

КИНЕТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ СУШИЛКИ ПЕРИОДИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ С ПСЕВДООЖИЖЕННЫМ СЛОЕМ

С.П. Рудобашта, Г.А. Зуева, Е.Л. Бабичева

Станислав Павлович Рудобашта (ORCID 0000-0002-3129-8562), Елена Леонидовна Бабичева

Кафедра теплотехники, гидравлики и энергообеспечения предприятий, Российский государственный аграрный университет – МСХА им. К.А. Тимирязева, ул. Тимирязевская, 49, Москва, Российская Федерация, 127434

E-mail: srudobashta@rgau-msha.ru, b-len@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*

Изложен теоретический метод расчета периодически действующей сушилки с псевдоожигенным слоем на основе зонального метода описания кинетики и дан пример расчета применительно к сушке зерна гороха. В расчете принято, что твердая фаза в аппарате полностью перемешана, а газ идеально вытесняется, частицы имеют сферическую форму и одинаковы по размеру. Учет изменения параметров сушильного агента в слое осуществляется на основе уравнений материального и теплового баланса для слоя с разбиением всего диапазона изменения влагосодержания материала на ряд концентрационных зон. Изменение температуры высушиваемых частиц в ходе процесса рассчитывается на основе аналитического решения линейной задачи теплопроводности при постоянной температуре внешней среды и условии, что испарение влаги происходит у поверхности частиц (внутреннее парообразование отсутствует). Расчет ведут методом последовательных приближений. Вначале задают продолжительность сушки материала в рассматриваемой концентрационной зоне, затем определяют средние параметры воздуха по высоте слоя и по времени сушки и, используя эти данные, по решению задачи массопроводности (диффузии влаги) находят продолжительность сушки в рассматриваемой зоне и сверяют ее с предварительно заданной. При значительном расхождении проводят вторую расчетную итерацию, приняв время сушки, найденное в первой расчетной итерации. Расчеты проводят до приемлемого совпадения предварительно принятого и рассчитанного времени сушки. Затем переходят ко второй концентрационной зоне, для которой делают то же самое. Общее время сушки равно сумме времен по концентрационным зонам. Данная методика была апробирована на примере расчета сушки зерна гороха, в расчетах использовали ранее найденные авторами данные по коэффициенту массопроводности (диффузии влаги), а также литературные справочные данные по коэффициентам теплопроводности, температуропроводности и теплоемкости этого материала. Коэффициенты тепло- и массоотдачи рассчитывали по приводимым в литературе критериальным уравнениям. Для выбора рабочей скорости воздуха была рассчитана скорость начала псевдоожигения, рабочую скорость воздуха брали при числе псевдоожигения 1,05. Расчет критериев Био теплового и массообменного, показал, что тепловая задача является смешанной (число Био, теплового равно 5,81), т.е. на процесс теплообмена оказывают влияние как внутренний перенос тепла, так и внешний. Задача же массообмена является чисто внутренней (число Био массообменное модифицированное равно 122,5), что было учтено в расчете времени сушки. Рассчитанная кривая сушки была сопоставлена с экспериментальной. Приведена схема экспериментальной установки и дано описание эксперимента. Удовлетворительное соответствие расчетной и экспериментальной кривых сушки свидетельствует о корректности рассматриваемого метода расчета, который может быть рекомендован для инженерного применения.

Ключевые слова: кинетика сушки, дисперсный материал, псевдоожигенный слой, аппарат периодически действия

KINETICS OF DRYING OF DISPERSED MATERIAL IN THE APPARATUS OF PERIODIC ACTION WITH FLUIDIZED BED

S.P. Rudobashta, G.A. Zueva, E.L. Babicheva

Stanislav P. Rudobashta (ORCID 0000-0002-3129-8562), Elena L. Babicheva

Department of Heat Engineering, Hydraulics and Enterprises Energy Supply, Russian State Agrarian University – MAA after K. A. Timiryazev, Timiryazevskaya st., 49, Moscow, 127434, Russia
E-mail: srudobashta@rgau-msha.ru, b-len@mail.ru

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

Department of Higher and Applied Mathematics, Ivanovo State University of Chemistry and Technology, Shere-metevskiy ave., 7, Ivanovo, 153000, Russia
E-mail: galina@isuct.ru*

A theoretical method for calculating a periodically operating fluidized bed dryer is presented based on the zonal method for describing kinetics and an example of calculation is given in relation to the drying of pea grain. In the calculation, it is assumed that the solid phase in the apparatus is completely mixed, and the gas is ideally displaced, the particles have a spherical shape and are the same in size. Accounting for changes in the parameters of the drying agent in the layer is carried out on the basis of the equations of material and thermal balance for the layer with the division of the entire range of changes in the moisture content of the material into a number of concentration zones. The change in the temperature of the dried particles during the process is calculated based on the analytical solution of the linear heat conduction problem at a constant ambient temperature and the condition that moisture evaporation occurs at the surface of the particles (there is no internal evaporation). The calculation is carried out using the method of successive approximations. First, the duration of drying of the material in the concentration zone under consideration is set, then the average air parameters are determined by the height of the layer and by the drying time, and, using these data, by solving the problem of mass conductivity (moisture diffusion), the drying duration in the zone under consideration is determined and compared with the preset one. If there is a significant discrepancy, a second calculation iteration is carried out, taking the drying time found in the first calculation iteration. Calculations are carried out until an acceptable match between the previously accepted and calculated drying time. Then they move on to the second concentration zone, for which they do the same. The total drying time is equal to the sum of the times in the concentration zones. This technique was tested using the example of calculating the drying of pea grains. In the calculations, we used data previously found by the authors on the coefficient of mass conductivity (moisture diffusion), as well as literary reference data on the coefficients of thermal conductivity, thermal diffusivity and heat capacity of this material. Heat and mass transfer coefficients were calculated using criterion equations given in the literature. To select the operating air speed, the speed of the beginning of fluidization was calculated; the operating air speed was taken at a fluidization number of 1.05. The calculation of the Biothermal and mass transfer criteria showed that the thermal problem is mixed (the Biothermal number is 5.81), i.e. the heat transfer process is influenced by both internal and external heat transfer. The problem of mass transfer is purely internal (the modified mass transfer Bio number is 122.5), which was taken into account when calculating the drying time. The calculated drying curve was compared with the experimental one. A diagram of the experimental setup is given and a description of the experiment is given. Satisfactory agreement between the calculated and experimental drying curves indicates the correctness of the calculation method under consideration, which can be recommended for engineering use.

