

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ
INFORMATION TECHNOLOGY AND TELECOMMUNICATIONS

УДК 519.711.3

DOI: 10.21822/2073-6185-2023-50-2-153-159

Оригинальная статья /Original Paper

**Постановка задачи моделирования процесса вакуумной СВЧ – сушки
для определения температурных полей во вспененных суспензиях**

В.В.Ткач¹, Г.О. Магомедов², А.А Шевцов¹

¹Военный учебно – научный центр Военно – воздушных сил

«Военно–воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина»,

¹394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54а, Россия,

²Воронежский государственный университет инженерных технологий,

²394036, г. Воронеж, проспект Революции, д. 19, Россия

Резюме. Цель. Целью исследования является формулировка математической модели процесса вакуумной СВЧ – сушки для определения температурных полей во вспененных суспензиях. При очевидных преимуществах СВЧ – сушки в вакууме не исключается возможность перегрева высушенного материала, что отражается на его качестве. Поэтому ограничение на температуру материала при сушке должно учитываться при моделировании. **Метод.** Исследование основано на методах имитационного компьютерного моделирования. **Результат.** Предложена постановка задачи моделирования для определения температурных полей во вспененных суспензиях в широком диапазоне режимных параметров. **Вывод.** Повышение точности результатов моделирования за счет совершенствования математического описания составляет основу современных исследований в области технологии и оборудования вакуумной СВЧ – сушки.

Ключевые слова: моделирование, вакуум, энергоподвод, СВЧ – нагрев, вспененное состояние

Для цитирования: В.В. Ткач, Г.О. Магомедов, А.А. Шевцов. Постановка задачи моделирования процесса вакуумной СВЧ – сушки для определения температурных полей во вспененных суспензиях. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2023; 50(2):153-159. DOI:10.21822/2073-6185-2023-50-2-153-159

**Statement of the problem modeling the process vacuum microwave drying for
determining temperature fields in foamed suspensions**

V.V. Tkach¹, G.O. Magomedov², A.A. Shevtsov¹

¹Military Training and Research Center Air force «The Air Force Academy named after professor N.E. Zhukovsky and Y. A. Gagarin»,

¹54a, Stary Bolsheviks St., Voronezh 394064, Russia,

²Voronezh State University of Engineering Technology,

²19, Revolution Ave., Voronezh 394036, Russia

Abstract. Objective. The aim of the study is to formulate a mathematical model of the process of vacuum microwave drying to determine the temperature fields in foamed suspensions. With the obvious advantages of microwave drying in a vacuum, the possibility of overheating of the dried material is not excluded, which affects its quality. Therefore, the limitation on the temperature of the material during drying must be taken into account in the simulation. **Method.** The study is based on the methods of simulation computer modeling. **Result.** The formulation of the modeling problem for determining the temperature fields in foamed suspensions in a wide range of regime parameters is proposed. **Conclusion.** Increasing the accuracy of simulation results by improving the mathematical description is the basis of modern research in the field of technology and equipment for vacuum microwave drying.

Keywords: designing, vacuum, power supply, microwave heating, foamed condition

For citation: V.V. Tkach, G.O. Magomedov, A.A. Shevtsov. Statement of the problem modeling the process vacuum microwave drying for determining temperature fields in foamed suspensions. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Science. 2023; 50(2):153-159. DOI:10.21822/2073-6185-2023-50-2-153-159

Введение. В работе рассматривается процесс вакуумной сушки, сущность которого состоит в обезвоживании материалов с развитой пористой структурой (в виде пены) в поле токов сверхвысокой частоты (СВЧ). Этот весьма перспективный способ сушки и установка для осуществления получили развитие в работах [1 – 16]. В материале с развитой структурой механизм внутреннего массообмена заключается в том, что здесь поверхностью парообразования является не только и не столько наружная поверхность тела, сколько вся его развитая структура. В высокопористом материале внутренняя поверхность парообразования может превосходить по площади внешнюю поверхность в десятки и сотни раз. Поэтому даже при влажном состоянии такого материала изменение локального влагосодержания внутри него происходит в значительной мере за счет фазовых превращений. Таким образом, описание массообмена для обычных материалов и, в частности, описание процесса внутреннего парообразования требуют существенного уточнения при рассмотрении материалов с развитой пористой структурой.

