

ЭНЕРГЕТИКА, ТЕПЛО- И МАССООБМЕН
POWER ENGINEERING, HEAT AND MASS TRANSFER

УДК 532.5:66.047
<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2021-66-1-66-75>

Поступила в редакцию 25.03.2020
Received 25.03.2020

П. В. Акулич, Д. С. Слижук

*Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси,
Минск, Республика Беларусь*

**ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОС В ПРОДУВАЕМОМ СЛОЕ РАСТИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ
ПРИ ЦИКЛИЧЕСКОМ МИКРОВОЛНОВОМ ЭНЕРГОПОДВОДЕ**

Аннотация. Приведены результаты моделирования и экспериментального исследования тепломассопереноса в плотном продуваемом слое растительных материалов при циклическом микроволновом воздействии. Двумерная математическая модель состоит из уравнений сохранения массы газовой фазы, фильтрации, тепло- и массопереноса в фазах, которые учитывают внутреннее сопротивление переносу теплоты и влаги в частицах при определении коэффициентов тепло- и массоотдачи. При этом учитываются зависимости теплоты фазового перехода от влажности частиц, их усадки в процессе дегидратации, зависимости эффективных коэффициентов теплопроводности газа и диффузии пара от скорости фильтрации. В качестве примера приводится моделирование сушки нарезанного картофеля в плотном слое при циклическом СВЧ-конвективном энергоподводе. Показана возможность интенсификации процесса дегидратации влаги и сокращения его продолжительности по сравнению с конвективным способом. Выполнено сравнение расчетных данных с опытными данными, подтверждающее адекватность модели.

Ключевые слова: тепломассоперенос в неподвижном слое, СВЧ-конвективная сушка, сушка растительных материалов

Для цитирования: Акулич, П. В. Тепломассоперенос в продуваемом слое растительных материалов при циклическом микроволновом энергоподводе / П. В. Акулич, Д. С. Слижук // Вес. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2021. – Т. 66, № 1. – С. 66–75. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2021-66-1-66-75>

Piotr V. Akulich, Dmitriy S. Slizhuk

A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

**HEAT AND MASS TRANSFER IN THE BLASTED LAYER OF VEGETABLE MATERIALS WITH CYCLIC
MICROWAVE POWER SUPPLY**

Abstract. The results of modeling and experimental study of heat and mass transfer in a dense blown layer of plant materials under cyclic microwave exposure are presented. The two-dimensional mathematical model consists of the equations of conservation of the mass of the gas phase, filtration, heat and mass transfer in phases, which take into account the internal resistance to heat and moisture transfer in the particles when determining the heat and mass transfer coefficients. In this case, the dependences of the heat of the phase transition on the humidity of the particles, their shrinkage during dehydration, and the dependences of the effective coefficients of thermal conductivity of the gas and vapor diffusion on the filtration rate are taken into account. The simulation results of drying chopped potatoes in a dense layer with a cyclic microwave convective energy supply are presented. The possibility of intensifying the process of moisture dehydration and reducing its duration compared with the convective method is shown. Comparison of calculated data with experimental data confirms the adequacy of the model.

Keywords: heat and mass transfer in a fixed layer, microwave convective drying, drying of plant materials

For citation: Akulich P. V., Slizhuk D. S. Heat and mass transfer in the blasted layer of vegetable materials with cyclic microwave power supply. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2021, vol. 66, no. 1, pp. 66–75 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2021-66-1-66-75>

Введение. В настоящее время одним из актуальных научно-технических направлений является повышение эффективности существующих и разработка принципиально новых энергоэффективных и ресурсосберегающих технологий и оборудования. Прежде всего это касается энергоёмких технологий, к которым относятся процессы обезвоживания коллоидных капиллярно-пористых материалов растительного происхождения. Высокая их энергоёмкость обусловлена затратами теплоты на испарение влаги, высокой влажностью материалов, их термолабильными свойствами, препятствующими использованию высоких температур обработки, а также зачастую неэффективным подводом энергии, приводящим к ее потерям. В связи с этим внимание исследователей привлекают комбинированные нестационарные (импульсные и осциллирующие) электромагнитно-конвективные способы подвода энергии, а также методы вакуумного или сублимационного воздействия в сочетании с микроволновым или инфракрасным излучением, предварительным замораживанием с использованием жидких хладагентов [1–6]. Такие способы энергоподвода позволяют интенсифицировать тепло- и массообменные процессы и повысить их эффективность, при этом создают сравнительно мягкие режимы температурного воздействия и тем самым способствуют сохранению качественных показателей продукта. Приведенные в [7, 8] исследования циклического СВЧ-конвективного способа сушки некоторых растительных материалов в неподвижном и псевдооживленном слоях свидетельствуют о сокращении времени обезвоживания и уменьшении энергозатрат. В [9] исследован процесс микроволновой сушки бананов. Для предотвращения перегрева продукта сушка проводилась при переменной мощности СВЧ-излучения. Отмечены положительные стороны такого режима и конвективного воздействия потока воздуха на качество сухого продукта.

Для обезвоживания и тепловой обработки материалов растительного происхождения находят широкое применение аппараты с плотным неподвижным или малоподвижным дисперсным слоем с конвективным подводом теплоты, например ленточные, конвейерные и камерные полочные установки. Однако они в большинстве случаев имеют сравнительно высокие удельные расходы теплоты и потери с отработанным теплоносителем.

Метод механики сплошных сред часто применяется для моделирования процессов тепло-массопереноса в дисперсных системах. В [7] на его основе приводится описание тепло-массопереноса в плотном дисперсном слое при конвективном и конвективно-микроволновом нагреве. Рассматриваются двухфазные модели, однако не учитываются внутреннее термическое и диффузионное сопротивление во влажных частицах, сорбционные их свойства.

Цель этой работы – исследование влияния циклического микроволнового энергвоздействия на тепло-массоперенос в продуваемом плотном слое растительных материалов.

Математическая модель. Процессы тепло-массопереноса моделируются в слое влажного дисперсного материала, который находится в неподвижном состоянии и продувается нагретым воздухом снизу вверх в режиме фильтрации. Дисперсный слой сверху подвергается воздействию постоянного во времени или циклического СВЧ-излучения. При этом возможно создание осциллирующего конвективного энергоподвода. Такие режимы направлены на интенсификацию тепло-массообменных процессов, повышение их эффективности и создание щадящих условий теплового воздействия.

