

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ЛЕНТОЧНОЙ СУШИЛКИ С КОМБИНИРОВАННЫМ СВЧ-КОНВЕКТИВНЫМ ЭНЕРГОПОДВОДОМ

С.П. Рудобашта, Э.М. Карташов, Г.А. Зуева

Станислав Павлович Рудобашта (ORCID 0000-0002-3129-8562)

Кафедра электроснабжения и теплоэнергетики им. акад. И.А. Будзко, Российский государственный аграрный университет – МСХА им. К.А. Тимирязева, ул. Тимирязевская, 49, Москва, Российская Федерация, 127434

E-mail: srudobashta@rgau-msha.ru

Эдуард Михайлович Карташов

Кафедра высшей и прикладной математики, Институт тонких химических технологий им. М.В. Ломоносова, МИРЭА - Российский технологический университет, пр. Вернадского, 78, Москва, Российская Федерация, 119454

E-mail: kartashov@mail.ru

Галина Альбертовна Зуева (ORCID 0000-0003-0696-4460)*

Кафедра высшей и прикладной математики, Ивановский государственный химико-технологический университет, Шереметевский пр., 7, Иваново, Российская Федерация, 153000

E-mail: galina@isuct.ru*

Представлена методика расчета ленточной сушилки для дисперсного материала с плотным продуваемым слоем и комбинированным СВЧ-конвективным подводом энергии, которая учитывает как внешнее, так и внутреннее диффузионные сопротивления материала. Отмечается, что СВЧ энергия проникает на достаточно большую глубину в толщу материала. Это интенсифицирует процесс и обеспечивает равномерную сушку материала по всей его толщине в плотном слое. Температура высушиваемой частицы рассчитывается на основе полученных авторами ранее аналитических решений задачи теплообмена для тел в форме пластины, цилиндра и шара в условиях непрерывного комбинированного СВЧ-конвективного подвода энергии с учетом стока теплоты на испарение влаги. Кинетика сушки рассчитывается зональным методом на основе аналитического решения задачи массопроводности, полученного для условий постоянства параметров процесса в концентрационных зонах. При этом предполагается, что внутренний перенос влаги под действием перепада температуры (термовлагопроводность) и ее фильтрационный перенос отсутствуют, что допустимо при температурах материала менее примерно 100 °С. Коэффициент массоотдачи определяется по приведенному в литературе уравнению подобия, полученному с учетом подвода СВЧ-энергии. Коэффициент теплоотдачи находят путем пересчета коэффициента массоотдачи в коэффициент теплоотдачи по известному их соотношению. В кинетическом расчете сушилки учитывается изменение всех параметров процесса в ходе процесса. Дан пример расчета сушилки для слайсов моркови, в котором использованы полученные авторами ранее данные для моркови по фазовому концентрационному равновесию при сушке, зависимостям коэффициента массопроводности от влагосодержания материала и температуры, усадке диска моркови. Установлено, что в рассмотренном примере задача теплообмена является внешней, а задача массообмена – внутренней. При этом внутридиффузионное сопротивление оказывает основное сопротивление массопередаче. Это отличает рассмотренный расчет от приведенного в литературе, который основан на учете только внешнего диффузионного сопротивления.

Ключевые слова: ленточная сушилка, расчет, кинетика, сверхвысокочастотный нагрев, теплообмен, энергоподвод

BELT DRYER CALCULATION METHOD WITH COMBINED MICROWAVE-CONVECTION ENERGY SUPPLY

S.P. Rudobashta, E.M. Kartashov, G.A. Zueva

Stanislav P. Rudobashta (ORCID 0000-0002-3129-8562)

Department of Power Supply and Heat Engineering named after Acad. I.A. Budzko, Russian State Agrarian University - Moscow Agricultural Academy named after K.A. Timiryazev, Timiryazevskaya st., 49, Moscow, 127434, Russia

E-mail: srudobashta@rgau-msha.ru

Eduard M. Kartashov

Department of Higher and Applied Mathematics, Lomonosov Institute of Fine Chemical Technologies, MIREA - Russian Technological University, Vernadsky ave., 78, Moscow, 119454, Russia

E-mail: kartashov@mail.ru

Galina A. Zueva (ORCID 0000-0003-0696-4460)*

Department of Higher and Applied Mathematics, Ivanovo State University of Chemistry and Technology, Shernetievskiy ave., 7, Ivanovo, 153000, Russia

E-mail: galina@isuct.ru*

A calculation method for a belt dryer for dispersed material with a blown-through bed and combined microwave-convective energy supply is presented. This calculation takes into account both the external and internal diffusion resistances of the material. An example of calculating a dryer for carrot slices is given. The drying kinetics is calculated using a zonal method based on an analytical solution to the mass conductivity problem, obtained for conditions of constant process parameters in concentration zones. The mass transfer coefficient is determined using a similarity equation given in the literature, obtained taking into account the microwave energy supply. The material temperature required to find the mass conductivity (moisture diffusion) coefficient is calculated using an analytical solution to the heat and mass transfer problem with continuous microwave-convective energy supply, previously obtained by the authors. The kinetic calculation takes into account changes in all process parameters during drying. It was established that in the considered example, the heat transfer problem is external, and the mass transfer problem is internal. Internal diffusion resistance is the primary impediment to mass transfer. This distinguishes the considered calculation from that given in the literature, which is based on taking into account only the external diffusion resistance.

Keywords: belt dryer, calculation, kinetics, microwave heating, heat exchange, power supply

Для цитирования:

Рудобашта С.П., Карташов Э.М., Зуева Г.А. Методика расчета ленточной сушилки с комбинированным СВЧ-конвективным энергоподводом. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2026. Т. 69. Вып. 8. С. 135–144. DOI: 10.6060/ivkkt.20266908.7096.

For citation:

Rudobashta S.P., Kartashov E.M., Zueva G.A. Belt dryer calculation method with combined microwave-convection energy supply. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2026. V. 69. N 8. P. 135–144. DOI: 10.6060/ivkkt.20266908.7096.