Постановка задачи. Сформулировать математическую модель процесса вакуумной СВЧ – сушки для определения температурных полей во вспененных суспензиях.

Методы исследования. Для решения данной задачи считали, что продукт имеет пенную структуру, а процесс вакуумной сушки происходит в условиях вакуума при давлении 700 Па (рис. 1).

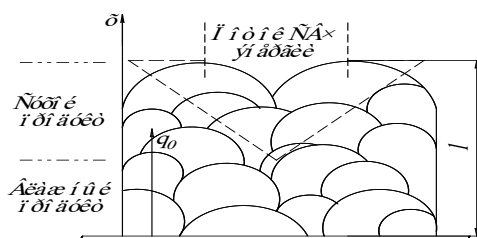


Рис.1. Физическая модель процесса вакуумной СВЧ – сушки

Fig. 1. Physical model of the vacuum microwave drying process

Предполагалось, что в первоначальный момент весь слой пены имеет замкнутые пузырьки, а после создания вакуума и подвода к ним энергии от СВЧ – генератора происходила вакуумная сушка влаги с поверхности пузырьков. В простейшем варианте процесс описывается уравнением теплообмена, в котором поглощением тепла пенным продуктом линейно зависит от разности температур ($T-T_0$):

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \alpha \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - \beta \cdot (T - T_0) \quad (1)$$

где T – температура, при которой происходит процесс сушки; °С, T_0 – температура в рабочем объеме сушилки, при которой осуществляется процесс вакуумной сушки пенного продукта, °С; x – координата по толщине продукта, $x \in [0; l]$, м; l – толщина слоя продукта, м; α – коэффициент температуропроводности, м²/с; β – коэффициент теплопоглощения при вакуумной сушке, кДж/кг с граничными условиями

$$T \Big|_{x=l} = T_w, \quad (2)$$

где T_w – температура поверхности продукта на границе с вакуумом,

$$\frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = -q_0, \quad (3)$$

где q_0 – удельное количество теплоты, которое трансформируется в объеме пенообразного продукта из энергии сверхвысокочастотного электромагнитного поля и передается от поверхности, на котором он расположен к поверхности испарения.

$$q_0 = 0,556 \cdot 10^{-10} \varepsilon'' \nu E^2,$$

где $\varepsilon'' = \varepsilon' \tan \delta$ – коэффициент диэлектрических потерь; ε' – диэлектрическая проницаемость; δ – угол диэлектрических потерь; ν – частота электромагнитных колебаний, Гц; E – напряженность электрического поля, В/м; и начальными условиями:

$$T|_{\tau=0} = T_1, \quad (4)$$

где T_1 – постоянная температура по всему объёму продукта в начале процесса сушки.

Обсуждение результатов. С высокой степенью достоверности можно считать, что напряженность СВЧ поля E постоянна по объёму высушиваемого продукта, т.е. электромагнитные волны не затухают при прохождении от верхней поверхности слоя к нижней.

Вместе с тем, при моделировании СВЧ – нагрева учитывалась селективность поглощения электромагнитной энергии различными составляющими влагосодержащего материала – жидкой и твердой фазой влаги и паром. Так, коэффициент диэлектрических потерь воды весьма велик и значительно превышает соответствующие значения для сухой составляющей большинства материалов, а коэффициент диэлектрических потерь пара практически равен нулю. Поскольку в процессе сушки концентрация жидкой фазы влаги изменяется, то значение общего коэффициента диэлектрических потерь материала ε'' может на целые порядки различаться по высоте слоя. Поэтому значение ε'' должно определяться с учетом соответствующих условий (температуры и состава материала) в каждой конкретной точке объекта сушки. Тогда при моделировании учитывается не только объемный, но и направленный характер СВЧ нагрева.

Экспериментальное определение сложной зависимости коэффициента ε'' от состава, структуры, температуры материала и прочих факторов довольно трудоемко и не может гарантировать получения достаточно точных результатов. В связи с этим предложен способ упрощенной аналитической оценки зависимости ε'' от состава и структуры материала.

