. Во втором периоде сушки температура в центре образца возрастает более значительно, чем в поверхностных слоях. Экспериментальные кривые кинетики СВЧ-конвективной сушки некоторых растительных материалов приведены на рис. 5.

Заключение. Предложена двухмерная математическая модель тепло- и влагопереноса при комбинированной СВЧ-конвективной сушке растительных материалов. Установлены зависимости кинетики и динамики процесса от режимных параметров, в частности интенсивности СВЧ-воздействия. Показано возрастание температуры в центре образца во втором периоде сушки, сокращение времени обезвоживания при дополнительном СВЧ-воздействии. Установлено, что комбинированный нагрев продукта с использованием СВЧ-излучения сокращает общую продолжительность процесса обезвоживания плодовоовощного сырья и крупы гороха в 1.5–2 раза (в зависимости от удельной мощности СВЧ-излучения), а плодов шиповника – в 4–5 раз по сравнению с конвективным энергоподводом при равных температурах сушильного агента.

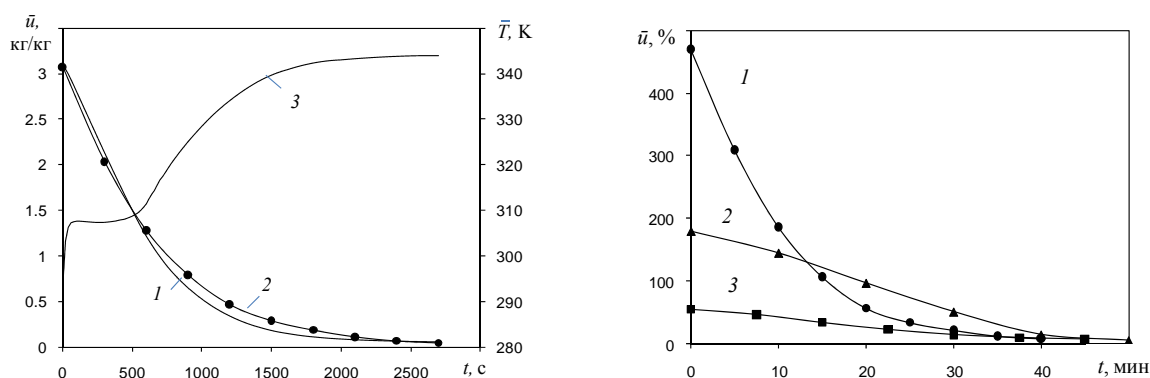


Рис. 4. Кинетические кривые влагосодержания (*1*, *2*) и температуры (*3*) при $E = 500$ В/м: кривая *1* – расчет, *2* – экспериментальные данные

Рис. 5. Экспериментальные кривые СВЧ-конвективной сушки при $t = 60$ °С, удельной мощности СВЧ-излучения 600 Вт/кг влаги: *1* – солонка свеклы размером $4 \times 4 \times 30$ мм; *2* – плоды шиповника; *3* – крупа гороха (разваренного)

Обозначения

a'_0 – удельная поверхность частицы, отношение внешней поверхности частицы к ее объему, $\text{м}^2/\text{м}^3$, $a' = a'_0(1 - \varepsilon)$; c – теплоемкость, $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$; D – коэффициент влагопроводности, $\text{м}^2/\text{с}$; E – напряженность электромагнитного поля, $\text{В}/\text{м}$; f – частота, Гц ; I – источниковый член, $\text{кг}/(\text{м}^3\cdot\text{с})$; l – линейный размер тела, м ; M – молекулярная масса, $\text{кг}/\text{кмоль}$; p – давление, Па ; R – универсальная газовая постоянная, $\text{Дж}/(\text{кмоль}\cdot\text{К})$; r – удельная теплота испарения влаги, $\text{Дж}/\text{кг}$; t – время, с ; T – температура, К ; u – влагосодержание, $\text{кг}/\text{кг}$; v – скорость газа, рассчитанная на полное сечение аппарата, $v_3 = v/\varepsilon$, $\text{м}/\text{с}$; x, y – текущие координаты, м ; α – коэффициент теплоотдачи, $\text{Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$; β, β' – коэффициенты массоотдачи, $\text{кг}/(\text{м}^2\cdot\text{Па}\cdot\text{с})$, $\text{м}/\text{с}$; ε^* – коэффициент фазового превращения; ε' – диэлектрическая проницаемость материала (по отношению к вакууму), $\varepsilon' = \varepsilon/\varepsilon_0$ или $\varepsilon = \varepsilon'\varepsilon_0$; ε – абсолютная проницаемость материала, $\text{Ф}/\text{м}$; ε_0 – абсолютная проницаемость вакуума, $\varepsilon_0 = 8.854 \cdot 10^{-12} \text{ Ф}/\text{м}$; λ – коэффициент теплопроводности, $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$; ν – коэффициент кинематической вязкости, $\text{м}^2/\text{с}$; ρ – плотность, $\text{кг}/\text{м}^3$; φ – относительная влажность газа, $\varphi = p_{\text{п}}/p_{\text{н}}$. *Индексы:* 0 – параметры начального состояния; с – абсолютно сухой материал; ж – жидкость (влага); н – насыщенное состояние; р – равновесное состояние; п – пар; пов – поверхность материала; э – эффективные параметры; ср – среда.

Литература

1. Гинзбург А. С. Основы теории и техники сушки пищевых продуктов. М.: Пищевая промышленность, 1973. – 528 с.
2. Kudra T., Mujumdar A. S. Advanced Drying Technologies. New York. Marcel Dekker, Inc., 2002. – 459 p.
3. Акулич П. В. Расчеты сушильных и теплообменных установок. Минск: Беларус. навука, 2010. – 443 с.
4. Акулич П. В., Драгун В. Л., Куц П. С. Технологии и техника сушки и термообработки материалов. Минск: Беларус. наука, 2006. – 190 с.
5. Рудобашта С. П., Харьков А. В., О'Дима Ж. СВЧ-интенсификация процесса сушки растительных материалов // Тепломассообмен ММФ-96. Минск: АНК ИТМО АНБ, 1996. Т. 8. С. 62–68.
6. Акулич А. В., Темрюк А. В., Акулич П. В. Установка для комбинированной сушки пищевого сырья с использованием СВЧ-излучения // Тезисы докладов VIII межд. науч.-техн. конф. «Техника и технология пищевых производств». Могилев, 2011. С. 41–42.
7. Лыков А. В. Тепломассообмен: Справочник. М.: Энергия, 1978. – 560 с.
8. Горобцова Н. Е. Метод описания и расчета изотерм сорбции-десорбции, общий для различных материалов // Тепломассообмен-V1. Материалы VI Всесоюзной конференции по тепломассообмену. Т. VII. Минск, 1980. С. 60–63.
9. Гришин М. А., Атаназевич В. И., Семенов Ю. Г. Установки для сушки пищевых продуктов. М.: Агропромиздат, 1989. – 215 с.
10. Sablani S., Rahman S., Al-Habsi N. Moisture diffusivity in foods – an over view. Drying Technology in Agriculture and Food Sciences / Ed. Arun S. Mujumdar. Science Publishers, Inc. Enfield (NH), USA, 2000. Pp.35–59.
11. Гинзбург А. С., Громов М. А., Красовская Г. И. Теплофизические характеристики пищевых продуктов. Справочник. Изд. второе, доп. и перераб. М.: Пищевая промышленность, 1980. – 288 с.
12. Аэров М. Э., Тодес О. М., Наринский Д. А. Аппараты со стационарным зернистым слоем. Л.: Химия, 1979. – 176 с.