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы большое внимание уделяется сушке дисперсных материалов с комбинированным СВЧ-конвективным подводом теплоты [1]. Сверхвысокочастотная (СВЧ) электромагнитная энергия проникает на достаточно большую глубину

в толщу материала (до 200 мм), что интенсифицирует процесс и обеспечивает равномерную сушку материала по всей его толщине в плотном слое. Отсутствие локальных перегревов материала позволяет высушивать этим способом также термолabile материалы без их перегрева [2]. Наибольший интерес представляет комбинированная СВЧ-

конвективная сушка, при которой одна (большая) часть теплоты к высушиваемому материалу подводится конвективно, а другая с помощью электромагнитного поля. Конвективный подвод энергии является более дешевым по сравнению со сверхвысокочастотным и поэтому экономически более выгоден, а сверхвысокочастотный выравнивает сушку по высоте плотного слоя и тем самым позволяет не перегревать материал у поверхности плотного высушиваемого слоя, т. к. при чисто конвективной сушке температура поверхностного слоя материала всегда выше, чем в глубине слоя. Кроме того, сверхвысокочастотный подвод энергии менее инерционен, чем конвективный, что при комбинированном СВЧ-конвективном энергоподводе дает возможность более легко управлять процессом. Эти факторы делают сушку материала с комбинированным СВЧ-конвективным подводом энергии достаточно привлекательной.

Анализ и расчет кинетики химико-технологических процессов является важнейшей частью химической технологии [3]. Для проектирования сушилки необходим ее кинетический расчет. В [4] представлена методика кинетического расчета сушилки периодического действия с псевдоожиженным слоем. Для сушки дисперсного материала часто используются ленточные сушилки непрерывного действия с плотным продуваемым слоем [5]. Для них имеются методы расчета кинетики сушки [5, 6]. Сушка дисперсного материала с СВЧ-конвективным подводом энергии имеет свои особенности, которые требуют их учета. В [7] представлена методика расчета ленточной сушилки с СВЧ-конвективным энергоподводом для сельскохозяйственных продуктов, который предполагает отсутствие внутридиффузионного сопротивления материала. В общем случае оно, однако, присутствует, о чем свидетельствуют результаты расчетов [8]. Для анализа этого процесса успешно применяется математическое моделирование [2, 8, 10, 11]. Технологические условия сушки материалов в пищевой промышленности рассмотрены в монографии [9].

В работах [12-20] рассмотрены технологические аспекты сушки различных материалов в аппаратах с электромагнитным подводом энергии.

Целью работы являлась разработка методики расчета процесса сушки дисперсного материала в ленточной сушилке непрерывного действия с СВЧ-конвективным подводом энергии, учитывающей внутридиффузионное сопротивление материала и ее иллюстрация на примере сушки морковных слайсов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Методика расчет рассматриваемой сушилки базируется на использовании: 1) аналитического решения задачи тепломассообмена при непрерывном СВЧ-конвективном энергоподводе для описания внутреннего тепло- и массопереноса, полученного авторами ранее; 2) известного уравнения подобия для расчета коэффициентов массоотдачи; 3) зонального метода кинетического расчета аппарата, позволяющего учесть изменение теплофизических характеристик в ходе процесса. Представленная методика расчета проиллюстрирована на примере сушки слайсов моркови сорта «Нантская». Слайсы имеют правильную геометрическую форму (пластина), для моркови имеются данные по коэффициенту массопроводности (диффузии влаги), по другим теплофизическим характеристикам и по равновесию, необходимые для кинетического расчета сушилки по рассматриваемой модели.

1. Методика расчета ленточной сушилки с продуваемым слоем и СВЧ-конвективным подводом энергии

Схема сушилки показана на рисунке. Воздух входит в слой материала снизу через перфорированную ленту, пронизывает слой и выходит через верх сушилки. СВЧ-излучатели расположены в верхней части сушилки над слоем материала. Данная сушилка обеспечивает постоянные по длине ленты температурно-влажностные условия сушки и постоянную плотность потока лучистой энергии, поступающей на материал. Ниже излагается ее расчет теоретическим методом [11], который предполагает использование только данных по теплофизическим характеристикам материала без предварительного (перед расчетом) исследования процесса сушки в лабораторных условиях. Это выгодно отличает теоретический метод от различных эмпирических и полуэмпирических методов. В лабораторных условиях, как правило, трудно воспроизвести условия сушки материала в промышленных условиях, что порождает известную проблему масштабного перехода [21].

Изложим методику расчет сушилки производительностью G_n (кг/ч) по влажному материалу. Примем, что известны начальная влажность материала W_n (%), конечная влажность W_k (%), начальная температура материала $t_{м.н}$ (°C), температура воздуха на входе в сушилку после его подогрева в калорифере $t_{в.н}$ (°C), толщина слайса δ (мм).

Расчет выполняется в следующей последовательности:

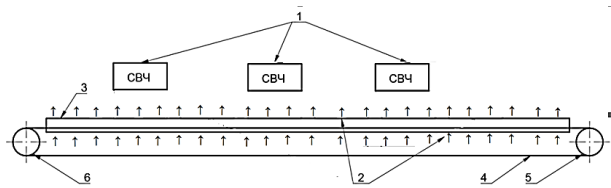


Рисунок. Схема ленточной сушилки: 1 – СВЧ модули; 2 – подача и удаление сушильного агента (воздуха); 3 – зона сушки; 4 – перфорированная транспортерная лента; 5 – приводной барабан; 6 – натяжной барабан

Figure. Diagram of a belt dryer: 1 – microwave modules; 2 – supply and removal of drying agent (air); 3 – drying zone; 4 – perforated conveyor belt; 5 – drive drum; 6 – tension drum

1. По уравнениям материального и теплового баланса [22] последовательно определяют:

- количество испаряемой влаги в сушилке за один час $M_{вл}$ (кг/ч):

$$M_{вл} = G_n \frac{w_n - w_k}{1 - w_k}, \quad (1)$$

где w_n, w_k – доли;

- расход высушенного материала через сушилку G_k (кг/ч):

$$G_k = G_n - M_{вл}; \quad (2)$$

- удельные затраты теплоты на нагрев материала q_m (кДж/кг), приняв в первом приближении температуру материала в конце сушки равной $t_{м.к}$ (°C);

- дополнительный удельный теплоподвод в сушилке $q_d = N_{эм}/M_{вл}$ (кДж/кг), приняв мощность электромагнитного источника равной $N_{эм}$ (кВт);

- удельные теплотопотери через корпус сушилки в окружающую среду q_n (кДж/кг), приняв их равными a % от затрат теплоты на нагрев материала;