В соответствии с этим общий коэффициент ε'' представлен в виде суммы коэффициентов диэлектрических потерь сухого вещества, воды и пара, умноженных на некоторые весовые коэффициенты:

$$\varepsilon'' = \sigma_c \varepsilon_c'' + \sigma_b \varepsilon_b'' + \sigma_n \varepsilon_n'',$$

где ε_c'' , ε_b'' , ε_n'' – коэффициенты диэлектрических потерь соответственно для сухого вещества, воды и пара; σ_c , σ_b , σ_n – весовые коэффициенты. Все весовые коэффициенты неотрицательны, их сумма равна единице.

Так как удельная мощность СВЧ нагрева q_0 рассчитывалась по объёму материала, то каждый из весовых коэффициентов определялся как отношение объема соответствующего компонента к общему объёму материала. Это позволило учесть развитую структуру продукта, которая отражается на его способности поглощать энергию поля СВЧ.

Рассмотрен некоторый элементарный объем V внутри материала, в котором через V_c , V_b , и V_n соответственно объем сухого вещества, жидкости и заполненных паром пузырьков в объеме V , тогда:

$$\sigma_c = \frac{V_c}{V} = \frac{m_c}{\rho_c V} = \frac{\gamma}{\rho_c}; \quad \sigma_b = \frac{V_b}{V} = \frac{m_b}{\rho_b V} = \frac{m_b u_2}{\rho_b V} = \frac{\gamma}{\rho_b} (u - u_3); \quad \sigma_n = \frac{V_n}{V} = \Pi,$$

где m_c , m_b , – масса сухого вещества и жидкости в объеме V , кг; ρ_c , ρ_b – плотность сухого вещества, и жидкости (воды), кг/м³.

С учетом того, что пар практически не поглощает электромагнитную энергию ($\varepsilon_n'' = 0$), окончательно получено: $\varepsilon'' = \frac{\gamma}{\rho_c} \varepsilon_c'' + \frac{\gamma}{\rho_b} (u - u_3) \varepsilon_b''$.

Данная формула позволяет учесть зависимость коэффициента диэлектрических потерь материала от объемной концентрации сухого вещества и локального массосодержания жидкости. Полученная начально-краевая задача (1) – (4) была упрощена путём разложения неизвестной температуры $T(x, \tau)$ в ряд Фурье по собственным функциям.

Для нахождения собственных функций задача (1) – (4) сводилась к однородным граничным условиям. Это достигалось следующей заменой:

$$T = a + b \cdot x + v, \quad (5)$$

где $v(x, t)$ – новая неизвестная функция, a, b – неизвестные константы, которые необходимо подобрать так, чтобы граничные условия для v были однородными.

Пусть $v|_{x=l} = 0$, тогда из граничного условия (2) и формулы (5) получено:

$$T|_{x=l} = a + b \cdot l = T_w. \quad (6)$$

После дифференцирования уравнения (6) приведено к виду:

$$\left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} = b + \left. \frac{\partial v}{\partial x} \right|_{x=0} = -q_0.$$

Из условия $\left. \frac{\partial v}{\partial x} \right|_{x=0} = 0$, следует, что $b = -q_0$. Подставляя полученное значение b в уравнение (6) определена константа a : $a = T_w - q_0 \cdot l$.

Найденные выражения для a и b подставляли в уравнение (5):

$$T = (T_w + q_0 \cdot l) - q_0 \cdot x + v. \quad (7)$$

Дифференцируя (7) по t и дважды по x , получены уравнения:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial v}{\partial \tau}, \quad (8)$$

$$\frac{\partial T}{\partial x} = -q_0 + \frac{\partial v}{\partial x}, \quad (9)$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 v}{\partial x^2}. \quad (10)$$

После подстановки (7) – (10) в уравнение (1) получено:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \alpha \cdot \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} - \beta \cdot (T_w + q_0 \cdot l - q_0 \cdot x + v - T_0). \quad (11)$$

Граничные условия для v получены из (7):

$$T|_{x=l} = T_w + q_0 \cdot l - q_0 \cdot l + v|_{x=l} = T_w, \quad v|_{x=l} = 0, \quad (12)$$

а из условия (9) следует:

$$\left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} = -q_0 + \left. \frac{\partial v}{\partial x} \right|_{x=0} = -q_0, \text{ или } \left. \frac{\partial v}{\partial x} \right|_{x=0} = 0. \quad (13)$$

Граничные условия (12) и (13) для v имеют однородный вид, который необходим для применения теории собственных функций и последующих спектральных разложений.