Keywords: drying kinetics, dispersed material, fluidized bed, apparatus of periodic action

Для цитирования:

Рудобашта С.П., Зуева Г.А., Бабичева Е.Л. Кинетический расчет сушилки периодического действия с псевдооживленным слоем. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2024. Т. 67. Вып. 6. С. 109–118. DOI: 10.6060/ivkkt.20246706.6968.

For citation:

Rudobashta S.P., Zueva G.A., Babicheva E.L. 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. DOI: 10.6060/ivkkt.20246706.6968.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время широкое распространение получили сушилки с псевдооживленным слоем (ПС), которые обладают рядом достоинств: выравнивание условий сушки по рабочему объему аппаратов, высокая интенсивность процесса, легкость загрузки и выгрузки материала. При проектировании сушилок, в том числе сушилок с ПС, важнейшей его составной частью является кинетический расчет, целью которого является определение рабочего объема аппарата, обеспечивающего заданную производительность. Анализ и расчет кинетики химико-технологических процессов является важнейшей частью химической технологии [1]. Все методы кинетического расчета сушилок можно разбить на три группы: теоретические, полуэмпирические, эмпирические (регрессионные), обзор которых дан в [2]. Теоретические методы основаны на решениях дифференциальных уравнений тепло- и массопроводности, записываемых для частиц высушиваемого материала. В литературе приводятся конструкции и методы кинетического расчета в основном сушилок непрерывного действия [3-7], в то же время при производстве малотоннажных продуктов применяются аппараты периодического действия, методы кинетического расчета которых на основе теоретического подхода отсутствуют.

В инженерной практике, как правило, применяют полуэмпирические методы кинетического расчета сушилок, которые базируются на фундаментальных уравнениях тепло- и массопереноса, но в которых используются те или иные упрощения. В настоящее время, однако, имеются все возможности для расчета кинетики сушки дисперсных материалов, имеющих правильную геометрическую форму частиц на основе теоретических методов. Отличительной особенностью этих методов является то, что они не требуют предварительного (перед расчетом сушилки) проведения экспериментального исследования процесса в лабораторных условиях, т.к. в расчете используются только справочные данные по теплофизическим характеристикам материалов.

Вопросы математического моделирования процессов сушки на основе теоретических моделей рассмотрены в [8, 9]. В настоящее время накоплен определенный банк данных по основному коэффи-

циенту внутреннего массопереноса – коэффициенту массопроводности (диффузии влаги), необходимому для реализации теоретического метода расчета. По диффузионным свойствам полимеров эти данные приведены в [9], по зерновым культурам – в [10, 11], по семенам овощных культур – в [12], по семенам подсолнечника – в [13]. Для расчета кинетики по теоретическим моделям сушки необходимы также данные по концентрационному равновесию. Они также носят разрозненный характер и получены, главным образом, при комнатной температуре, тогда как для расчета кинетики сушки нужны данные по равновесию при повышенных температурах. В последнее время они пополнились новыми результатами – как раз при повышенных температурах [14, 15, 17].

Целью работы являлось создание метода кинетического расчета сушилки с ПС периодического действия на основе теоретической модели.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве экспериментального материала для проверки математической модели использовали зерно гороха сорта «Слован» – материала, имеющего правильную геометрическую форму (сфера), для которого имеются данные по коэффициентам массопроводности (диффузии влаги) [16] и фазовому концентрационному равновесию равновесию [17], необходимым для расчета по теоретической модели. Разработанная математическая модель согласно терминологии системного анализа [18] содержит два иерархических уровня: на нижнем уровне описывается кинетика сушки единичной частицы – зональным методом, с учетом изменения коэффициента массопроводности и равновесного влагосодержания в ходе процесса, на верхнем уровне рассматривается изменение во времени и по высоте слоя температуры и влажности сушильного агента на основе уравнений материального и теплового баланса аппарата – с целью учета их влияния на кинетику процесса.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КИНЕТИКИ СУШКИ

При формулировке математической модели принято: 1) все частицы дисперсного материала имеют сферическую форму и одинаковый диаметр; 2) частицы полностью перемешаны по объему слоя; 3) газовая фаза идеально вытесняется

(последнее подтверждается экспериментальными данными различных авторов, приведенными в [5]); 4) перенос влаги в частице осуществляется путем массопроводности; 5) усадка материала отсутствует. Расчет кинетики сушки осуществляется зональным методом с разбиением всего диапазона влагосодержаний материала на ряд (m) концентрационных зон.

Выразим продолжительность сушки единичной частицы в i -той концентрационной зоне на основе аналитического решения задачи массопроводности, полученного при условии постоянства параметров внешней фазы. Для регулярного режима массообмена (в решении сохраняется один член ряда) имеем [5]

$$\tau_i = \frac{R^2}{\mu_{m,i}^2 k_i} \ln \frac{B_i^*}{E_i}, \quad (1)$$

где $\mu_{m,i}$ – первый положительный корень характеристического уравнения решения задачи, который для сферы определяется уравнением

$$\operatorname{tg} \mu_m = \frac{\mu_m}{1 - Bi_m}. \quad (2)$$

Коэффициент B_i^* для первой концентрационной зоны представляет собой первый предэкспоненциальный множитель в решении задачи массопроводности, которое предполагает равномерное начальное влагосодержание, для сферического тела он равен [5]: $B_1 \frac{6Bi_m^2}{\mu_m^2 (Bi_m^2 + \mu_m^2 - Bi_m)}$. Во второй и последующих зонах это распределение уже не является равномерным, а является таким, которое сформировалось в конце первой концентрационной зоны. Наши многочисленные расчеты показывают, что для любой концентрационной зоны можно принять $B_i^* = 1$. С физической точки зрения принятие $B_i^* = 1$ для первой концентрационной зоны можно объяснить тем, что фактическое начальное распределение концентраций в частице в момент начала процесса является не равномерным, а в ней до начала процесса массообмена уже сформировался определенный концентрационный профиль. Следствием этого является то, что интервалы влагосодержаний в зонах можно принимать произвольными, а не в соответствии с наступлением регулярного режима [5].