- задаваясь температурой воздуха на выходе из сушилки $t_{в.к}$ (°C), вычисляют угловой коэффициент сушки Δ (кДж/(кг влаги)):

$$\Delta = q_d + c_w t_{м.н} - q_m - q_n; \quad (3)$$

- из уравнения линии сушки в H, d – диаграмме [22] определяют энтальпию воздуха, выходящего из сушилки, H_k (кДж/кг) и его влагосодержание d_k (кг/(кг сух. в-ва)) – по уравнениям (4) и (5):

$$H_k = H_n + \Delta(d_k - d_n), \quad (4)$$

$$d_k = d_n + \frac{H_k - H_n}{\Delta} = \frac{H_k - H_n + \Delta d_n}{\Delta}; \quad (5)$$

- из совместного рассмотрения уравнений (4) и (5) находят выражение для расчета влагосодержания воздуха на выходе из сушилки:

$$d_k = \frac{H_n - \Delta d_n - c_{p..к} t_{в.к}}{r_0 + c_{p..к} t_{в.к} - \Delta}; \quad (6)$$

- находят относительную влажность воздуха ϕ_k , выходящего из сушилки при его влагосодержании d_k и температуре $t_{в.к}$: из уравнения (7) [22]

$$d_k = 0,622 \frac{\phi_k p_{нас}}{p - \phi_k p_{нас}}, \quad (7)$$

следовательно, имеем

$$\phi_k = \frac{p \cdot d_k - 0,622}{(d_k + 0,622) p_{нас}}, \quad (8)$$

где $p_{нас}$ – давление насыщенного пара при температуре воздуха $t_{в.к}$;

- определяют расход воздуха через сушилку L (кг/ч):

$$L = \frac{M_{вл}}{d_k - d_k}, \quad (9)$$

2. Задаются шириной ленты B (м), высотой слоя h (м) и находят скорость движения ленты v (м):

$$v = \frac{G_n}{3600 B h \rho_{нас}} \quad (10)$$

где $\rho_{нас}$ – насыпная плотность материала, которая, в частности, для пищевых продуктов и материалов может быть найдена по данным [23];

- принимают предварительно согласно рекомендациям [7] плотность потока СВЧ энергии, поступающей на слой материала, равной $N_{уд}$ (кВт/(м² поверхности слоя)) и находят поверхность облучаемого слоя $F_{сл}$ (м²):

$$F_{сл} = N_{эл}/N_{уд}; \quad (11)$$

- находят объем слоя на ленте $V_{сл}$ (м³):

$$V_{сл} = F_{сл} \cdot h; \quad (12)$$

- находят длину слоя на ленте $l_{сл}$ (м):

$$l_{сл} = F_{сл}/B. \quad (13)$$

3. Рассчитывают кинетику сушки – зональным методом, разбивая весь диапазон удаляемой влаги на m концентрационных зон. Продолжительность сушки частиц слоя τ_i (с) в концентрационных зонах рассчитывают по решению задачи массопроводности (диффузии влаги) при постоянных параметрах сушильного агента в зонах. Расчетное уравнение для тел в форме пластины, цилиндра и шара имеет вид [6]:

$$\tau_i = \frac{R^2}{\mu_i^2 k_i} \ln \frac{B_i}{\bar{E}_i}, \quad (14)$$

где R – половина толщины пластины, радиус цилиндра или шара, м; k_i – значение коэффициента массопроводности в i -той концентрационной зоне, м²/с; μ_i – первый положительный корень характеристического уравнения решения задачи массопроводности (характеристические уравнения для тел в форме пластины, цилиндра и шара приведены в [6]); $\bar{E}_i = (\bar{u}_{к.и} - u_{р.и})/(\bar{u}_{н.и} - u_{р.и})$ – относительное среднеобъемное влагосодержание частицы в i -

той концентрационной зоне. Согласно [6], коэффициент B_i^* в инженерных расчетах для любой концентрационной зоны можно принять равным единице. Для частиц в форме прямоугольного параллелепипеда и ограниченного цилиндра формула (14) принимает вид, который следует из перемножения решений для тел, пересечением которых образовано данное тело [6].

Коэффициент массопроводности k зависит от влагосодержания и температуры высушиваемого

тела. Его концентрационная зависимость учитывается применением зонального метода расчета, а для учета влияния на него температуры необходимо привлекать решение задачи теплообмена при непрерывном СВЧ-конвективном подводе энергии в условиях сушки тела. Эти решения для тел в форме пластины, цилиндра и шара приведены в [2, 8, 10]. В частности, для тела в форме пластины среднеобъемная температура тела описывается уравнением [8]:

$$\begin{aligned} \overline{W}^*(Fo) = Bi \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(\mu_n^2 + Bi^2) \sin 2\mu_n}{\mu_n(\mu_n^2 + Bi^2 + Bi)} \int_0^{Fo} \phi(Fo) \exp(-\mu_n^2(Fo-\tau)) d\tau + \\ + q_{0,i} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(\mu_n^2 + Bi^2) \sin^2 \mu_n}{\mu_n^4(\mu_n^2 + Bi^2 + Bi)} (1 - \exp(-\mu_n^2 Fo)), \end{aligned} \quad (15)$$

где $q_{v,i} = \frac{N_{эл} \cdot \eta_t}{V(I - \varepsilon_{сл,i})}$ – мощность электромагнитного источника в сушилке, отнесенная к единице объема твердой фазы в слое, Вт/(м³ т. ф.); η_t – термический КПД сушилки; $q_{v,i}^* = \frac{q_{v,i}}{(c_m \rho_m)_i}$ – мощность внутреннего объемного источника теплоты в сушилке, отнесенная к объемной теплоемкости высушиваемого материала, °C/с; $q_{0,i} = \frac{q_{v,i}^* R_i^2}{a_{m,i}(t_c - t_{м,н})}$ – безразмерный комплекс;

$$\phi(Fo) = 1 - \frac{r * i(\tau) R}{Bi \lambda(t_c - t_n)} = 1 - \frac{r * i(\tau)}{\alpha(t_c - t_n)}.$$

Параметры $c_{m,i}, \rho_{m,i}, q_{v,i}^*, R_i, a_{i,i}, \bar{t}_{m,k,i}, q_{0,i}$ изменяются по концентрационным зонам, что должно быть учтено в расчете.