Математическая модель тепло-массопереноса включает следующие уравнения. Уравнение сохранения массы газовой фазы:

$$\frac{\partial \rho_1}{\partial \tau} + \nabla \cdot (\rho_1 \vec{v}) = j_{\text{п}}, \quad (1)$$

где \vec{v} – скорость газа в зазорах между частицами слоя, м/с; ρ_1 – приведенная плотность газовой фазы (сухого воздуха и водяных паров), равная $\rho_1 = \varepsilon \rho_1^\circ$, кг/м³ (ρ_1° – истинная плотность газовой фазы (сухого воздуха и водяных паров), кг/м³; ε – порозность слоя); τ – время, с.

Движение газа описывается уравнением Дарси $\vec{v} = -(k/\mu)\nabla p$. Уравнение переноса пара в дисперсном слое можно представить в следующем виде:

$$\frac{\partial (\rho_{\text{п}}^\circ \varepsilon)}{\partial \tau} + \vec{v} \nabla \rho_{\text{п}}^\circ = \nabla \cdot (D_{\text{п.эф}} \nabla \rho_{\text{п}}^\circ) + j_{\text{п}}, \quad (2)$$

где \vec{v} – скорость газа, рассчитанная на площадь сечения слоя, м/с; $\vec{v} = \vec{v}\epsilon$; $\rho_{\text{п}}^{\circ}$ – плотность водяных паров, кг/м³.

Перенос теплоты в газовой фазе слоя описывается таким уравнением:

$$c_1 \rho_1^{\circ} \left(\epsilon \frac{\partial T_1}{\partial \tau} + \vec{v} \nabla T_1 \right) = \nabla \cdot (\lambda_{1\text{эф}} \nabla T_1) - \alpha S_{\text{уд}} (T_1 - T_2), \quad (3)$$

где c_1 – удельная теплоемкость газа, Дж/(кг·К); $S_{\text{уд}}$ – удельная поверхность слоя, равная $S_{\text{уд}} = (6/l)(1 - \epsilon)$, 1/м; T_1 , T_2 – температуры газа и частиц соответственно, К; α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К).

Зависимости эффективных коэффициентов теплопроводности газовой фазы и диффузии пара от скорости фильтрации учитывались нами исходя из следующих выражений в направлении соответствующих осей [10, 11]: $\lambda_{1y\text{эф}} = \lambda_1(\epsilon + 0,5\text{Pe})$, $\lambda_{1x\text{эф}} = \lambda_1(\epsilon + 0,1\text{Pe})$ и $D_{\text{п.эф}} = D_{\text{п}}\epsilon + 0,5d_{\text{ч}}\vec{v}$, где $d_{\text{ч}}$ – эквивалентный диаметр частиц, м; $\text{Pe} = v d_{\text{ч}}/a$ – число Пекле; a – коэффициент температуропроводности газа, м²/с.

Уравнение переноса влаги в твердой фазе представим в следующем виде:

$$(1 - \epsilon) \frac{\partial U}{\partial \tau} = \nabla \cdot (D_{\text{эф}} \nabla U) - j_{\text{п}}, \quad (4)$$

где U – объемное влагосодержание, кг/м³ твердой фазы; $D_{\text{эф}}$ – эффективный коэффициент диффузии влаги, м²/с.

Перенос теплоты в твердой фазе слоя выразим следующим уравнением:

$$c \rho_{\text{с}} (1 - \epsilon) \frac{\partial T_2}{\partial \tau} = \nabla \cdot (\lambda_{2\text{эф}} \nabla T_2) + \alpha S_{\text{уд}} (T_1 - T_2) - r_{\text{п}} j_{\text{п}} + (1 - \epsilon) I, \quad (5)$$

где c – удельная теплоемкость частиц, $c = c_{\text{с}} + c_{\text{ж}} u$, Дж/(кг·К) ($c_{\text{с}}$, $c_{\text{ж}}$ – удельные теплоемкости сухих частиц и жидкости соответственно, Дж/(кг·К)); $\rho_{\text{с}}$ – плотность (содержание) сухого вещества, кг/м³ частицы; $r_{\text{п}}$ – удельная теплота парообразования, Дж/кг.

Интенсивность массоотдачи от твердой фазы в газовую фазу определяется выражением

$$j_{\text{п}} = \beta_u S_{\text{уд}} [u - u_{\text{р}}(p_{\text{п}}, T_1)], \quad (6)$$

где β_u – коэффициент массоотдачи, отнесенный к разности влагосодержаний, кг/(м²·с·кг/кг); u , $u_{\text{р}}$ – соответственно текущее и равновесное влагосодержания частиц, $u = W/(1 - W)$, кг/кг (W – влажность (на общую массу) частиц, кг/кг); $p_{\text{п}}$ – парциальное давление водяных паров, Па.

Для описания изотермы десорбции влаги используется аппроксимационная формула [12]

$$u_{\text{р}} = u_{0,5}(T) \left(\frac{p_{\text{п}}}{p_{\text{н}} - p_{\text{п}}} \right)^{1/n}, \quad (7)$$

где $u_{0,5}(T) = A \exp[-B(T - T_0)]$ – зависимость равновесного влагосодержания от температуры при $\phi = p_{\text{п}}/p_{\text{н}} = 0,5$; $p_{\text{н}}$ – давление насыщенного пара, Па. Показатель n постоянен для одного и того же материала. В результате аппроксимации данных работы [13] для картофеля показатель приближенно равен $n = 2,4$, а постоянные – $A = 0,135$, $B = 0,0087$, $T_0 = 293$ К.

Перенос влаги в частицах материала слоя учитывается в определении коэффициента массоотдачи. Последний определяется как коэффициент массопередачи, учитывающий сопротивление массоотдачи с поверхности частиц и внутридиффузионное сопротивление переносу влаги: $\beta_u = [1/\beta'_u + 1/(\chi\beta''_u)]^{-1}$ [14]. Здесь β'_u – коэффициент массоотдачи, отнесенный к разности влагосодержаний, кг/(м²·с·кг/кг); β''_u – коэффициент, обусловленный сопротивлением диффузии влаги, кг/(м²·с·кг/кг), $\beta''_u = (\beta''/(R_{\text{п}}T_2))(p_{\text{н}}/u_0)$, $\beta'' = 2\pi^2 D/(3d_{\text{ч}})$; D – коэффициент влагопроводности, м²/с; $\chi = \rho_{\text{ж}}/\rho_{\text{п}}$ – равновесная растворимость ($\rho_{\text{ж}}$ – плотность жидкости (влаги), кг/м³; $\rho_{\text{п}}$ – плотность водяных паров у поверхности частиц, кг/м³).