Для расчета времени сушки τ_i по уравнению (1) необходимо знать средние по объему слоя температуру сушильного агента и концентрацию пара в нем (они нужны для определения равновесного влагосодержания $u_{p,i}$). Найдем сначала средние за время τ_i значения параметров сушильного агента на выходе из сушилки:

$$\bar{d}_{k,i} = d_n + \frac{M_{вл,i}}{L\tau_i}, \quad (3)$$

где $M_{вл,i} = G_0(\bar{u}_{n,i} - \bar{u}_{k,i})$ – количество влаги, испаряемой в i -той концентрационной зоне, кг.

Средняя энтальпия воздуха на выходе из сушилки в i -той концентрационной зоне $\bar{H}_{k,i}$:

$$\bar{H}_{k,i} = H_n + \Delta_i(\bar{d}_{k,i} - d_n) \quad (4)$$

где Δ_i – угловой коэффициент сушки для i -той зоны, равный [19]

$$\Delta_i = c_w t_{m,i} - (q_{m,i} + q_{nom,i}). \quad (5)$$

Здесь: $q_{m,i} = G_{k,i}c(\bar{t}_{k,i} - \bar{t}_{n,i})/M_{вл,i}$ – затраты теплоты на нагрев материала (в расчете на 1 кг испаряемой влаги), кДж/кг.

Температуру $\bar{t}_{k,i}$ рассчитываем по аналитическому решению задачи нагрева сферической частицы, полученному для условий постоянства параметров сушильного агента в зоне и при условии, что испарение влаги происходит у поверхности частицы [5]:

$$\bar{\theta} = \frac{\bar{t}(\tau) - \bar{t}_{в,сл}}{t_n - \bar{t}_{в,сл}} = \sum_{n=1}^{\infty} B_n [\exp(-\mu_n^2 Fo) + \frac{R_V}{R} \operatorname{Co} \operatorname{Lu} \frac{\mu_n^2}{Bi} \times \sum_{m=1}^{\infty} B_m \frac{\mu_m^2}{\mu_n^2 - \operatorname{Lu} \mu_m^2} [\exp(-\mu_m^2 Fo) \operatorname{Lu} - \exp(-\mu_n^2 Fo)]], \quad (6)$$

где $\bar{t}(\tau)$ – средняя по объему частицы температура в момент времени τ от начала процесса, °С; $\bar{t}_{в,сл}$ – средняя по объему слоя температура воздуха, °С; t_n – температура материала в сушилке в момент начала процесса сушки (принимается равной температуре воздуха в помещении), °С; $R_V = R/3$ – отношение объема сферической частицы к ее поверхности, м; Co – критерий Коссовича, который А.В. Лыков определяет как отношение затрат теплоты на испарение влаги $q_{исп}$ к затратам теплоты на нагрев материала $q_{наг}$ [20]:

$$\operatorname{Co} = \frac{q_{исп}}{q_{наг}} = \frac{r(\bar{u}_n - u_p)}{c_m \cdot \Delta t_m},$$

где $\Delta t_m = c_m(t_v - t_{m,n})$.

Отметим, что бесконечные ряды в решении (6) являются быстросходящимися, и для обеспечения необходимой точности расчета достаточно нескольких членов ряда [21]. Шесть первых корней характеристического уравнения решения задачи теплопроводности, зависящие от числа Bi , табулированы в [21], что также упрощает расчет, а аналогичные корни задачи массопроводности могут быть определены по той же таблице в [21] с заменой числа Bi на число Bi_m .

Уравнение (6) получено для условий постоянства температуры сушильного агента t_v , в рассматриваемой сушилке она изменяется от значения $t_{в,н}$ на входе в сушилку до значения $\bar{t}_{в,к,i}$ на выходе из сушилки, которое переменное в ходе сушки. При задании числа Co примем среднюю температуру

воздуха в сушилке равной: $t_b = (t_{в.н} + \bar{t}_{в.к. i})/2$, которую будем корректировать по зонам (в сушилке имеют место потери теплоты в окружающую среду через корпус сушилки, что приводит к снижению величины $\bar{t}_{в.к. i}$). Для учета влияния теплотерь на критерий Коссовича в выражение для Δt_m введем поправку $\Delta t_{в.пот}$ и представим Δt_m в виде:

$$\Delta t_m = c_m(t_b - \Delta t_{в.пот} - t_{м.н}).$$

Примем предварительно в расчете $\Delta t_{в.пот} = 5 \text{ }^\circ\text{C}$ (затем в ходе расчета эта величина будет уточняться на основе теплового баланса аппарата).

Коэффициенты B_n и μ_n в уравнении (6) для сферического тела [5]:

$$B_n = \frac{6Bi^2}{\mu_n^2(Bi^2 + \mu_n^2 - Bi)}, \quad (7)$$

$$\text{tg}\mu_n = \frac{\mu_n}{(1-Bi)}. \quad (8)$$

По аналогичным уравнениям определяют и массообменные коэффициенты и μ_n – в зависимости от числа Bi_m модифицированного [5].