После подстановки (7) в (4) определены начальные условия для v :

$$T|_{\tau=0} = T_w + q_0 \cdot l - q_0 \cdot x + v|_{\tau=0} = T_1, \\ v|_{\tau=0} = T_1 - T_w - q_0 \cdot l + q_0 \cdot x. \quad (14)$$

Функция v представлена в виде двух слагаемых

$$v = F_1 + F_2 \quad (15)$$

Если считать, что F_1 удовлетворяет однородному дифференциальному уравнению

$$\frac{\partial F_1}{\partial \tau} = \alpha \cdot \frac{\partial^2 F_1}{\partial x^2} - \beta \cdot F_1, \quad (16)$$

то, после подстановки v из (15) в (11), с учетом (16) для F_2 получено следующее уравнение

$$\frac{\partial F_2}{\partial \tau} = \alpha \cdot \frac{\partial^2 F_2}{\partial x^2} - \beta \cdot [(T_w - T_0) - q_0 \cdot (x - l) + F_2]. \quad (17)$$

Для F_1 были приняты однородные граничные условия

$$F_1|_{x=l} = 0, \quad \frac{\partial F_1}{\partial x}|_{x=0} = 0, \quad (18)$$

тогда из (12) и (13) для F_2 получены также однородные граничные условия

$$F_2|_{x=l} = 0, \quad \frac{\partial F_2}{\partial x}|_{x=0} = 0. \quad (19)$$

Если начальные условия для F_1 принимались в виде

$$F_1|_{\tau=0} = T_1 - T_w - q_0(1-x), \quad (20)$$

то после подстановки (15) и (20) в (14), получены начальные условия для F_2 :

$$F_2|_{\tau=0} = 0 \quad (21)$$

Таким образом, задача (1) – (4) о нахождении температуры T в пенообразном продукте в процессе вакуумной сушки сведена к двум более простым задачам о нахождении F_1 из системы {(16), (18), (20)}:

$$\frac{\partial F_1}{\partial \tau} = \alpha \cdot \frac{\partial^2 F_1}{\partial x^2} - \beta \cdot F_1, \quad (22)$$

$$F_1|_{x=l} = 0, \quad \frac{\partial F_1}{\partial x}|_{x=0} = 0, \quad (23)$$

$$F_1|_{\tau=0} = T_1 - T_w - q_0(l-x), \quad (24)$$

и нахождении F_2 из системы {(17), (19), (21)}:

$$\frac{\partial F_2}{\partial \tau} = \alpha \cdot \frac{\partial^2 F_2}{\partial x^2} - \beta \cdot [(T_w - T_0) - q \cdot (x-l)] - \beta \cdot F_2, \quad (25)$$

$$F_2|_{x=l} = 0, \quad \frac{\partial F_2}{\partial x}|_{x=0} = 0, \quad (26)$$

$$F_2|_{\tau=0} = 0. \quad (27)$$

Вывод. Сформулирована задача моделирования, для решения которой необходимо располагать теплофизическими и электрофизическими свойствами объекта моделирования; диапазоном изменения входных, выходных и промежуточных переменных; ограничениями, накладываемыми на условия проведения процесса вакуумной сушки в поле токов сверхвысокой частоты (СВЧ). Для математического описания необходимы экспериментальные данные, дополняющие полноту информации для решения поставленной задачи [17, 18]. Высушиваемые материалы с развитой поверхности парообразования при комбинированном методе энергоподвода, высокая интенсивность тепломассообмена и различные аспекты технического характера обуславливают особую сложность соответствующего процесса сушки в плане их моделирования, что требует специфического подхода в решении предлагаемой модели.

Библиографический список:

1. Журавлев А. В. Разработка конструкции вихревой сушильной камеры с СВЧ – энергоподводом [Текст] / А. В. Журавлев, Д. А. Казарцев, И. С. Юрова, Э. В. Рязских, Е. С. Бунин / Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности АПК – продукты здорового питания. – 2014. – № 4 (4). – С. 68 – 74.
2. Хвостов А. А. Математическое обеспечение процесса вакуумной СВЧ – сушки как предначальная стадия создания САПР сушилок нового поколения [Текст] / А.А. Хвостов, В.И. Рязских, А.А. Шевцов, В.В. Ткач. / Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. Том 49, №3, 2022. – С. 104 – 115.
3. Пат. № 2544406 РФ, МПК F26B 17/10, 3/347. Аппарат для сушки дисперсных материалов в закрученном потоке теплоносителя с СВЧ – энергоподводом [Текст] / Д. А. Казарцев, С. Т. Антипов, А. В. Журавлев, Д. А. Нестеров, А. В. Бородкина. – заявитель и патентообладатель: Воронеж. гос. ун – т. инж. технол. – № 2013150692, заявл. 14.11.2013, опубл. 20.03.2015. Бюл. № 8.
4. Пат. № 2425311 РФ, МПК F26B 17/10, 3/347. Вихревая сушильная камера для сушки дисперсного материала в закрученном потоке теплоносителя с СВЧ – энергоподводом [Текст] С. Т. Антипов, Д. А. Казарцев, А. В. Журавлев, Е. С. Бунин, А. Ю. Баранов, И. С. Юрова. – заявитель и патентообладатель: Воронеж. гос. технол. акад. № 2010115946, заявл. 21.04.2010, опубл. 27.07.2011. Бюл. № 21.
5. Пат. № 2444689 РФ, МПК F26B 25/22. Способ автоматического управления процессом сушки пищевых продуктов в ленточной сушилке с использованием конвективного и СВЧ – энергоподвода /

- С. Т. Антипов, Д. А. Казарцев, А. В. Журавлев, Т. В. Калинина, И. С. Юрова, А. Б. Емельянов. – заявитель и патентообладатель: Воронеж. гос. технол. акад. – № 2010135851, заявл. 26.08.2010, опублик. 10.03.2012. Бюл. № 7.
6. Пат. на пол. модель № 159476 РФ, МПК G01R 21/02. Устройство для измерения удельной мощности электромагнитного поля СВЧ в объеме заполненным сыпучим либо жидким материалом [Текст] / Д. А. Будников, А. Н. Васильев, А. А. Васильев, А. А. Цымбал. – Заявитель и патентообладатель: – Федеральное государственное бюджетное научное Учреждение Всероссийский научно – исследовательский институт электрификации сельского хозяйства. – № 2015143412/28, заявл. 13.10.2015; опублик. 10.02.2016. Бюл. № 4.
7. Пат. № 2755850 РФ, МПК F26B 9/06. Установка для вакуумной сушки [Текст] / С. В. Макеев, Е. С. Бунин, А. А. Шевцов, В. В. Ткач. – заявитель и патентообладатель: Воронеж. гос. ун – т. инж. технол. – № 2020141027, заявл. 14.12.2020, опублик. 22.09.2021. Бюл. № 27.
8. Пат. № 2784271 РФ, МПК 26B 15/04. Вакуумная СВЧ – установка карусельного типа [Текст] / В. В. Ткач, А. А. Шевцов, И. Н. Тарашенко, А. М. Журавлев. – заявитель и патентообладатель: Федеральное государственное казенное военное образовательное учреждение высшего образования «Военный учебно-научный центр Военно – воздушных сил «Военно – воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж) Министерства обороны Российской Федерации. – № 2021361133, заявл., 07.12.2021, опублик. 23.12.2022. Бюл. № 33.
9. Пат. на пол. модель № 72536 РФ, МПК F26B 5/06 (2006.01). Вакуумная СВЧ – установка для лабораторных исследований процесса обезвоживания пищевых сред [Текст] / Г.О. Магомедов, С.В. Шахов, М.Г. Магомедов, В.В. Ткач, В.В. Новиков. – заявитель и патентообладатель: Г.О. Магомедов, С.В. Шахов, М.Г. Магомедов, В.В. Ткач, В.В. Новиков. – № 2007145105/22; заявл. 04.12.2007; опублик. 20.04.2008. Бюл. № 11.
10. Orsat V., Vijaya G.S. Raghavan. Microwave technology for food processing. The Microwave Processing of Foods, July 2005, pp.105 – 118.
11. Tong T.H., Lund, D.B. Microwave Heating of Baked Dough Products with Simultaneous Heat and Moisture Transfer. Journal of Food Engineering 19 (1993), 319 – 339 – 286.
12. Bandita B. B, Sandeep J. Role of Food Microwave Drying in Hybrid Drying Technology. A Comprehensive Review of the Versatile Dehydration Processes, 2022, pp. 1 – 11.
13. Bhargav K., Navnitkumar K. D. Drying of Food Materials by Microwave Energy. International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences 9 (5): May 2020, pp.1950 – 1973.
14. Pere C., Rodier E. Microwave vacuum drying of porous media: Experimental study and qualitative considerations of internal transfers. Chemical Engineering and Processing 41 (5), May 2002, pp. 427 – 436.
15. Лыков А. В. Теория сушки / А. В. Лыков. – М.: Энергия, 1968. – 472 с.
16. Рудобашта С. П. Математическое моделирование процесса сушки дисперсных материалов [Текст] / С. П. Рудобашта / Известия Академии наук. Энергетика. – 2000. – № 4. – С. 98 – 109.
17. Казарцев Д. А. Разработка общих видов математических моделей сушки пищевых продуктов с СВЧ – энергоподводом на основе законов химической кинетики гетерогенных процессов [Текст] / Д. А. Казарцев / Вестник ВГУИТ. – Воронеж, 2021. – Т. 83. № 3. С. 17 – 22.
18. Антипов С. Т. Решение математической модели процесса сушки плодов черной смородины в вакуум – аппарате с СВЧ – энергоподводом [Текст] / С. Т. Антипов, Д. А. Казарцев, А. В. Журавлев, С. А. Виниченко / Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. – 2014. – № 2 (60). – С. 7 – 12.