Плотность газовой смеси и водяных паров определяется по уравнению состояния идеального газа. Количество теплоты, выделяемое в частицах материала при воздействии электромагнитного излучения, рассчитывается следующим образом:

$$I = \delta(\tau)k'q_0(1 - R_{отр}) \exp[-k'(h - y)], \tag{8}$$

где $\delta(\tau)$ – периодическая (импульсная) функция времени; k' – показатель поглощения; q_0 – плотность потока электромагнитного излучения, падающего на поверхность слоя, Вт/м²; $R_{отр}$ – коэффициент отражения; y – вертикальная координата, м; h – высота слоя, м.

Учитывалась зависимость коэффициента поглощения от влагосодержания частиц: $k' = k_0 \exp[k_1(u_0 - u)]$, $u_{к.у} \leq u \leq u_0$; k_0, k_1 – постоянные; $u_0, u_{к.у}$ – начальное и конечное условные влагосодержания, кг/кг.

Коэффициент теплопроводности находится по эмпирической формуле [15]

$$D(u, T) = a_0 \exp(-a_1/u) \exp(-a_2/T), \tag{9}$$

где $a_0 = 1,29 \cdot 10^{-6}$, $a_1 = 0,0725$, $a_2 = 2044$. Уравнение (9) справедливо в диапазоне параметров $0,01 < u < 5$, $333 < T < 373$.

Удельная теплота испарения влаги находится из уравнения Клапейрона–Клаузиуса

$$r_{п} = \frac{R^* T^2}{M_{п}} \left(\frac{1}{p_{п}} \frac{\partial p_{п}}{\partial T} - \frac{nu_{0,5}^{n-1}}{u_{0,5}^n + u_{п}^n} \frac{\partial u_{0,5}}{\partial T} \right), \tag{10}$$

где R^* – универсальная газовая постоянная, Дж/(кмоль · К); $M_{п}$ – молекулярная масса пара, кг/кмоль; $\partial u_{0,5} / \partial T = -Bu_{0,5}(T)$.

Давление насыщенного водяного пара $p_{п}$ в диапазоне температур от 0 до 100 °С рассчитывается по приближенной формуле Антуана. Коэффициент теплоотдачи в неподвижном зернистом слое определяется согласно выражению [16]

$$Nu_{\text{ж}} = 0,395 Re_{\text{ж}}^{0,64} Pr^{0,33}, \tag{11}$$

где $Nu_{\text{ж}} = \alpha' d_{\text{ж}} / \lambda_1$ – тепловое число Нуссельта (α' – коэффициент теплоотдачи в дисперсном слое, Вт/(м² · К)); $Re_{\text{ж}} = vd_{\text{ж}}/\nu = 4v/(S_{\text{уд}}\nu)$ – число Рейнольдса (ν – кинематический коэффициент вязкости газа, м²/с); $Pr = \nu/a$ – число Прандтля; $d_{\text{ж}}$ – эквивалентный диаметр каналов, $d_{\text{ж}} = 4\epsilon d_{\text{ч}}/[6(1 - \epsilon)]$.

Допуская аналогию процессов тепло- и массообмена, коэффициент массоотдачи определяется по формуле, подобной (11). Коэффициент теплоотдачи рассчитывается с учетом термического сопротивления теплопроводности частиц [14]

$$\alpha = \frac{1}{\frac{d_{\text{ж}}}{\lambda_1 Nu_{\text{ж}}} + \frac{3}{2} \frac{d_{\text{ч}}}{\pi^2 \lambda_{\text{ч}}}}, \tag{12}$$

где $\lambda_{\text{ч}}$ – коэффициент теплопроводности частиц, Вт/(м · К).

В процессе сушки усадка частиц учитывалась нами на основе опытных данных по экспоненциальной зависимости от влагосодержания частиц $l = l_0 \exp[l_1(u_0 - u)]$, где l – линейный размер частицы, м; l_0, l_1 – постоянные. Изменение высоты слоя вследствие усадки при сушке не принималось во внимание, допуская пополнение слоя частицами с теми же свойствами так, как это имеет место, например, при сушке в ленточных установках при пересыпании материала с одной ленты на другую.

Основные параметры, при которых выполнялись расчеты: $k = 1 \cdot 10^{-8}$ м²; $c_1 = 1,006$ кДж/(кг · К); $\lambda_1 = 0,029$ Вт/(м · К); $D_{\text{эф}} = 5 \cdot 10^{-12}$ м²/с; $\lambda_{2\text{эф}} = 0,1$ Вт/(м · К); $R^* = 8314,2$ Дж/(кмоль · К); $M_{п} = 18,02$ кг/кмоль; $\rho_{\text{с}} = 175$ кг/м³; $u_0 = 5,2$ кг/кг; $U_0 = 910$ кг/м³ твердой фазы; $h = 0,05$ м; $a_0 = 0,007$ м; $R_{отр} = 0,05$; $k_0 = 83$; $u_{к.у} = 0,03$ кг/кг; $l_0 = 0,007$ м; $l_1 = -0,043$; $\epsilon = 0,5$.

Анализ расчетных и экспериментальных результатов. Схема разработанной в Институте тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси экспериментальной установки с комбинированным СВЧ-конвективным энергоподводом представлена на рис. 1. Установка состоит из сушильной камеры 3, магнетрона 1, волновода 2,

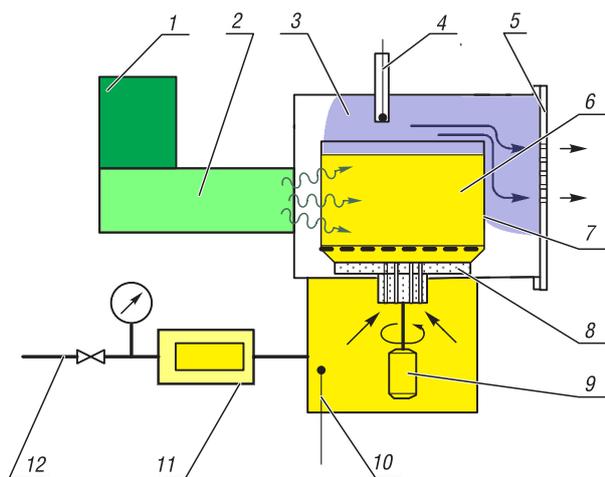


Рис. 1. Схема экспериментальной установки с СВЧ-конвективным энергоподводом: 1 – магнетрон; 2 – волновод; 3 – сушильная камера; 4, 10 – термопары; 5 – съемная крышка камеры; 6 – образец материала; 7 – съемная емкость с перфорированным дном для материала; 8 – вращающийся стол с воздушными каналами; 9 – привод; 11 – воздухоподогреватель; 12 – линия подачи сжатого воздуха