Средние значения влагосодержания и температуры воздуха в слое для i -той концентрационной зоны находят как среднелогарифмические значения

$$\bar{d}_{в.сл.i} = \frac{\bar{d}_{к.i} - d_n}{\ln \frac{\bar{d}_{к.i}}{d_n}}, \quad (9)$$

$$\bar{t}_{в.сл.i} = \frac{t_{в.н} - \bar{t}_{в.к. i}}{\ln \frac{t_{в.н}}{\bar{t}_{в.к. i}}}. \quad (10)$$

По величинам $\bar{d}_{сл.i}$ и $\bar{t}_{в.сл.i}$ рассчитывают относительную влажность воздуха в слое, используя формулу [19]

$$\bar{\varphi}_{сл.i} = \frac{p \bar{d}_{сл.i}}{p_{нас}(0,622 + \bar{d}_{сл.i})}, \quad (11)$$

где p – общее давление влажного воздуха в слое, Па; $p_{нас}$ – давление насыщенного пара при температуре $\bar{t}_{в.сл.i}$, Па, и далее определяют равновесное влагосодержание частицы $u_{р.i}$ в i -той концентрационной зоне. После этого рассчитывают τ_i по уравнению (1).

Расчет по приведенным выше уравнениям ведут методом последовательных приближений: сначала для каждой зоны задают ориентировочно время τ_i , затем по этому времени по уравнению (3) находят $\bar{d}_{к.i}$ и, используя последующие формулы, определяют параметры воздуха в слое и равновесное влагосодержание $u_{р.i}$, после чего по уравнению (1) рассчитывают время τ_i , которое сопоставляют с предварительно принятым. В случае значительного расхождения берут расчетное значение τ_i и повторяют расчет. Расчеты ведут до приемлемого соответствия значений τ_i на текущем и предыдущем шаге вычислений.

ПРИМЕР РАСЧЕТА КИНЕТИКИ СУШКИ

В качестве примера расчета кинетики сушки частиц в аппарате периодического действия с ПС рассмотрим процесс сушки зерна гороха сорта «Слован», для которого экспериментально было найдено: $d_3 = 2R = 15,0$ мм, плотность зерен $\rho_T = 1280$ кг/м³. Данные по коэффициенту массопроводности при сушке зерен гороха приведены в [16], а фазовому концентрационному равновесию – в [17]. Согласно [16] коэффициент массопроводности (диффузии влаги) при сушке гороха существенно зависит от влагосодержания материала, что соответствует данным других работ для коллоидных капиллярно-пористых материалов растительного происхождения [10, 13], и требует учета этой зависимости при расчете кинетики сушки. Расчет выполняли для температуры воздуха на входе в слой $t_{в.н} = 50 \text{ }^\circ\text{C}$, для этой температуры при указанном выше диаметре зерна гороха по формуле О.М. Тодеса [22]

$$Re_{кр} = \frac{Ag}{1400 + 5,22\sqrt{Ag}} \quad (12)$$

было найдено: $Re_{кр} = 1979$; следовательно, скорость начала псевдооживления составляет $v_{кр} = 2,45$ м/с, где $Ag = \frac{g(2R)^3}{v_{в.сл}^2} \frac{\rho_3 - \rho_{в.сл}}{\rho_{в.сл}}$; $Re_{кр} = \frac{v_{кр}(2R)}{v_{в.сл}}$; $g = 9,81$ м/с² – ускорение свободного падения.

В расчете было принято число псевдооживления $K = 1,05$, которому соответствует рабочая скорость воздуха $v_n = 2,57$ м/с.

По этой скорости были рассчитаны значения коэффициентов теплоотдачи α , Вт/(м²К) – по уравнению [23]

$$Nu = 0,4 (Re/\varepsilon)^{0,67} Pr^{0,33}, \quad Re/\varepsilon > 200. \quad (13)$$

Необходимая для расчета числа Nu по уравнению (13) порозность псевдооживленного слоя ε была определена по уравнению [23]

$$\varepsilon = \left(\frac{18Re + 0,36Re^2}{Ag} \right)^{0,21}, \quad (14)$$

где $Re = 2075$ – значение числа Рейнольдса при рабочей скорости воздуха. Было найдено $\varepsilon = 0,41$.

По уравнению (13) было определено: $Nu = 108,3$; $\alpha = 201,4$ Вт/(м²К). Далее вычислили число Био: $Bi = \alpha R / \lambda = 201,4 \cdot 7,5 \cdot 10^{-3} / 0,26 = 5,81$, где $\lambda = 0,26$ Вт/(м К) – коэффициент теплопроводности гороха [17]. Полученное значение числа Bi свидетельствует о том, что задача теплообмена является смешанной. Для нее числа B_n определяются выражением (7).

Коэффициент массоотдачи β_c , необходимый для расчета параметров B_m и μ_m , рассчитывали по уравнению [23]

$$Nu_m = 1,0(Re/\varepsilon)^{0,5} Pr_m^{1/3}. \quad (15)$$

Было получено $\beta_c = 0,116$ м/с. Далее нашли число Bi_m , необходимое для нахождения параметров B_m и μ_m . Согласно [5] число Bi_m определяется выражением $Bi_m = (\beta_c R)/(k\rho_0 A_p)$, коэффициент распределения A_p в котором равен: $A_p = u_p/C_c$, где u_p – равновесное влагосодержание высушиваемого материала, кг/(кг сух. м-ла); C_c – концентрация пара во внешней фазе, кг/м³. Результаты расчета кинетики сушки сопоставлялись с экспериментом. Поэтому найдем концентрацию пара в воздухе на входе в слой в помещении, где стояла сушилка, на которой проводился эксперимент. Экспериментально измеренные параметры воздуха в помещении были следующие: $t_{пом} = 19,8$ °С и $\varphi_{пом} = 15\%$. Найдем влагосодержание воздуха в помещении, используя известную формулу [19]

$$d_0 = 0,622 \frac{\varphi p_{нас.пом}}{p - \varphi p_{нас.пом}} = 0,622 \frac{0,15 \cdot 0,0228 \cdot 10^5}{0,98 \cdot 10^5 - 0,15 \cdot 0,0228 \cdot 10^5} = 0,0022 \text{ кг/(кг сух. в-ха)},$$

где $p = 0,98 \cdot 10^5$ Па – атмосферное давление; $p_{нас} = 0,0228 \cdot 10^5$ Па – давление насыщенного пара при температуре $t_{пом} = 19,8$ °С.