В уравнение (15) входят функция $\phi(Fo)$, содержащая интенсивность сушки $i(\tau)$. Последнюю рассчитывают по решению задачи массопроводности, из которого следует:

$$\begin{aligned} i(\tau) = -\frac{d\bar{u}}{d\tau} R_V \rho_0 = \\ = \left[\frac{\rho_0 k}{bR} \sum_{k=1}^{\infty} B_k \beta_k^2 \exp(-\beta_k^2 Fo_m) \right] (\bar{u}_n - u_p), \end{aligned} \quad (16)$$

где $b = 1$ – для частицы в форме пластины, $b = 2$ – в форме цилиндра, $b = 3$ – в форме шара. Параметры B_k, β_k определяются формой высушиваемой частицы и числом Bi_m [6]. Для расчета параметров B_k, β_k используют уравнения, приведенные в [6]. Число Bi_m содержит коэффициент массоотдачи β_c , который в условиях электромагнитно-конвективной сушки при продувании сушильного агента через слой материала находят по уравнению подобия [7]:

$$Sh = A \cdot Bu^n \cdot H_0^m \cdot F_f^k, \quad (17)$$

где A, n, m, k – постоянные. Для частиц пластинчатой формы в [8] было найдено: $A = 0,64 \cdot 10^{-7}$; $n = 1,91$, $m = -1,28$; $k = -0,0037$. В [2] приведены значения этих констант также для частиц цилиндрической формы.

Коэффициент теплоотдачи α находят путем его пересчета из коэффициента массоотдачи β_c по соотношению [6]:

$$\frac{\alpha}{\beta_c} = \rho c_p \frac{p - p_{пар,ср}}{p}, \quad (18)$$

где $p_{пар,ср}$ – среднее парциальное давление пара в пограничном слое высушиваемого материала (Па). По найденным значениям коэффициента теплоотдачи α далее вычисляют число Bi в концентрационных зонах.

При расчете кинетики сушки зональным методом для каждой концентрационной зоны последовательно определяют: значение коэффициента массопроводности k_i , равновесное влагосодержание частицы $u_{p,i}$, относительное среднеобъемное влагосодержание частицы $\bar{E}_i$, необходимое время пребывания частицы в i -той концентрационной зоне τ_i (последнее по уравнению (14)). Параметр μ_i в уравнении (14) зависит от числа Bi_m , его находят из решений задачи массопроводности для тел соответствующей формы, которые приведены в [6]. Значения коэффициента массопроводности берут при средних температурах частицы в концентрационных зонах, которые рассчитывают как $\bar{t}_{m,ср,i} = (t_{м,н} + \bar{t}_{m,k,i})/2$, °C, где $t_{м,н}$ – температура материала в начале сушки, °C; $\bar{t}_{m,k,i}$ – средняя по объему частицы его температура в конце i -той концентрационной зоны, °C. При этом температуру материала $t_{м,k,i}$ рассчитывают по уравнению (15) для тел пластинчатой формы или по аналогичному уравнению для тел иной формы (цилиндр, шар).

При вычислении параметра $q_{v,i} = \frac{N_{эл}\eta t}{V_{сл}(1-\varepsilon_{сл,i})}$ порозность слоя $\varepsilon_{сл}$ находят по соотношению: $\varepsilon_{сл} = 1 - \frac{\rho_{нас}}{\rho_{м,i}}$. Затем определяют по зонам параметр $q_{vi}^* = \frac{q_{v,i}}{(c_m \rho_m)_i}$ и далее $q_{0,i}$.

Найдя изложенным способом температуру материала, далее по уравнению (14) вычисляют по зонам время τ_i , используя литературные данные по зависимости коэффициента массопроводности от влагосодержания материала и температуры. Равновесное влагосодержание $u_{p,i}$ находят также по литературным данным как функцию параметров $t_{в, сл.ср,i}$ (среднее значение воздуха в слое в i -той концентрационной зоне) и $\varphi_{в,сл.ср,i}$ (среднее значение относительной влажности воздуха в слое в i -той концентрационной зоне). Параметры $t_{в, сл.ср,i}$ и $\varphi_{в,сл.ср,i}$ находят осреднением этих значений по высоте слоя:

$t_{в, сл.ср,i} = (t_{в, н} + t_{в,к,i})/2$; $\varphi_{в,сл.ср,i} = (\varphi_{в,н} + \varphi_{в,к,i})/2$, где $t_{в, н}$ – принятая в расчете температура воздуха на входе в слой, °C; $t_{в,к,i}$ – температура воздуха на выходе из слоя в i -той концентрационной зоне, °C; $\varphi_{в,н}$ – относительная влажность воздуха на входе в слой в; $\varphi_{в,к,i}$ – относительная влажность воздуха, выходящего из слоя в i -той концентрационной зоне. Параметры воздуха, выходящего из слоя, определяют по уравнениям теплового и материального баланса по концентрационным зонам.

Общее необходимое время пребывания материала в сушилке находят суммированием времен τ_i по концентрационным зонам:

$$\tau_o = \sum_{i=1}^m \tau_i \quad (19)$$

По найденному времени τ_o определяют рабочую длину ленты сушилки:

$$l = v \cdot \tau_o \quad (20)$$

Находят площадь поверхности облучаемого слоя $F_{сл}$ (м²):

$$F_{сл} = B \cdot l \quad (21)$$

и сопоставляют ее с ранее найденной по уравнению (13). В случае значительного расхождения делают повторный расчет при сохранении принятого значения $N_{уд}$. Для этого находят новое значение $N_{эл}$:

$$N_{эл} = N_{уд} \cdot F_{сл}, \quad (22)$$

где $F_{сл}$ – значение, найденное по уравнению (21).

Расчеты повторяют до получения приемлемого соотношения значений $F_{сл}$, найденных по уравнениям (21) и (11).