Fig. 1. Schematic of an experimental setup with a microwave convective energy supply: 1 – magnetron; 2 – waveguide; 3 – dryer chamber; 4, 10 – thermocouples; 5 – removable camera cover; 6 – sample material; 7 – removable container with perforated bottom for material; 8 – rotating table with air channels; 9 – drive; 11 – air heater; 12 – compressed air supply line

распределение теплоносителя по сечению емкости (слоя). Для повышения равномерности микроволнового облучения емкость приводилась во вращение, кроме того по ее оси размещалась цилиндрическая вставка из керамики диаметром 30 мм. Для определения кинетики процесса емкость с материалом периодически извлекалась из камеры и взвешивалась на лабораторных весах. Контроль температуры материала проводился по показаниям выходящего из слоя воздуха. Температура теплоносителя выбиралась в диапазоне 40–60 °С и поддерживалась на заданном уровне в разные периоды сушки.

На экспериментальной установке проводились исследования процесса сушки растительных материалов: нарезанного сырого картофеля, корня сельдерея. Дисперсный материал представлял собой преимущественно кубики размером 7×7×7 мм. Воздействие микроволновым излучением на влажный материал осуществлялось периодически в зависимости от его влажности. Длительность облучения определялась экспериментально и варьировалась в диапазоне от 0,5 до 3 мин. Продолжительность пауз между облучениями составляла 1–2 мин, что позволяло охлаждать частицы материала и тем самым предотвращать их перегрев и ухудшение качества.

Исследование влияния зависимости эффективных коэффициентов теплопроводности газа и диффузии пара от скорости фильтрации при конвективном энергоподводе показало, что средняя и локальная температура частиц в слое несколько ниже при постоянных эффективных коэффициентах, а плотность водяных паров и влагосодержание частиц немного выше. Однако эта разница невелика при исследованных параметрах процесса.

На рис. 2 видно, что уменьшение плотности циклического потока СВЧ-излучения, падающего на поверхность слоя, обуславливает замедление скорости процесса (кривая 3). В свою очередь увеличение скорости фильтрации газа через слой при данном режиме не приводит к значительной интенсификации испарения влаги. Рост скорости удаления влаги наблюдается лишь на начальном этапе процесса, поскольку температура газа составляет 60 °С. Затем подается менее нагретый (до температуры 40 °С) воздух, и увеличение его скорости не приводит к росту скорости

подводящего поток излучения к образцу материала 6. Камера 3 снабжена вращающимся столом 8 с каналами для подвода теплоносителя к образцу материала 6. Дисперсный материал размещается в съемной емкости 7 с перфорированным дном. Вращение стола для материала осуществляется электроприводом 9. В качестве теплоносителя используется сжатый воздух, который подается по линии 12 в калорифер 11 и после нагрева до требуемой температуры поступает через отверстия во вращающемся столе и днище емкости и далее равномерно распределяется в слое материала. После фильтрации через дисперсный слой материала воздух, насыщенный влагой, удаляется из камеры через отверстия в съемной крышке 5 в окружающую среду. Температура воздуха контролируется до и после прохождения через слой материала с помощью термопар 4 и 10. Давление воздуха под вращающимся столом составляет 20–40 кПа, что позволяет обеспечивать среднюю скорость воздуха по сечению емкости с образцом дисперсного материала 0,1–0,3 м/с.

Процесс сушки дисперсных материалов осуществлялся в специальной цилиндрической емкости диаметром 110 мм с перфорированным дном, что обеспечивало равномерное

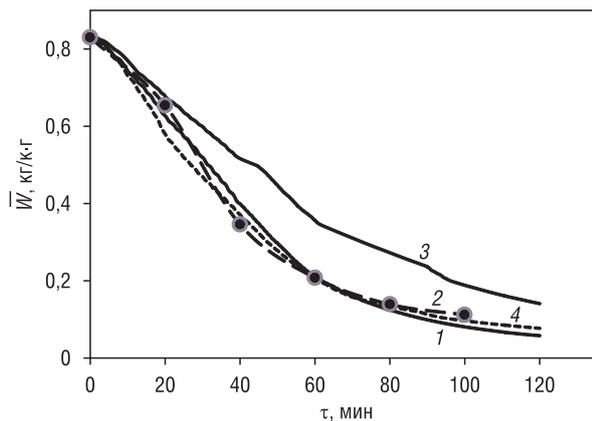


Рис. 2. Зависимости средней влажности (на общую массу) частиц от времени при циклическом СВЧ-конвективном энерговоздействии: 1 – $0 \leq \tau \leq 12$, $\tau_{\text{изл}} = 3$ мин, $\tau_{\text{п}} = 1$ мин; $12 < \tau \leq 20$, $\tau_{\text{изл}} = 1$, $\tau_{\text{п}} = 1$; $20 < \tau \leq 40$, $\tau_{\text{изл}} = 1$, $\tau_{\text{п}} = 1$; $40 < \tau \leq 60$, $\tau_{\text{изл}} = 0,5$, $\tau_{\text{п}} = 0,5$; $\tau > 60$, $\tau_{\text{изл}} = 0,5$, $\tau_{\text{п}} = 1$. При $0 < \tau \leq 20$ $T_{10} = 60$ °С, при $\tau > 20$ $T_{10} = 40$ °С. $q_0 = 7 \cdot 10^4$ Вт/м², $v_0 = 0,3$ м/с; $h = 0,05$ м; 2 – экспериментальная кривая; 3 – $q_0 = 5 \cdot 10^4$ Вт/м², $v_0 = 0,3$ м/с; 4 – $q_0 = 7 \cdot 10^4$ Вт/м², $v_0 = 1,0$ м/с

Fig. 2. Dependencies of average particle humidity (total weight) on time during cyclic microwave convective energy exposure: 1 – $0 \leq \tau \leq 12$, $\tau_{\text{изл}} = 3$ min, $\tau_{\text{п}} = 1$ min; $12 < \tau \leq 20$, $\tau_{\text{изл}} = 1$, $\tau_{\text{п}} = 1$; $20 < \tau \leq 40$, $\tau_{\text{изл}} = 1$, $\tau_{\text{п}} = 1$; $40 < \tau \leq 60$, $\tau_{\text{изл}} = 0,5$, $\tau_{\text{п}} = 0,5$; $\tau > 60$, $\tau_{\text{изл}} = 0,5$, $\tau_{\text{п}} = 1$. At $0 < \tau \leq 20$ $T_{10} = 60$ °C, at $\tau > 20$ $T_{10} = 40$ °C. $q_0 = 7 \cdot 10^4$ W/m², $v_0 = 0.3$ m/s; $h = 0.05$ m. 2 – experimental curve 3 – $q_0 = 5 \cdot 10^4$ W/m², $v_0 = 0.3$ m/s; 4 – $q_0 = 7 \cdot 10^4$ W/m², $v_0 = 1.0$ m/s

дегидратации влаги. Сравнение расчетной кривой кинетики дегидратации влаги (кривая 1) с экспериментальными данными (кривая 2) для подобных условий свидетельствует об их удовлетворительном соответствии.