При нагреве атмосферного воздуха перед подачей его в слой до температуры 50 °С его влагосодержание не изменяется: $d_n = d_0 = 0,0022$ кг/(кг сух. в-ха), при этом относительная влажность становится равной

$$\varphi_n = \frac{d_n \cdot p}{p_{нас}(d_n + 0,622)} = \frac{0,0022 \cdot 0,98 \cdot 10^5}{0,1233 \cdot 10^5 (0,0022 + 0,622)} = 0,028 = 2,8\%,$$

где $p_{нас} = 0,1233 \cdot 10^5$ Па – давление насыщенного пара при температуре 50 °С.

Следовательно, концентрация пара в воздухе на входе в слой

$$C_{с.н} = \frac{p \cdot d_n}{R_{в.н} T_n (0,622 + d_n)} = \frac{0,98 \cdot 10^5 \cdot 0,0022}{462 \cdot 323 (0,622 + 0,0022)} = 0,00231 \text{ кг/м}^3.$$

Найдем равновесное влагосодержание зерна гороха при относительной влажности воздуха 2,8% и температуре 50 °С по собственным экспериментальным данным, аппроксимированным уравнением Гендерсона [17]

$$u_p = \left(-\frac{a}{T} \ln(1 - \varphi) \right)^b, \quad \varphi < 1, \quad (16)$$

где u_p – равновесное влагосодержание гороха, кг/(кг сух. м-ла); T – температура, К; φ – относи-

тельная влажность воздуха, доли; a, b – коэффициенты уравнения, равные: $a = 6,740, b = 0,554$.

По уравнению (16) найдено: $u_p = 1,6 \cdot 10^{-2}$ кг/(кг сух. м-ла). Следовательно, коэффициент распределения A_p функции фазового концентрационного равновесия при $t_{в.н} = 50^\circ$ и $\varphi_n = 2,8\%$ равен: $A_p = u_p/C_c = u_p/C_{с.н} = 1,6 \cdot 10^{-2}/0,00231 = 6,93$ (кг/(кг сух. м-ла))/(кг/м³), а число Bi_m равно

$$Bi_m = \frac{\beta_c R}{k\rho_0 A_p} = \frac{0,116 \cdot 7,5 \cdot 10^{-3}}{8 \cdot 10^{-10} \cdot 1280 \cdot 6,93}$$

где $k = 8 \cdot 10^{-10}$ м²/с – коэффициент массопроводности зерна гороха при температуре $t_{в.н} = 50^\circ$ [16]. Полученное значение числа Bi_m свидетельствует о том, что задача массообмена является чисто внутренней и коэффициент μ_m в решении задачи массопроводности (1) для сферической частицы для всех зон следует принять равным: $\mu_i = \pi$.

Расчет кинетики сушки в рассматриваемом примере проводили зональным методом по изложенной выше методике, при этом время τ_i определяли по уравнению (1). Коэффициент массопроводности согласно [16] трактовали как коэффициент диффузии $k \equiv D$ и его температурную зависимость описывали на основе уравнения Аррениуса

$$D = D_\infty \exp\left(-\frac{E_D}{RT}\right). \quad (17)$$

В [5] показано, что расчет зональным методом дает более точные результаты, если значения коэффициента массопроводности в зонах брать не через средние значения влагосодержания материала в зонах, а через их конечные значения, что и было сделано в данном расчете. Для D_e и E_D в [16] найдено: $D_e = 6,45 \cdot 10^{-6} \exp(7,46u)$; $E_D = 28,5 \cdot 10^3$ Дж/моль при $t = 40-70$ °С; $R^* = 8,314$ Дж/(моль К) – универсальная газовая постоянная. Эти значения использовали в расчете.

Для построения расчетной кривой сушки рассматривали интервал влагосодержаний гороха $(\bar{u}_n - \bar{u}_к) = 23,4 - 11$ %, который разбивали на 4 зоны – как это показано в табл. 1. Для получения приемлемого соответствия значений τ_i делали 3-4 расчетных итерации (совпадение значений τ_i и τ_{i-1} считали приемлемым, если относительная погрешность $(\tau_i - \tau_{i-1})/\tau_i$ была менее 5%). Результаты расчетов занесены в таблице. Как видно из таблицы, воздух в слое довольно быстро прогревается, его средняя температура в зонах отличается от входной температуры максимум на 1,3 °С, увеличение времени сушки по зонам вызвано уменьшением коэффициента массопроводности.

Расчет кривой сушки зерна гороха в аппарате с ПС периодического действия
 Table. Calculation of the drying curve of pea grain in apparatus with a fluidized bed of periodic action

№ концентр. зоны	$(\bar{u}_{n,i} - \bar{u}_{к,i}), \%$	$\bar{\varphi}_{сл,i}, \%$	$\bar{t}_{в,сл,i}, \text{ }^\circ\text{C}$	$u_{р,i}, \%$	\bar{E}_i	$k_i \cdot 10^{11}, \text{ м}^2/\text{с}$	$\tau_i, \text{ с}$
1	23,4-20	3,5	48,7	1,81	0,84	66,81	1488
2	20-16	2,8	49,8	1,63	0,78	51,55	2759
3	16-13	2,8	49,9	1,62	0,78	41,35	3439
4	13-11	2,8	49,9	1,62	0,78	35,68	3985

Для проверки адекватности математической модели расчетная кривая сушки была сопоставлена с экспериментальной кривой сушки. На рис. 1 показана схема экспериментальной установки, на которой снималась кривая сушки зерна гороха в псевдооживленном слое. Она содержала две цилиндрические камеры (2 и 5 на рис. 1), представлявшие собой стеклянные царги внутренним диаметром $D_{ан} = 150$ мм. В камере 5, заполненной стеклянными шариками, нагревался воздух с помощью горячей воды, протекающей по змеевику, – в режиме псевдооживления шариков, а в камере 2 осуществлялась сушка зерна гороха в псевдооживленном слое. Горячая вода, подаваемая в змеевик камеры 5, нагревалась в водяном термостате (на схеме не показан), при этом стеклянные шарики выполняли роль промежуточного теплоносителя, обеспечивая равномерный по сечению камеры нагрев воздушного потока. Изменение температуры нагрева воздуха осуществлялось путем регулирования температуры и расхода горячей воды, подаваемой из термостата.