2. Пример расчета ленточной сушилки с продуваемым слоем и СВЧ-конвективным подводом энергии

Рассмотрим в качестве примера сушку морковных слайсов в рассматриваемой сушилке. Пусть производительность сушилки равна $G_n = 100$ кг/ч по влажному материалу, начальная влажность материала $W_n = 85\%$, конечная влажность $W_k = 12\%$, начальная температура материала $t_{м,н} = 18$ °C, температура воздуха на входе в сушилку после его подогрева в калорифере $t_{в,н} = 70$ °C, толщина слайса $\delta = 3$ мм. По приведенным выше уравнениям находим: $M_{вл} = 82,95$ кг/ч; $G_k = 17,05$ кг/ч; принимаем в первом приближении $t_{м,к} = 45$ °C; $q_m = 8,019$ кДж/кг; принимаем $N_{эм} = 100$ кВт и находим $q_d = 1,205$ кДж/кг; находим далее $q_n = 0,819$ кДж/кг; угловой коэффициент сушки $\Delta = 67,87$ кДж/кг. $H_n = 97,0$ кДж/кг, влагосодержание воздуха, выходящего из сушилки, $d_k = 0,022$ (кг/(кг сух. в-ва)), относительную влажность выходящего из сушилки воздуха $\varphi = 0,45$, расход воздуха через сушилку $L = 6912,5$ кг/ч. Задаемся шириной ленты $B = 1,0$ м, высотой слоя материала на ней $h = 0,010$ м, принимаем насыпную плотность материала равной $\rho_{нас} = 650$ кг/м³ [23] и по уравнению (10) определяем скорость движения ленты $v = 0,00427$ м/с. Принимаем плотность потока СВЧ энергии, поступающей на слой материала, равной $N_{уд} = 10$ кВт/(м² поверхности слоя), находим площадь поверхности облучаемого слоя $F_{сл} = 10$ м² и объем слоя на ленте $V_{сл} = 0,1$ м³.

Рассчитываем кинетику сушки слайсов зональным методом, разбивая весь диапазон удаляемой влаги на 5 концентрационных зон (табл. 1). Необходимое время пребывания материала в концентрационных зонах определяем по уравнению (14). Слайсы моркови в процессе сушки дают усадку, которую будем учитывать при расчете кинетики сушки. На основе данных [24] усадка слайса моркови толщиной 3 мм может быть описана уравнением:

$$l_t = 1,025(1 + 0,340 \bar{u}), \quad (23)$$

где l_t – текущая толщина слайса, м; $\bar{u}$ – среднеобъемное влагосодержание слайса, (кг влаги)/(кг сух. м-ла).

Рассчитываем коэффициент массоотдачи β_c по уравнению подобия (17): $\beta_c = 0,026$ м/с и коэффициент теплоотдачи α по уравнению (18):

$\alpha = 32,83$ Вт/(м² К). Находим числа Bi_i в зонах, учитывая усадку слайсов. При этом используем значения $\lambda_{м,i}$, взятые из [23], найденные числа Bi_i , приведены в таблице. Они оказались меньше 0,1 и, следовательно, задача теплообмена является внешней, учитываем этот факт при расчете кинетики сушки с использованием решения задачи нагрева высушиваемых частиц по уравнению (15).

Таблица

Результаты расчета кинетики сушки слайсов моркови в ленточной сушилке
Table. Calculation results for the drying kinetics of carrot slices in a belt dryer

Параметр	Концентрационные зоны				
	1	2	3	4	5
$W_{н.i} - W_{к.i}$, кг / (кг влажн. м-ла)	0,85-0,75	0,75-0,65	0,65-0,45	0,45-0,25	0,25- 0,12
$\lambda_{м.i}$, Вт/(м К)	0,54	0,49	0,41	0,31	0,23
Bi_i	0,077	0,061	0,059	0,065	0,078
$Bi_{м.i} = (\beta_c R_i) / (k_i \rho_0 A_p)$	98,3	171,0	219,0	184,5	174,5
$\rho_{м.i}$, кг/м ³	1080	1126	1203	1322	1439
$c_{м.i}$, Дж/(кг·К)	3604	3321	2896	2330	1863
$a_{м.i} \cdot 10^7$, м ² /с	1,39	1,29	1,18	1,01	0,86
$q_{v.i} \cdot 10^{-6}$, Вт/(м ³ т. ф.)	3,00	3,15	3,33	3,67	4,00
$q_{v.i}^*$, К/с	0,771	0,830	0,956	1,191	1,501
$\varepsilon_{сл.i}$, м ³ /м ³	0,40	0,43	0,46	0,51	0,55
$q_{0.i}$	0,242	0,147	0,120	0,118	0,143
$t_{м.к.i}$, °С	58,6	67,8	72,8	87,0	96,9
$\bar{t}_{м.ср.i} = (t_{м.н} + \bar{t}_{м.к.i})/2$, °С	38,3	42,9	45,4	61,5	52,5
$k_i \cdot 10^9$, м ² /с	0,5	0,41	0,55	0,45	0,85
τ_i , с	835	764	981	816	1130

Оцениваем число Био массообменное $Bi_{м.i} = \frac{\beta_c R_i}{k_i \rho_0 A_p}$, в котором $\rho_0 = 1025$ кг/м³ [23], R_i - значение половины толщины слайса в i -той концентрационной зоне. Значения коэффициента массопроводности при сушке моркови k_i берем из [24] при средних влагосодержаниях материала в зонах $\bar{u}_{ср.i}$, принимая в этой оценке температуру слайсов равной средней температуре воздуха в слое: $t_{м.i} = t_{в.сл.ср} = (t_{в.н} + t_{в.к})/2 = (70 + 40)/2 = 55$ °С. Коэффициент распределения функции концентрационного фазового равновесия согласно данным [23] берем равным: $A_p = u_p/C_c = 0,39$ (кг/(кг сух. м-ла))/(кг/м³). Полученные значения $Bi_{м.i}$ приведены в таблице, они свидетельствуют о том, что задача диффузии влаги в слайсах является чисто внутренней, поэтому корень μ_i в уравнении (14) во всех зонах как для пластины берем равным [6]: $\mu_i = \pi/2$.

При средней температуре воздуха в слое $t_{в.сл.ср} = (t_{в.н} + t_{в.к})/2 = (70 + 40)/2 = 55$ °С определяем по уравнению (15) температуру слайсов в конце каждой концентрационной зоны $t_{м.к.i}$, беря за начало отсчета момент начала процесса сушки. Для этого предварительно вычисляем параметры:

$$q_{v.i} = \frac{N_{эл} \eta t}{V(1 - \varepsilon_{сл.i})}, q_{v.i}^* = \frac{q_{v.i}}{c_{м.i} \rho_{м.i}}; \varepsilon_{сл.i} = 1 - \frac{\rho_{нас}}{\rho_{м.i}};$$

$$q_{0.i} = \frac{q_{v.i}^* R_i^2}{a_{м.i}(t_c - t_{м.н})}.$$

В этих расчетах значения теплофизических характеристик моркови c_m , ρ_m , a_m берем из [23].