Проведем анализ конвективного подвода теплоты с циклическим СВЧ-конвективным способом. На рис. 3 видно, что циклический подвод теплоты микроволновым излучением даже при продувании слоя холодным воздухом при температуре 17 °С приводит к заметному росту скорости испарения влаги по сравнению с чисто конвективным способом подвода теплоты при температуре воздуха 70 °С и примерно одинаковой скорости воздуха около 0,3 м/с. Повышая жесткость, или, иными словами, интенсивность циклического СВЧ-конвективного режима (кривая 3), можно еще более увеличить скорость процесса и сократить его продолжительность. При этом слой частиц быстро прогревается под действием микроволнового излучения и сравнительно быстро охлаждается за счет развитой поверхности контакта фаз при фильтрации воздуха.

Скорость испарения влаги в значительной степени зависит от скорости фильтрации газа. Однако увеличение скорости газа от 0,3 до 1,2 м/с при конвективном энергоподводе не позволяет достигнуть такой же интенсивности процесса удаления влаги, как при циклическом СВЧ-конвективном режиме, соответствующем кривой 3 на рис. 3. При этом следует отметить, что обеспечение сравнительно большой скорости фильтрации газа через слой материала увеличивает сопротивление слоя и соответственно приводит к возрастанию затрат энергии. Кроме того, большой расход газа влечет за собой большие потери с отработанным теплоносителем. Это приводит к необходимости создания рециркуляции теплоносителя, регенерации или утилизации теплоты, что также требует дополнительных капитальных вложений и затрат энергии.

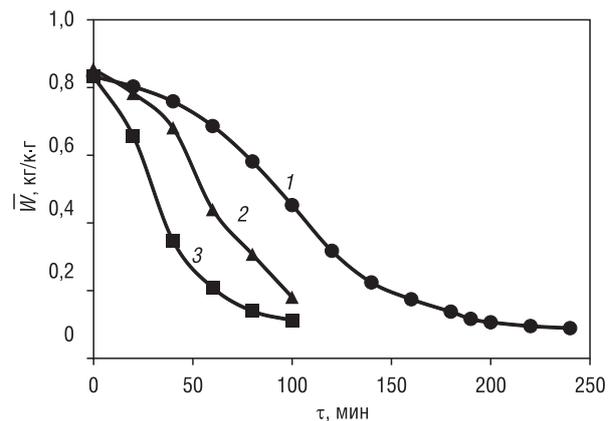


Рис. 3. Сравнение кинетических зависимостей конвективной и СВЧ-конвективной сушки частиц картофеля (кубики 7×7×7 мм) в неподвижном слое при $v_0 = 0,3$ м/с: 1 – конвективный теплоподвод: $t_1 = 70$ °С; высота слоя 50 мм; 2 – циклическое СВЧ-воздействие по 2 мин с паузой 2 мин, слой продувается непрерывно холодным воздухом $t_1 = 17$ °С; 3 – циклический СВЧ-конвективный теплоподвод ((время действия излучения + пауза)× количество периодов): ~ 0–20 мин: (3 + 1)×3, (2 + 1)×1, (1 + 1)×1, $t_1 = 60$ °С; ~ 20–40 мин: (2+1)×1, (1+1)×2, (1,5+1)×2, (1+1)×1, $t_1 = 40$ °С и далее постоянна; ~ 40–60 мин: (1 + 1)×2, (0,5 + 1)×7, (0,5 + 0,75)×2; ~ 60–80 мин: (0,5 + 0,5)×20; ~ 80–100 мин: (0,5 + 0,5)×5, (0,5 + 1)×10

Fig. 3. Comparison of the kinetic dependencies of convective and microwave convective drying of potato particles (cubes 7×7×7 mm) in a fixed layer at $v_0 = 0.3$ m/s: 1 – convective heat supply: $t_1 = 70$ °C; layer height 50 mm; 2 – cyclic microwave exposure for 2 minutes with a pause of 2 min, the layer is blown continuously with cold air $t_1 = 17$ °C; 3 – cyclic microwave convective heat supply ((radiation exposure time + pause)× number of periods): ~ 0–20 min: (3 + 1)×3, (2 + 1)×1, (1 + 1)×1, $t_1 = 60$ °C; ~ 20–40 min: (2 + 1)×1, (1 + 1)×2, (1.5 + 1)×2, (1 + 1)×1, $t_1 = 40$ °C and further it is constant; ~ 40–60 min: (1 + 1)×2, (0.5 + 1)×7, (0.5 + 0.75)×2; ~ 60–80 min: (0.5 + 0.5)×20; ~ 80–100 min: (0.5 + 0.5)×5, (0.5 + 1)×10

Температура частиц слоя носит колебательный характер и при отключении СВЧ-излучения быстро снижается из-за развитой поверхности контакта фаз вплоть до температуры газа на входе в слой (рис. 4, *a*). Наибольшие нагрев и колебания температуры претерпевает верхняя область слоя, на которую падает поток излучения. Поэтому при неподвижном слое частиц в процессе обезвоживания необходимо контролировать температуру частиц на его поверхности. Во избежание перегрева частиц на поверхности слоя можно перемешивать слой, что также будет способствовать выравниванию влажности по высоте слоя и интенсификации процесса.