Высота слоя гороха в неподвижном состоянии составляла 190 мм. Расход воздуха регулировали изменением частоты вращения ротора электродвигателя газодувки с помощью преобразователя частоты 9. Измеряли расход воздуха и его температуру на входе в слой, которую устанавливали равной $50 \text{ }^\circ\text{C}$. По измеренному расходу воздуха рассчитывали его рабочую (фиктивную) скорость v на входе в слой.

Объемный расход воздуха определяли по перепаду давления Δp на измерительной оттарированной диафрагме 10. Значения перепада давления на диафрагме переводились в расход воздуха ($\text{м}^3/\text{ч}$) по уравнению

$$V_0 = 2,8\sqrt{\Delta p_n}, \quad (18)$$

где 2,8 – коэффициент учитывающий геометрические характеристики диафрагмы; Δp_n – перепад давления на диафрагме, Па.

Расход воздуха, измеренный на диафрагме при комнатной температуре $19,8 \text{ }^\circ\text{C}$, далее пересчитывали на расход воздуха на входе в сушилку по соотношению

$$V_H = V_0 \frac{T_H}{T_0}, \quad (19)$$

где $T_H 273 + 50 = 323 \text{ К}$; $T_0 - 273 + 19,8 = 292,8 \text{ К}$.

Далее находили скорость воздуха на входе в сушилку

$$v_H = \frac{4V_H}{3600 \cdot \pi \cdot D_{ан}^2}. \quad (20)$$

Расход воздуха через сушилку устанавливали такой, чтобы он соответствовал принятой в расчете скорости воздуха $v_H = 2,57 \text{ м/с}$.

В ходе эксперимента через интервалы времени 15 мин через верхнюю открытую часть сушилки отбирали пробы материала массой ≈ 10 г и помещали их в заранее пронумерованные бюксы с притертыми крышками для последующего анализа на влагосодержание. Влагосодержание отобранных образцов гороха определяли весовым методом по ГОСТ 28561 – 98 С.6 путем досушивания их в сушильном шкафу модели ШС-80-01 СПУ с естественной вентиляцией в течение 7 час при температуре $98 \text{ }^\circ\text{C}$. Влагосодержание образцов рассчитывали по выражению

$$u = \frac{m_1 - m_2}{m_2 - m_6}, \quad (21)$$

где m_1 – масса образца зерен гороха с бюксом до полного высушивания, г; m_2 – масса образца зерен гороха с бюксом после полного высушивания, г; m_6 – масса бюкса, г.

Массу образцов определяли путем их взвешивания на лабораторных весах марки «Scale Cas MWP-300» электронного типа (погрешность весов составляет не более 0,01 г до взвешиваемой массы в 50 г).

На рис. 2 дано сопоставление расчетной и опытной кривых сушки. Как видно из рисунка, представленная математическая модель удовлетворительно описывает кинетику сушки дисперсного материала (в данном случае гороха) в аппарате периодического действия с ПС, что позволяет рекомендовать ее для использования в инженерных расчетах.

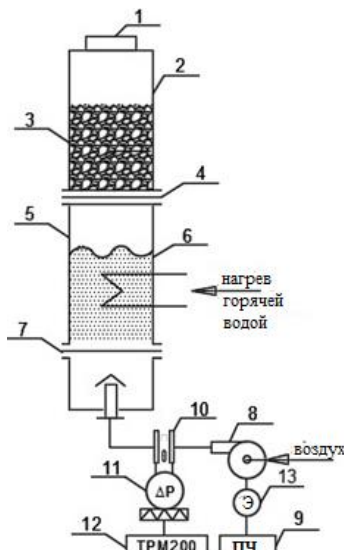


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – выход воздуха из сушилки; 2 – камера для сушки зерна гороха; 3 – горох; 4, 7 – газораспределительные решетки; 5 – камера для нагрева воздуха; 6 – стеклянные шарики; 8 – газодувка; 9 – преобразователь частоты; 10 – измерительная диафрагма; 11 – датчик давления; 12 – вторичное устройство; 13 – электродвигатель
 Fig. 1. Scheme of laboratory installation: 1 – air temperature meter; 2 – glass drying chamber; 3 – corn; 4, 7 – gas distribution grids; 5 – air heating chamber; 6 – glass balls; 8 – gas blower; 9 – frequency converter; 10 – measuring diaphragm; 11 – pressure transmitter; 12 – secondary device; 13 – motor

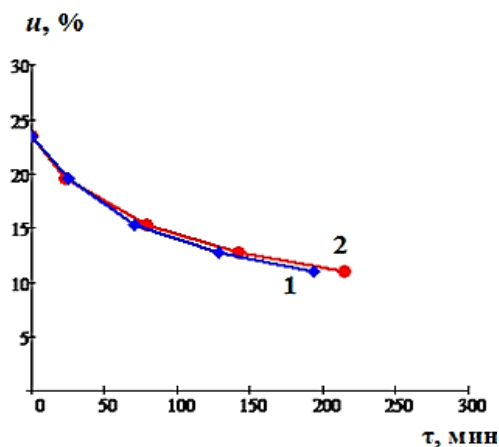


Рис. 2. Сопоставление расчетной (1) и экспериментальной (2) кривых сушки
 Fig. 2. Comparison of calculated (1) and experimental (2) drying curves

Развитая в работе математическая модель кинетики сушки дисперсного материала в аппарате с ПС базируется на использовании зонального метода расчета кинетики процесса, основанного на аналитическом решении линейного дифференциального уравнения массопроводности (диффузии влаги) в узком диапазоне изменения влагосодержания материала. Такой подход в настоящее время востребован специалистами, о чем может свиде-

тельствовать работа [24], в которой близкий по физической сущности метод именуется «методом микропроцессов». Отметим также работу [25], в которой анализируются дискретные подходы для моделирования основных процессов химической технологии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана математическая модель, описывающая кинетику сушки дисперсного материала в аппарате периодического действия с псевдооживленным слоем.