Находим среднюю температуру материала в концентрационных зонах как $\bar{t}_{м.ср.i} = (t_{м.н} + \bar{t}_{м.к.i})/2$, используя для этого уравнение (15). Здесь

$t_{м.н}$ - температура материала в начале всего процесса тепломассообмена, а $\bar{t}_{м.к.i}$ - среднеобъемная температура материала в его конце в i -той концентрационной зоне. По средним значениям влагосодержания слайсов моркови в концентрационных зонах и по температурам $\bar{t}_{м.ср.i}$ из [24] находим значения коэффициента массопроводности k_i , и по уравнению (14) рассчитываем время τ_i (с). Общее время сушки τ_o находим как сумму τ_i . По найденному времени τ_o определяем рабочую длину ленты сушилки $l_{сл}$ - по уравнению (13), площадь облучаемого слоя $F_{сл} = B \cdot l_{сл}$, по соотношению (22) уточняем значение $N_{эл}$ и делаем повторный кинетический расчет. Результаты повторного расчета величин

$q_{v.i}$, $q_{v.i}^*$, $q_{0.i}$, $t_{м.к.i}$, $\bar{t}_{м.ср.i}$, k_i , τ_i приведены в табл. 1. Общее время сушки составляет: $\tau_o = \sum_{i=1}^5 \tau_i = 4526$ с. По найденному значению времени τ_o определяем рабочую длину ленты сушилки:

$$l = v \tau_o = 0,00427 \cdot 4526 = 19,3 \text{ (м)}. \quad (24)$$

Отметим, что без учета внутридиффузионного сопротивления слайсов (расчет времени сушки как для первого периода сушки - по уравнению массотдачи с использованием коэффициента массоотдачи $\beta_c = 0,026$ м/с) общее время сушки составляет $\tau_o = 2972$ с. Таким образом, учет внутридиффузионного сопротивления слайсов при расчете кинетики сушки вносит существенную поправку в кинетический расчет.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработана методика расчета ленточной сушилки непрерывного действия с продуваемым

слоем и СВЧ-конвективным подводом энергии, базирующаяся на использовании аналитического решения задачи теплообмена при непрерывном СВЧ-конвективном энергоподводе для частиц высушиваемого материала соответствующей формы и применении зонального метода кинетического расчета аппарата, позволяющего учесть изменение теплофизических характеристик в ходе процесса.

2. Дан пример расчета сушилки для частиц пластинчатой формы (слайсов моркови).

3. Показано, что учет внутридиффузионного сопротивления материала существенно повышает точность расчета.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

The authors declare the absence of a conflict of interest warranting disclosure in this article.

ОБОЗНАЧЕНИЯ

$A_p = u_p/C_c$ – коэффициент распределения функции концентрационного фазового равновесия, (кг/(кг сух. м-ла))/(кг/м³);
 α – коэффициент температуропроводности, м²/с;
 B – ширина ленты, м;
 C_c – концентрация пара в сушильном агенте, кг/(м³);
 c – удельная массовая теплоемкость, Дж/(кг К);
 d – влагосодержание воздуха, (кг влаги)/(кг сух. м-ла);
 F – поверхность облучаемого слоя, м²;
 G – расход материала через сушилку, кг/ч;
 H – энтальпия воздуха, Дж/кг;
 h – высота слоя на ленте, м;
 $h_0 = 1$ – высота слоя, принятая в [7] за базу отнесения, м;
 k – коэффициент массопроводности, м²/с;
 L – расход воздуха через сушилку, кг/ч;
 l – длина сушилки, м;
 $M_{вл}$ – количество влаги, испаряемой в сушилке, кг/ч;
 $N_{эл}$ – электромагнитная мощность, Вт;
 P – давление воздуха в сушилке, Па;
 q_d – дополнительный удельный электромагнитный энергоподвод в сушилке, Дж/кг;
 q_n – удельные теплотери через корпус сушилки, Дж/кг;
 R – половина толщины пластины (слайса), м;

r – теплота парообразования, Дж/кг;
 V – объем, м³;
 v – скорость движения ленты, м/с;
 t – температура, °С;
 $\bar{t}$ – средняя по объему частицы материала температура, °С;
 $\bar{u}$ – среднеобъемное влагосодержание частицы, (кг влаги)/(кг сух. м-ла).
 W – влажность материала, (кг влаги)/(кг влажного м-ла);
 $\bar{W}^* = \frac{\bar{t} - t_n}{t_c - t_n}$ – относительная среднеобъемная температура материала, безразмерная;
 α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м² К);
 β_c – коэффициент массоотдачи, м/с;
 Δ – угловой коэффициент сушки, Дж/кг;
 δ – толщина слайса, м;
 $\varepsilon_{сл}$ – порозность слоя, м³/(м³ слоя);
 λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м К);
 ρ – плотность, кг/м³;
 $\rho_{ср}$ – удельная объемная изобарная теплоемкость влажного воздуха (Дж/(м³ К));
 η_t – термический КПД, безразмерный;
 τ – время, с;
 φ – относительная влажность воздуха, доли;
 $Bi = \alpha R / \lambda$ – число Био тепловое, безразмерное;
 $Bi_m = \frac{\beta_c R}{k \rho_0 A_p}$ – число Био массообменное модифицированное, безразмерное;
 $Bu = \frac{N_{эл}}{M_{вл} r}$ – число Бурдо, безразмерное;
 $\bar{E}_i = \frac{\bar{u}_{к,i} - u_{р,i}}{\bar{u}_{н,i} - u_{р,i}}$ – среднеобъемное относительное влагосодержание частицы в i -той концентрационной зоне, безразмерное;
 $F_f = \frac{\square}{B}$ – фактор формы, безразмерный;
 $H_0 = \frac{h}{h_0}$ – безразмерная толщина слоя слайсов;
 $Sh = \frac{\beta_c \square}{D}$ – число Шервуда, безразмерное.

Индексы: в – воздух; вл – влага; д – дополнительный; к – конечный; м – материал; н – начальный; нас – насыпной; пар – пар; п – потери; сл – слой; ср – средний; т – текущий; уд – удельный; эл – электромагнитный; 0 – абсолютно сухой материал; i – номер концентрационной зоны.