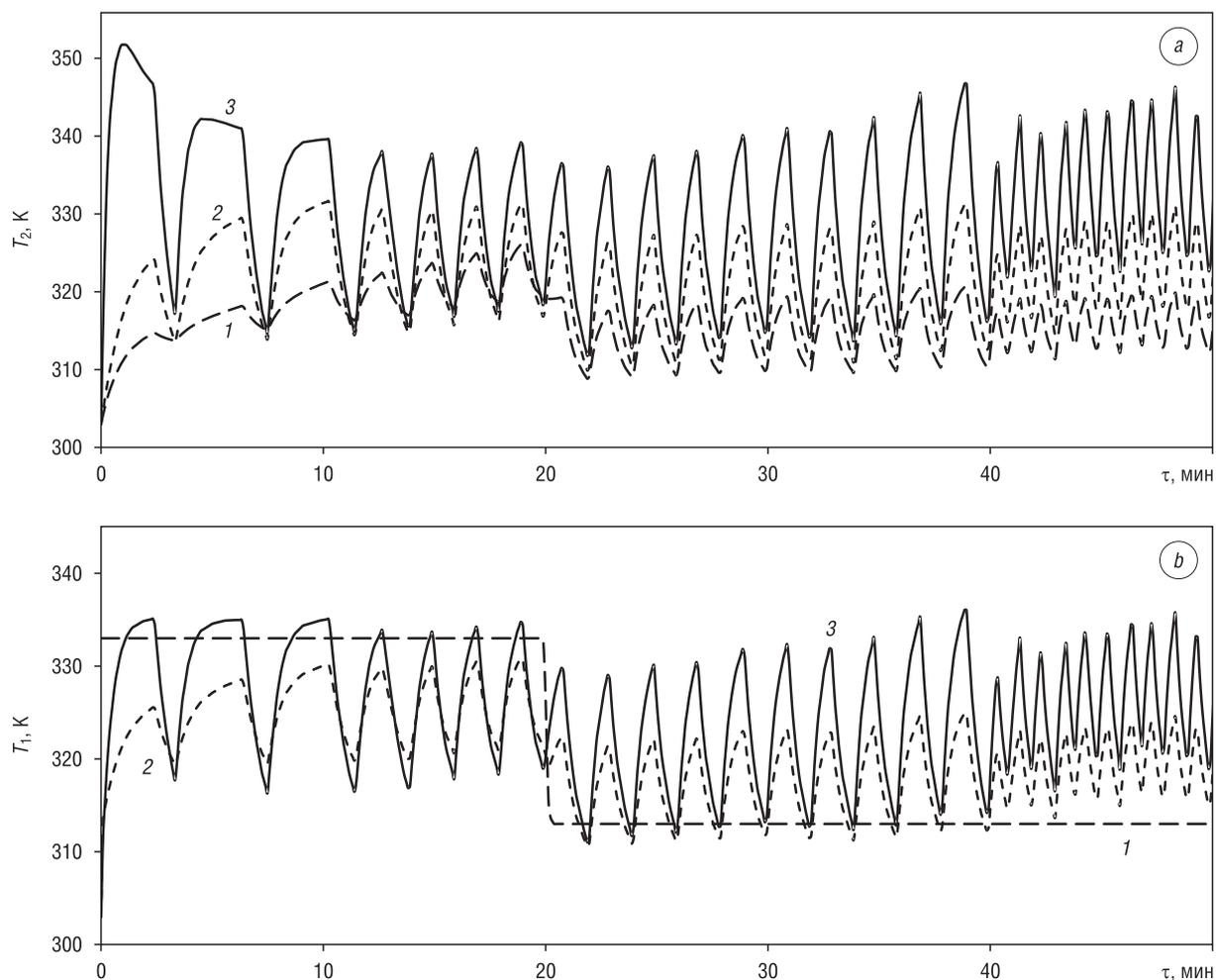


Рис. 4. Зависимости температуры частиц (*a*) и газа (*b*) в дисперсном слое от времени: 1 – $y = 0$ м; 2 – $y = 0,025$ м; 3 – $y = 0,05$ м; $x = 0,125$ м

Fig. 4. The dependence of the temperature of the particles (*a*) and gas (*b*) in the dispersed layer on time: 1 – $y = 0$ m; 2 – $y = 0.025$ m; 3 – $y = 0.05$ m; $x = 0.125$ m

Вследствие развитой поверхности контакта фаз зависимости температуры газа и частиц подобны, но значения температуры газа несколько ниже, чем частиц (рис. 4, *b*). На входе в слой температура воздуха задается ступенчатой функцией (кривая 1). Подача более холодного газа во втором периоде дегидратации влаги приводит к ускорению охлаждения частиц в период отключения СВЧ-излучения и предотвращает снижение качественных показателей продукта.

В ходе эксперимента установлено, что влажность частиц значительно различается по высоте слоя (рис. 5). Она достигает максимальных значений в конце первого и начале второго периодов сушки, а затем при удалении связанной влаги эта разница уменьшается и влажность частиц стремится к равновесной влажности. При этом распределение влаги по вертикальной координате в начале процесса приобретает параболический вид, а потом, с течением времени, выравнивается.

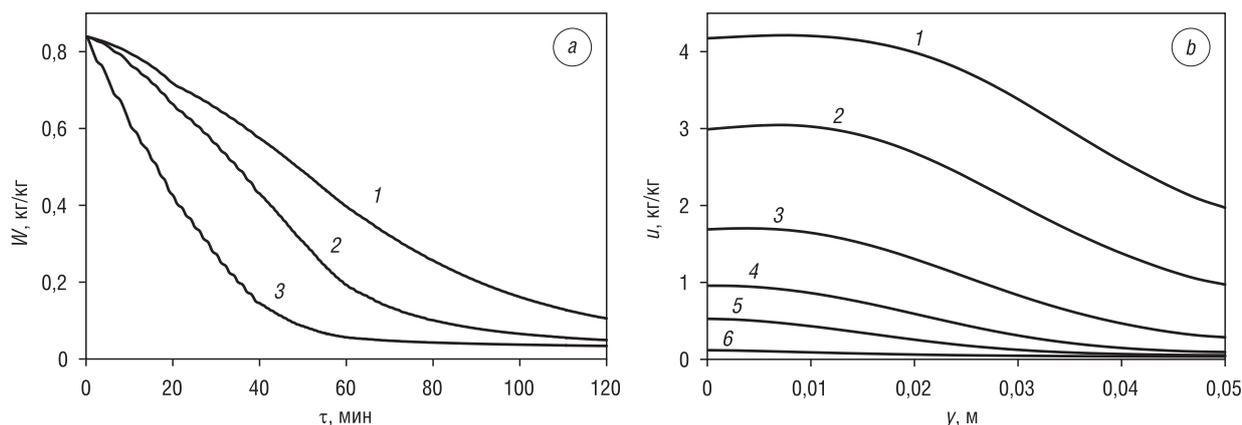


Рис. 5. Распределение влажности частиц в слое: *a* – в зависимости от времени, *1* – $y = 0$ м; *2* – $y = 0,025$ м; *3* – $y = 0,05$ м; *b* – по координате, *1* – $\tau = 500$ с; *2* – $\tau = 1000$ с; *3* – $\tau = 2000$ с; *4* – $\tau = 3000$ с; *5* – $\tau = 4000$ с; *6* – $\tau = 7200$ с
 Fig. 5. The distribution of particle moisture in the layer: *a* – depending on time, *1* – $y = 0$ m; *2* – $y = 0.025$ m; *3* – $y = 0.05$ m; *b* – by coordinate, *1* – $\tau = 500$ s; *2* – $\tau = 1000$ s; *3* – $\tau = 2000$ s; *4* – $\tau = 3000$ s; *5* – $\tau = 4000$ s; *6* – $\tau = 7200$ s

Получены зависимости удельной теплоты парообразования при снижении влагосодержания частиц, которые представлены на рис. 6.