Указанная модель позволяет рассчитать кинетику сушки, используя только справочные данные по теплофизическим характеристикам материала, без предварительного исследования процесса в лабораторных условиях.

ОБОЗНАЧЕНИЯ

$A_p = u_p/C_c$ – коэффициент распределения функции концентрационного фазового равновесия, (кг/(кг сухого материала))/(кг/м³);

a – коэффициент температуропроводности материала, м²/с;

c – массовая теплоемкость, Дж/(кг К);

d – влагосодержание воздуха, кг/(кг сух. в-ха);

G_0 – масса абсолютно сухого материала в аппарате, кг;

H – энтальпия воздуха, кДж/(кг сух. в-ха);

k – коэффициент массопроводности, м²/с;

L – расход сушильного агента через сушилку, кг/с;

M – масса, кг;

p – общее давление воздуха, Па;

$p_{нас}$ – давление насыщенного пара, Па;

R – радиус сферы (зерна гороха), м;

$R_{в.п} = 462$ Дж/(кг К) – газовая постоянная водяного пара;

r^* – теплота парообразования, кДж/кг;

t, \bar{t} – локальная и средняя по объему зерна температура, соответственно °С;

T – температура, К;

u, \bar{u} – локальное и среднее по объему зерна влагосодержание материала, (кг влаги)/(кг сух. м-ла);

V – объемный расход воздуха, м³/с;

v – скорость воздуха, м/с;

α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м² К);

β_c – коэффициент массоотдачи, отнесенный к разности концентраций пара в сушильном агенте, м/с;

ϕ – относительная влажность воздуха, доли;

Δ – угловой коэффициент сушки, кДж/(кг влаги);

ε – порозность слоя, м³/м³;

ν – кинематическая вязкость, м²/с;

ρ_3 – плотность зерна материала, кг/м³;

τ – время, с;

$Bi = \alpha R / \lambda$ – число Био тепловое;

$Bi_m = (\beta_c R) / (k \rho_0 A_{p,n})$ – число Био массообменное;

$\bar{E}_i = \frac{\bar{u}_{к,i} - u_{р,i}}{u_{н,i} - u_{р,i}}$ – относительное среднеобъемное

влагосодержание частицы в i -той концентрационной зоне;

$Fo = \alpha \tau / R^2$ – число Фурье;

$Lu = k/a$ – число Лыкова;

Индексы: ап – сушильный аппарат; в – воздух; вл – влага; в.п – водяной пар; д – диафрагма; з –

зерно; к – конечный; кр – критический; н – начальный; нас – насыщенный; пом – помещение; пот – потери; р – равновесный; с – сушильный агент; сл – слой; i – номер концентрационной зоны; m – массообменный; w – вода; 0 – сухой материал.

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

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

ЛИТЕРАТУРА

1. **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.
2. **Рудобашта С.П.** Кинетический расчет процесса конвективной сушки дисперсных материалов. Сб. тр. IV Минского междунар. форума Теплообмен ММФ-2000. Т. 9. Теплообмен в процессах сушки. Минск. 2000. С. 41-48.
3. **Атаназевич В.Н.** Сушка пищевых продуктов. Справочное пособие. М.: ДеЛи. 2000. 295 с.
4. **Ворошилов А.П., Муштаев В.И.** Аппараты с устойчивыми виброоживленными слоями. Сумы: Изд-во «Корпункт». 2002. 189 с.
5. **Рудобашта С.П.** Массоперенос в системах с твердой фазой. М.: Химия. 1980. 248 с.
6. **Сажин Б.С., Коселева М.К., Сажина М.Б.** Процессы сушки и промывки текстильных материалов. М.: РГУ им. А.Н. Косыгина. 2013. 301 с.
7. **Акулич П.В., Акулич А.В.** Конвективные сушильные установки: методы и примеры расчета. Минск: Вышэйшая шк. 2019. 376 с.
8. **Рудобашта С.П., Карташов Э.М.** Химическая технология: диффузионные процессы. Ч. 1. М.: Юрайт. 2018. 282 с.
9. **Рудобашта С.П., Карташов Э.М.** Химическая технология: диффузионные процессы. Ч. 2. М.: Юрайт. 2018. 296 с.
10. **Рудобашта С.П., Зуева Г.А., Дмитриев В.М., Зув Н.А.** Массопроводность при сушке коллоидных капиллярно-пористых материалов. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2014. Т. 57. Вып. 1. С. 103-107.
11. **Рудобашта С.П., Зуева Г.А., Муравлева Е.А., Дмитриев В.М.** Массопроводность капиллярно-пористых коллоидных материалов при их конвективной сушке. *Инж.-физ. журн.* 2018. Т. 91. № 4. С. 903-911. DOI: 10.1007/s10891-018-1808-x.
12. **Rudobashta S, Zueva G.** Drying of seeds through oscillatin infrared heating. *Drying Technol.* 2016. V. 34. N 5. P. 505-515. DOI: 10.1080/07373937.2015.1060997.
13. **Рудобашта С.П., Зуева Г.А., Дмитриев В.М., Кочетков В.Н.** Массопроводность при сушке ядер и оболочек семян подсолнечника. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2021. Т. 64. Вып. 5. С. 80-87. DOI: 10.6060/ivkkt.20216405.6337.
14. **Рудобашта С.П., Кутейников В.И., Зуева Г.А.** Фазовое концентрационное равновесие семян подсолнечника. *Росс. хим. журн.* 2021. Т. 63. № 3-4. С. 75-79. DOI: 10.6060/rcj.2019633.10.
15. **Рудобашта С.П., Зуева Г.А., Столбова А.С.** Концентрационное равновесие при сушке коллоидных капиллярно-пористых растительных материалов. *Изв. вузов. Химия и*