ЛИТЕРАТУРА

1. Handbook of Industrial Drying. Ed by A.S. Mujumdar. Boca Raton, FL.: CRC Press. 2007. 1312 p. DOI: 10.1201/9781420017618.
2. Rudobashta S.P., Kartashov E.M., Zueva G.A. Heat and mass transfer in the drying of a cylindrical body in a continuous electromagnetic field of high and upperhigh. *Theor.*

REFERENCES

1. Handbook of Industrial Drying. Ed by A.S. Mujumdar. Boca Raton, FL.: CRC Press. 2007. 1312 p. DOI: 10.1201/9781420017618.
2. Rudobashta S.P., Kartashov E.M., Zueva G.A. Heat and mass transfer in the drying of a cylindrical body in a continuous electromagnetic field of high and upperhigh. *Theor.*

- Found. Chem. Eng.* 2022. V. 56. N 5. P. 810-218. DOI: 10.1134/S0040579522050372.
3. **Липин А.Г., Липин А.А.** Кинетика высвобождения азота из гранул мочевины с полимерным покрытием. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2022. Т. 65. Вып. 7. С. 100-106. DOI: 10.6060/ivkkt.20226507.6635.
 4. **Рудобашта С.П., Зуева Г.А., Бабичева Е.Л.** Кинетический расчет сушилки периодического действия с псевдоожженным слоем. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2024. Т. 67. Вып. 6. С. 109-118. DOI: 10.6060/ivkkt.20246706.6968.
 5. **Акулич П.В., Акулич А.В.** Конвективные сушильные установки: методы и примеры расчета. Минск: Вышэйшая школа. 2019. 376 с.
 6. **Рудобашта С.П.** Массообмен в процессах сушки, адсорбции, экстрагирования, диффузионной паропроницаемости. М.: Колос-с. 2024. 573 с.
 7. **Гаврилов А.В.** Исследование энерготехнологий процессов обезвоживания растительного сырья. *Изв. сельскохозяйств. науки Тавриды.* 2018. Вып. 16 (179). С. 82-89.
 8. **Рудобашта С.П., Карташов Э.М., Зуева Г.А.** Тепломассоперенос при сушке пластины в непрерывно действующем электромагнитном поле высокой и сверхвысокой частоты. *Теорет. основы хим. технологии.* 2021. Т. 55. № 2. С. 1-9. DOI: 10.31857/S0040357121020093.
 9. **Dietrich G., Esper G., Schuchmann H.** Trocknungstechnik in der Lebensmittelindustrie. Behr's Verlag DE. 2009. 610 p.
 10. **Рудобашта С.П., Карташов Э.М., Зуева Г.А.** Тепломассоперенос при нагреве и сушке сферического тела в непрерывно действующем электромагнитном поле высокой и сверхвысокой частоты. *Теор. основы хим. технол.* 2024. Т. 58. № 4. С. 506-514. DOI: 10.7868/S0040357116050109.
 11. **Рудобашта С.П.** Математическое моделирование процесса конвективной сушки дисперсных материалов. *Изв. РАН. Энергетика.* 2000. № 4. С. 98-108.
 12. **Li M., Ai Z., Xiao H., Mowafy S., Pei Y., Liu Y.** Improvement of drying efficiency and physicochemical quality of kiwifruit slices using infrared-assisted tilted tray air impingement drying. *Drying Technol.* 2022. V. 41. N 7. P. 1159-1170. DOI: 10.1080/07373937.2022.2125526.
 13. **Deependra Rajoriya, Bhavya M.L., Hebbar H. Umesh.** Far infrared assisted refractance window drying: Influence on drying characteristics and quality of banana leather. *Drying Technol.* 2023. V. 43. N 13. P. 2143-2155. DOI: 10.1080/07373937.2023.2220777.
 14. **Han J., Liang J., Yu X., Li Y., Huang C., Rehman A., Lv W.** Vacuum freeze drying combined with catalyzed infrared drying of chive: Effects on flavor and quality characterization. *Drying Technol.* 2024. V. 42. N 9. P. 1442-1455. DOI: 10.1080/07373937.2024.2358371.
 15. **Ebrahim Taghinezhad, Mohammad Kaveh, Esmail Khalife, Guangnan Chen.** Drying of organic blackberry in combined hot air-infrared dryer with ultrasound pretreatment. *Drying Technol.* 2021. V. 39. N 14. P. 2075-2091. DOI: 10.1080/07373937.2020.1753066.
 16. **Liu C., Bai C., Zhang Y., Zhu H., Dong Z., Zheng X.** Combined effect of ultrasonic pretreatment and drying temperature on the quality characteristics of honeysuckle puree under microwave vacuum drying. *Drying Technol.* 2025. V. 43. N 11. P. 1626-1640. DOI: 10.1080/07373937.2025.2492778.
 17. **Szadzińska J., Mierzwa D., Pawłowski A., Musielak G., Pashminehazar R., Kharaghani A.** Ultrasound- and microwave-assisted intermittent drying of red beetroot. *Drying Technol.* 2020. V. 38. N 1. P. 93-107. DOI: 10.1080/07373937.2019.1624565.
 3. **Lipin A.G., Lipin A.A.** Nitrogen release from polymer-coated urea granules. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.].* 2022. V. 65. N 7. P. 100-106 (in Russian). DOI: 10.1080/07373937.2018.1433199.
 4. **Rudobashta S.P., Babicheva E.L., Zueva G.A.** Kinetics of drying of dispersed material in the apparatus of periodic action with fluidized bed. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.].* 2024. V. 67. N 6. P. 109-118 (in Russian). DOI: 10.6060/ivkkt.20246706.6968.
 5. **Akulich P.V., Akulich A.V.** Convective Drying Plants: Methods and Calculation Examples. Minsk: Vysheyschaya Shkola. 2019. 376 p. (in Russian).
 6. **Rudobashta S.P.** Mass transfer in the processes of drying, adsorption, extraction, diffusion vapor permeability. M.: Kolos-s. 2024. 573 p. (in Russian).
 7. **Gavrilov A.V.** Study of energy technologies of plant raw material dehydration processes. *Izv. Sel'skokhoz. Nauki Tavridy.* 2018. Iss. 16 (179). P. 82-89 (in Russian).
 8. **Rudobashta S.P., Kartashov E.M., Zueva G.A.** Heat and mass transfer in drying of a plate in a continuous high- and superhigh-frequency electromagnetic field. *Theor. Found. Chem. Eng.* 2021. V. 5. N 2. P. 261-269. DOI: 10.31857/S0040357121020093.
 9. **Dietrich G., Esper G., Schuchmann H.** Trocknungstechnik in der Lebensmittelindustrie. Behr's Verlag DE. 2009. 610 p.
 10. **Rudobashta S.P., Zueva G.A., Kartashov E.M.** Heat and mass transfer when drying a spherical particle in an oscillating electromagnetic field. *Theor. Found. Chem. Eng.* 2016. V. 50. N 5. P. 718-729. DOI: 10.7868/S0040357116050109.
 11. **Rudobashta S.P.** Mathematical Modeling of the Convective Drying Process of Dispersed Materials. *Izv. RAS. Energetics.* 2000. N 4. P. 98-108 (in Russian).
 12. **Li M., Ai Z., Xiao H., Mowafy S., Pei Y., Liu Y.** Improvement of drying efficiency and physicochemical quality of kiwifruit slices using infrared-assisted tilted tray air impingement drying. *Drying Technol.* 2022. V. 41. N 7. P. 1159-1170. DOI: 10.1080/07373937.2022.2125526.
 13. **Deependra Rajoriya, Bhavya M.L., Hebbar H. Umesh.** Far infrared assisted refractance window drying: Influence on drying characteristics and quality of banana leather. *Drying Technol.* 2023. V. 43. N 13. P. 2143-2155. DOI: 10.1080/07373937.2023.2220777.
 14. **Han J., Liang J., Yu X., Li Y., Huang C., Rehman A., Lv W.** Vacuum freeze drying combined with catalyzed infrared drying of chive: Effects on flavor and quality characterization. *Drying Technol.* 2024. V. 42. N 9. P. 1442-1455. DOI: 10.1080/07373937.2024.2358371.
 15. **Ebrahim Taghinezhad, Mohammad Kaveh, Esmail Khalife, Guangnan Chen.** Drying of organic blackberry in combined hot air-infrared dryer with ultrasound pretreatment. *Drying Technol.* 2021. V. 39. N 14. P. 2075-2091. DOI: 10.1080/07373937.2020.1753066.
 16. **Liu C., Bai C., Zhang Y., Zhu H., Dong Z., Zheng X.** Combined effect of ultrasonic pretreatment and drying temperature on the quality characteristics of honeysuckle puree under microwave vacuum drying. *Drying Technol.* 2025. V. 43. N 11. P. 1626-1640. DOI: 10.1080/07373937.2025.2492778.
 17. **Szadzińska J., Mierzwa D., Pawłowski A., Musielak G., Pashminehazar R., Kharaghani A.** Ultrasound- and microwave-assisted intermittent drying of red beetroot. *Drying Technol.* 2020. V. 38. N 1. P. 93-107. DOI: 10.1080/07373937.2019.1624565.