Для их расчета использована изотерма десорбции влаги и уравнение Клапейрона–Клаузиуса. Видно, что с уменьшением влажности частиц величина удельной теплоты испарения влаги заметно возрастает, что обусловлено ростом энергии связи влаги с материалом. При этом кривые имеют волнистый характер с относительно небольшой амплитудой колебаний.

Заключение. В результате проведенных исследований показана адекватность математической модели опытным данным, возможность интенсификации и сокращения продолжительности процесса сушки растительных материалов в плотном слое за счет циклического воздействия СВЧ-излучения. Однако для предотвращения перегрева материала и обеспечения его качественных показателей целесообразно сокращение продолжительности периодов излучения или его мощности в процессе дегидратации влаги при непрерывном контроле температуры материала. В процессе обезвоживания в плотном слое наблюдается некоторая неравномерность распределения влагосодержания частиц по высоте слоя. Для уменьшения этой неравномерности возможно применение перемешивания слоя, циклическое облучение его с двух сторон или периодическое изменение направления фильтрации газа через слой. Следует иметь в виду, что растительные материалы обычно имеют высокую начальную влажность и требуют больших затрат энергии на процесс дегидратации влаги, поэтому для уменьшения расхода электроэнергии и мощности СВЧ-генераторов целесообразно осуществлять комбинированный подвод энергии.

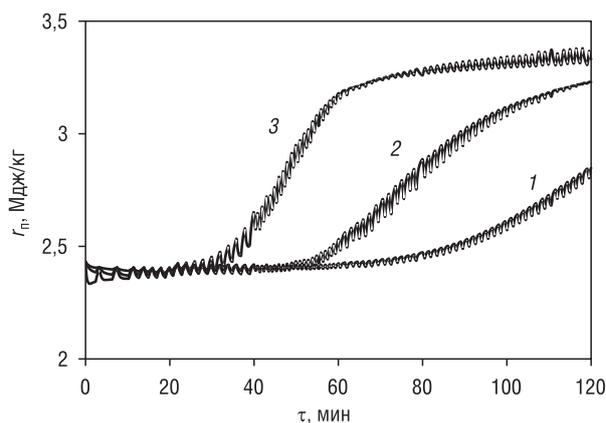


Рис. 6. Зависимости удельной теплоты парообразования влаги при снижении влажности частиц в слое: *1* – $y = 0$ м; *2* – $y = 0,025$ м; *3* – $y = 0,05$ м
 Fig. 6. The dependence of the specific heat of vaporization of moisture with a decrease humidity of particles in the layer: *1* – $y = 0$ m; *2* – $y = 0.025$ m; *3* – $y = 0.05$ m

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований, грант T19-009.

Acknowledgments

This work was carried out with the financial support of the Belarusian Republican Foundation for Fundamental Research, grant T19-009.

Список использованных источников

1. Modeling of the heat and mass transfer in vegetable materials during combined microwave convective heating / A. V. Akulich [et al.] // «Food Science, Engineering and Technology–2016»: Scientific Works of University of Food Technologies Proceedings of the 63rd Scientific Conference with Intern. Participation. – Vol. 63, iss. 1. – P. 274–282.
2. Wray, D. Novel concepts in microwave / D. Wray, H. S. Ramaswamy // *Drying Technology*. – 2015. – Vol. 33, iss. 7. – P. 769–783. <https://doi.org/10.1080/07373937.2014.985793>
3. Kumar, C. Microwave-convective drying of food materials: A critical review / C. Kumar, M. A. Karim // *Critical Review in Food Science and Nutrition*. – 2019. – Vol. 59, iss. 3. – P. 379–394. <https://doi.org/10.1080/10408398.2017.1373269>
4. Акулич, П. В. Конвективные сушильные установки: методы и примеры расчета / П. В. Акулич, А. В. Акулич. – Минск: Вышэйш. шк., 2019. – 376 с.
5. Акулич, П. В. Моделирование и экспериментальное исследование тепло- и влагопереноса при СВЧ-конвективной сушке растительных материалов / П. В. Акулич, А. В. Темрук, А. В. Акулич // *Инж.-физ. журн.* – 2012. – Т. 85, № 5. – С. 951–958.
6. Завалий, А. А. Разработка и тепловое моделирование устройств инфракрасной сушки термолabileльных материалов / А. А. Завалий, Ю. Ф. Снежкин. – Симферополь: ИТ «АРИАЛ», 2016. – 264 с.
7. Календерьян, В. А. Тепломассоперенос в аппаратах с плотным слоем дисперсного материала / В. А. Календерьян, И. Л. Бошкова. – Киев: Изд. дом «Слово», 2011. – 184 с.
8. Рудобашта, С. П. СВЧ-интенсификация процесса сушки растительных материалов / С. П. Рудобашта, А. В. Харьков, Ж. О'Дима // *Тепломассообмен-ММФ-96* : тр. 3-го Мин. междунар. форума по тепломассообмену (20–24 мая 1996 г.). – Минск, 1996. – Т. 8: Тепломассообмен в процессах сушки. – С. 62–68.
9. Microwave Convective Drying of Plant Foods at Constant and Variable Microwave Power / L. M. Ahrne [et al.] // *Drying Technology*. – 2007. – Vol. 25, № 7–8. – P. 1149–1153. <https://doi.org/10.1080/07373930701438436>
10. Amiri, A. Analysis of dispersion effect and non-thermal equilibrium, non-Darcian, variable porosity incompressible flow through porous media / A. Amiri, K. Vafai // *Int. J. Heat Mass Transfer*. – 1994. – Vol. 37, № 6. – P. 939–954. [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(94\)90219-4](https://doi.org/10.1016/0017-9310(94)90219-4)
11. Байков, В. И. Термодинамика и статистическая физика: учеб. пособие / В. И. Байков, Н. В. Павлюкевич. – Минск: Вышэйш. шк., 2018. – 447 с.
12. Горобцова, Н. Е. Метод описания и расчета изотерм сорбции-десорбции, общий для различных материалов / Н. Е. Горобцова // *Тепломассообмен-VI: материалы к VI Всесоюз. конф. по тепломассообмену*. – Минск: ИТМО, 1980. – Т. 7. – С. 60–63.
13. Гришин, М. А. Установки для сушки пищевых продуктов / М. А. Гришин, В. И. Атаназевич, Ю. Г. Семенов. – М.: Агропромиздат, 1989. – 215 с.
14. Франк-Каменецкий, Д. А. Диффузия и теплопередача в химической кинетике / Д. А. Франк-Каменецкий. – М.: Наука, 1987. – 502 с.
15. Sablani, S. Moisture diffusivity in foods – an over view. *Drying Technology in Agriculture and Food Sciences* / S. Sablani, S. Rahman, N. Al-Habsi; ed. A. S. Mujumdar. – Science Publishers, Inc. Enfield (NH), USA. – P. 35–59.
16. Аэров, М. Э. Аппараты со стационарным зернистым слоем / М. Э. Аэров, О. М. Тодес, Д. А. Наринский. – Л.: Химия, 1979. – 176 с.