References:

1. Zhuravlev A.V. Development of the design of a vortex drying chamber with a microwave energy supply [Text] / A.V. Zhuravlev, D. A. Kazartsev, I. S. Yurova, E. V. Ryazhskikh, E. S. Bunin. *Technologies of the food and processing industry of the agro-industrial complex - healthy food products*. 2014;4(4):68-74. (In Russ)
2. Khvostov A. A. Mathematical support of the vacuum microwave drying process as a pre-initial stage of creating CAD dryers of a new generation [Text] / A.A. Khvostov, V.I. Ryazhskikh, A.A. Shevtsov, V.V. Tkach. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2022; 49(3):104–115. (In Russ)
3. Pat. No. 2544406 of the Russian Federation, IPC F26B 17/10, 3/347. Apparatus for drying dispersed materials in a swirling coolant flow with a microwave power supply [Text] D. A. Kazartsev, S. T. Antipov, A.V. Zhuravlev, D. A. Nesterov, A.V. Borodkina. – applicant and patent holder: Voronezh State University - T. eng. technol. – No. 2013150692, declared on 14.11.2013, published on 20.03.2015; 8. (In Russ)
4. Pat. No. 2425311 of the Russian Federation, IPC F26B 17/10, 3/347. Vortex drying chamber for drying dispersed material in a swirling coolant flow with a microwave power supply [Text] / S. T. Antipov, D. A. Kazartsev, A.V. Zhuravlev, E. S. Bunin, A. Yu. Baranov, I.S. Yurova. applicant and patent holder: Voronezh. gos. technol. acad. – No. 2010115946, application No. 21.04.2010, publ. 27.07.2011; 21. (In Russ)
5. Pat. No. 2444689 of the Russian Federation, IPC F26B 25/22. A method for automatic control of the drying process of food products in a belt dryer using convective and microwave power supply / S. T. Antipov,