18. Szadzińska J., Lechtańska J., Pashminehazar R., Kharaghani A., Tsotsas E. Microwave- and ultrasound-assisted convective drying of raspberries: Drying kinetics and microstructural changes. *Drying Technol.* 2019. V. 37. N 1. P. 1-12. DOI: 10.1080/07373937.2018.1433199.
19. Deng L.Z., Yang X.H., Mujumdar A.S., Zhao J.H., Wang D., Zhang Q., Xiao H.W. Red pepper (*Capsicum annuum* L.) drying: Effects of different drying methods on drying kinetics, physicochemical properties, antioxidant capacity, and microstructure. *Drying Technol.* 2018. V. 36. N 8. P. 893-907. DOI: 10.1080/07373937.2017.1361439.
20. Cao X., Zhang M., Fang Z., Mujumdar A.S., Jiang H., Qian H., Ai H. Drying kinetics and product quality of green soybean under different microwave drying methods. *Drying Technol.* 2017. V. 35. N 2. P. 240-248. DOI: 10.1080/07373937.2016.1170698.
21. Масштабный переход в химической технологии. Разработка промышленных аппаратов методом гидродинамического моделирования. Под ред. А.М. Розена. М.: Химия. 1980. 319 с.
22. Рудобашта С.П. Теплотехника. М.: Изд. «Перо». 2015. 672 с.
23. Теплофизические характеристики пищевых продуктов и материалов. Под ред. А.С. Гинзбурга. М.: Пищ. пром. 1975. 224 с.
24. Рудобашта С.П., Дмитриев В.М. Исследование диффузионных свойств растительных капиллярно-пористых коллоидных материалов с учетом их усадки. *Инж.-физ. журн.* 2022. Т. 95. № 6. С. 1381-1389. DOI: 10.1007/s10891-022-02604-w.
18. Szadzińska J., Lechtańska J., Pashminehazar R., Kharaghani A., Tsotsas E. Microwave- and ultrasound-assisted convective drying of raspberries: Drying kinetics and microstructural changes. *Drying Technol.* 2019. V. 37. N 1. P. 1-12. DOI: 10.1080/07373937.2018.1433199.
19. Deng L.Z., Yang X.H., Mujumdar A.S., Zhao J.H., Wang D., Zhang Q., Xiao H.W. Red pepper (*Capsicum annuum* L.) drying: Effects of different drying methods on drying kinetics, physicochemical properties, antioxidant capacity, and microstructure. *Drying Technol.* 2018. V. 36. N 8. P. 893-907. DOI: 10.1080/07373937.2017.1361439.
20. Cao X., Zhang M., Fang Z., Mujumdar A.S., Jiang H., Qian H., Ai H. Drying kinetics and product quality of green soybean under different microwave drying methods. *Drying Technol.* 2017. V. 35. N 2. P. 240-248. DOI: 10.1080/07373937.2016.1170698.
21. Large-Scale Transition in Chemical Technology. Development of Industrial Apparatuses by Hydrodynamic Modeling. Ed. by A.M. Rosen. M.: Khimiya. 1980. 319 p. (in Russian).
22. Rudobashta S.P. Heat engineering. M.: Izd. Pero. 2015. 672 p. (in Russian).
23. Thermophysical characteristics of food products and materials. reference manual. Ed. by A.S. Ginzburg. M.: Pisch. prom. 1975. 224 p. (in Russian).
24. Rudobashta S.P., Dmitriev V.M. Study of diffusion properties of plant-originated capillary-porous colloidal materials taking into account their shrinkage. *Inzh.-Fiz. Zhurn.* 2022. V. 95. N 6. P. 1381–1389 (in Russian). DOI: 10.1007/s10891-022-02604-w.

Поступила в редакцию 26.02.2026

Принята к опубликованию 23.04.2026

Received 26.02.2026

Accepted 23.04.2026