References

1. Akulich A. V., Akulich P. V., Dinkov K. T., Akulich V. M. Modeling of the heat and mass transfer in vegetable materials during combined microwave convective heating. “*Food Science, Engineering and Technology–2016*”: *Scientific Works of University of Food Technologies Proceedings of the 63rd Scientific Conference with Intern. Participation*, vol. 63, issue 1, pp. 274–282.
2. Wray D., Ramaswamy H. S. Novel concepts in microwave. *Drying Technology*, 2015, vol. 33, issue 7, pp. 769–783. <https://doi.org/10.1080/07373937.2014.985793>
3. Kumar C., Karim M. A. Microwave-convective drying of food materials: A critical review. *Critical Review in Food Science and Nutrition*, 2019, vol. 59, issue 3, pp. 379–394. <https://doi.org/10.1080/10408398.2017.1373269>
4. Akulich P. V., Akulich A. V. *Convective Drying Plants: Calculation Methods and Examples*. Minsk, Vysheyskaya shkola Publ., 2019. 376 p. (in Russian).
5. Akulich P. V., Temruk A. V., Akulich A. V. Modeling and experimental study of heat and moisture transfer during microwave convective drying of plant materials. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2012, vol. 85, no. 5, pp. 1034–1042. <https://doi.org/10.1007/s10891-012-0744-4>
6. Zavaliy A. A., Snezhkin Yu. F. *Development and Thermal Modeling of Infrared Drying Devices for Heat-Sensitive Materials*. Simferopol, IT “ARIAL”, 2016. 264 p. (in Russian).
7. Kalendyan V. A., Boshkova I. L. *Heat and Mass Transfer in Devices with a Dense Layer of Dispersed Material*. Kiev, Publ. House “Slovo”, 2011. 184 p. (in Russian).
8. Rudobashta S. P., Kharkov A. V., O’Dima Zh. Microwave intensification of the drying process of plant materials. *Teplomassoobmen-MMF-96 : trudy 3-go Minskogo mezhdunarodnogo foruma po teplomassobmenu (20–24 maya 1996 g.)*. Tom 8: *Teplomassoobmen v protsessakh sushki* [Heat and Mass Transfer-MMF-96: Proceedings of the 3rd Minsk International Forum on Heat and Mass Transfer (20–24 May 1996). Volume 8: Heat and Mass Transfer in Drying Processes]. Minsk, 1996, pp. 62–68 (in Russian).

9. Ahrne L. M., Pereira N. R., Staack N., Floberg P. Microwave Convective Drying of Plant Foods at Constant and Variable Microwave Power. *Drying Technology*, 2007, vol. 25, no. 7–8, pp. 1149–1153. <https://doi.org/10.1080/07373930701438436>
10. Amiri A., Vafai K. Analysis of dispersion effect and non-thermal equilibrium, non-Darcian, variable porosity incompressible flow through porous media. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1994, vol. 37, no. 6, pp. 939–954. [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(94\)90219-4](https://doi.org/10.1016/0017-9310(94)90219-4)
11. Baykov V. I., Pavlyukevich N. V. *Thermodynamics and Statistical Physics: a Training Manual*. Minsk, Vysheysshaya shkola Publ., 2018. 447 p. (in Russian).
12. Gorobtsova N. E. A method for describing and calculating sorption-desorption isotherms, common to various materials. *Teplomassoobmen-VI: materialy k VI Vsesoyuznoi konferentsii po teplomassoobmenu. Tom 7* [Heat and Mass Transfer-VI: Materials of the VI All-Union Conference on Heat and Mass Transfer. Volume 7]. Minsk, A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute, 1980, pp. 60–63 (in Russian).
13. Grishin M. A., Atanazevich V. I., Semenov Yu. G. *Food Drying Plants*. Moscow, Agropromizdat Publ., 1989. 215 p. (in Russian).
14. Frank-Kamenetsky D. A. *Diffusion and Heat Transfer in Chemical Kinetics*. Moscow, Nauka Publ., 1987. 502 p. (in Russian).
15. Sablani S., Rahman S., Al-Habsi N. Mujumdar A. S., ed. Moisture diffusivity in foods – an over view. *Drying Technology in Agriculture and Food Sciences*. Science Publishers, Inc. Enfield (NH), pp. 35–59.
16. Aerov M. E., Todes O. M., Narinsky D. A. *Devices with a Stationary Granular Layer*. Leningrad, Chemistry Publ., 1979. 176 p. (in Russian).

Информация об авторах

Акулич Петр Васильевич – доктор технических наук, главный научный сотрудник, Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси (ул. П. Бровки, 15, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: akul@hmti.ac.by

Слижук Дмитрий Станиславович – научный сотрудник, Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси (ул. П. Бровки, 15, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: slizhuk@itmo.by

Information about the authors

Piotr V. Akulich – D. Sc. (Engineering), Chief Researcher, A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Science of Belarus (15, Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: akul@hmti.ac.by

Dmitriy S. Slizhuk – Researcher, A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Science of Belarus (15, Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: slizhuk@itmo.by