- D. A. Kazartsev, A.V. Zhuravlev, T. V. Kalinina, I. S. Yurova, A. B. Emelyanov. applicant and patent holder: Voronezh. gos. technol. acad. No. 2010135851, application. 26.08.2010, publ. 10.03.2012; 7. (In Russ)
6. Pat. on the floor. Model No. 159476 RF, IPC G01R 21/02. A device for measuring the specific power of the microwave electromagnetic field in a volume filled with bulk or liquid material [Text] / D. A. Budnikov, A. N. Vasiliev, A. A. Vasiliev, A. A. Tsymbal. – Applicant and patent holder. – Federal State Budgetary Scientific Institution All – Russian Research Institute of Electrification of Agriculture. – No. 2015143412/28, declared on 13.10.2015; published on 10.02.2016; 4. (In Russ)
 7. Pat. No. 2755850 of the Russian Federation, IPC F26B 9/06. Installation for vacuum drying [Text] / S. V. Makeev, E. S. Bunin, A. A. Shevtsov, V. V. Tkach. – applicant and patent holder: Voronezh. gos. un – t. eng. technol. No. 2020141027, declared on 12/14/2020, published on 09/22/2021; 27. (In Russ)
 8. Pat. No. 2784271 of the Russian Federation, IPC 26B 15/04. Vacuum microwave installation of the carousel type [Text] / V. V. Tkach, A. A. Shevtsov, I. N. Tarashchenko, A.M. Zhuravlev. – applicant and patent holder: Federal State State-owned Military Educational Institution of Higher Education “Military Training and Research Center of the Air Force “Air Force Academy named after Professor N.E. Zhukovsky and Yu.A. Garin” (Voronezh) of the Ministry of Defense of the Russian Federation. – No. 2021361133, application, 07.12.2021, publ. 23.12.2022; 33. (In Russ)
 9. Pat. on the floor. Model No. 72536 RF, IPC F26B 5/06 (2006.01). Vacuum microwave installation for laboratory studies of the process of dehydration of food media [Text] /G.O. Magomedov, S.V. Shakhov, M.G. Magomedov, V.V. Tkach, V.V. Novikov. – applicant and patent holder: G.O. Magomedov, S.V. Shakhov, M.G. Magomedov, V.V. Tkach, V.V. Novikov. – No. 2007145105/22; application 04.12.2007; publ. 20.04.2008; 11.
 10. Orsat V., Vijaya G.S. Raghavan. Microwave technology for food processing. The Microwave Processing of Foods, July 2005; 105 – 118.
 11. Tong T.H., Lund, D.B. Microwave Heating of Baked Dough Products with Simultaneous Heat and Moisture Transfer. *Journal of Food Engineering* 19,1993; 319 – 339 – 286.
 12. Bandita B. B, Sandeep J. Role of Food Microwave Drying in Hybrid Drying Technology. *A Comprehensive Review of the Versatile Dehydration Processes*, 2022; 1 – 11.
 13. Bhargav K., Navnitkumar K. D. Drying of Food Materials by Microwave Energy. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences* 9 (5): May 2020; 1950 – 1973.
 14. Pere C., Rodier E. Microwave vacuum drying of porous media: Experimental study and qualitative considerations of internal transfers. *Chemical Engineering and Processing* 41 (5), May 2002; 427 – 436.
 15. Lykov A.V. Theory of drying. M.: Energiya 1968; 471. (In Russ)
 16. Rudobashta S. P. Mathematical modeling of the drying process of dispersed materials [Text] / S. P. Rudobashta. *Proceedings of the Academy of Sciences. Energy*. 2000; 4: 98 – 109. (In Russ)
 17. Kazartsev D. A. Development of common type mathematical model sushki pisev pengtov with SVH-extravnergodom on the basis of legal chemical kinetics gethrogenn urgentsov [text] *VGWIT newspaper*:- Voronezh, 2021; 83(3): 17 – 22. (In Russ)
 18. Antipov S. T. The solution of a mathematical model of the drying process of black currant fruits in a vacuum apparatus with a microwave power supply [Text] / S. T. Antipov, D. A. kazartsev, A.V. Zhuravlev, S. A. Vinichenko. *Bulletin of the Voronezh State University of Engineering Technologies*. 2014; 2 (60): 7-12. (In Russ)

Сведения об авторах:

Ткач Владимир Владимирович, кандидат технических наук, доцент кафедры общепрофессиональных дисциплин, tkachbalian@yandex.ru

Магомедов Газибег Омарович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Технологии хлебопекарного, кондитерского, макаронного и зерноперерабатывающего производств», gazibec.magomedov@yandex.ru

Шевцов Александр Анатольевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры общепрофессиональных дисциплин, shevalol@rambler.ru

Information about authors:

Vladimir V. Tkach, Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Department of general professional disciplines; tkachbalian@yandex.ru

Gazibeg O. Magomedov, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head. Department of Technologies of bakery, confectionery, pasta and grain processing industries

Alexander A. Shevtsov, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Prof, Department of general professional disciplines shevalol@rambler.ru

Конфликт интересов / Conflict of interest.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов/The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию/ Received 15.04.2023.

Одобрена после рецензирования / Reviced 12.05.2023.

Принята в печать /Accepted for publication 12.05.2023.