REFERENCES

1. **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: 10.6060/ivkkt.20226507.6635.
2. **Rudobashta S.P.** Kinetic calculation of the process of convective drying of dispersed materials. Proceedings of IV Minsk International Heat and Mass Transfer Forum MMF-2000. Minsk 2000. P. 41-48 (in Russian).
3. **Atanazevich V.N.** Drying food products. Reference manual. M.: DeLi. 2000. 295 p. (in Russian).
4. **Voroshilov A.P., Mushtaev V.I.** Devices with stable vibration-fluidized layers. Sumy: Izd. «Korpunkt». 2002. 189 p. (in Russian).
5. **Rudobashta S.P.** Mass transfer in systems with a solid phase. M.: Khimiya. 1980. 248 p. (in Russian).
6. **Sazhin B.S., Kosheleva M.K., Sazhina M.B.** Processes for drying and washing textile materials. M.: RGU named by A.N. Kosygin. 2013. 301 p. (in Russian).
7. **Akulich P.V., Akulich A.V.** Convective dryers: methods and examples of calculation. Minsk: Vysheyshaya shk. 2019. 376 p. (in Russian).
8. **Rudobashta S.P., Kartashov E.M.** Chemical technology: diffusion processes. Pt. 1. M.: Urait. 2018. 282 p. (in Russian).
9. **Rudobashta S.P., Kartashov E.M.** Chemical technology: diffusion processes. Pt. 2. M.: Urait. 2018. 296 p. (in Russian).
10. **Rudobashta S.P., Zueva G.A., Dmitriev V.M., Zuev N.A.** Mass conductivity during colloidal capillary-porous materials drying. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2014. V. 57. N 1. P. 103-107 (in Russian).
11. **Rudobashta S.P., Muravleva E.A., Zueva G.A., Dmitriev V.M.** Mass conductivity of capillary-porous colloidal materials subjected to convective drying. *Inzh.-Fiz. Zhurn.* 2018. V. 91.N 4. P. 845-853 (in Russian). DOI: 10.1007/s10891-018-1808-x.
12. **Rudobashta S, Zueva G.** Drying of seeds through oscillatin infrared heating. *Drying Technol.* 2016. V. 34. N 5. P. 505-515. DOI: 10.1080/07373937.2015.1060997.
13. **Rudobashta S.P., Zueva G.A., Dmitriev V.M., Kochetkov V.N.** Mass conductivity during drying of kernels and shells of sunflower seeds. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2021. V. 64. N 5. P. 80-86 (in Russian). DOI: 10.6060/ivkkt.20216405.6337.
14. **Rudobashta S.P., Kuteinikov V.I., Zueva G.A.** Phase concentration equilibrium of seeds the sunflower. *Ross. Khim. Zhurn.* 2021. V. 63. N 3-4. P. 75-79 (in Russian). DOI: 10.6060/rcj.2019633.10.
15. **Rudobashta S.P., Zueva G.A., Stolbova A.S.** Concentration equilibrium when drying colloidal capillary porous material (carrot). *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved.*

- хим. технология.* 2022. Т. 65. Вып. 6. С. 75-80. DOI: 10.6060/ivkkt.20226506.6567.
16. **Rudobashta S.P., Babicheva E.L., Dmitriev V.M.** Study of the Mass Conductivity Coefficient during Convective Drying of Pea. *Conf. Paper: AIP Conf. Proc.* 2022. 2661(1). 050001. DOI: 10.1063/5.0108355.
 17. **Рудобашта С.П., Бабичева Е.Л., Зуева Г.А.** Фазовое концентрационное равновесие при сушке коллоидного капиллярно-пористого материала – гороха. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2024. Т. 67. Вып. 2. С. 104-110. DOI: 10.6060/ivkkt.20246702.6811.
 18. **Кафаров В.В., Дорохов И.Н.** Системный анализ процессов химической технологии: основы стратегии. М.: Изд-во Юрайт. 2023. 499 с.
 19. **Рудобашта С.П.** Теплотехника. М.: Перо. 2015. 672 с.
 20. **Лыков А.В.** Теория сушки. М.: Энергия. 1968. 472 с.
 21. **Лыков А.В.** Теория теплопроводности. М.: Высш. шк. 1967. 600 с.
 22. **Аэров М.Э., Тодес О.М., Наринский Д.А.** Аппараты со стационарным зернистым слоем. Гидравлические и тепловые основы работы. Л.: Химия. 1979. 176 с.
 23. **Гельперин Н.И., Айнштейн В.Г., Кваша В.Б.** Основы техники псевдооживления. М.: Химия. 1967. 664 с.
 24. **Федосов С.В., Баканов М.О.** Моделирование процессов теплопроводности и диффузии в телах канонической формы с применением метода "микропроцессов" для области малых значений числа Фурье. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2021. Т. 64. Вып. 10. С. 78-83. DOI: 10.6060/ivkkt.20216410.6387.
 25. **Bobkov S.P.** Use of discrete approaches for simulation the basic processes of chemical technology. *Russ. J. Gen. Chem.* 2021. V. 91. N 6. P. 1190-1197. DOI: 10.1134/S1070363221060311.
 16. **Rudobashta S.P., Babicheva E.L., Dmitriev V.M.** Study of the Mass Conductivity Coefficient during Convective Drying of Pea. *Conf. Paper: AIP Conf. Proc.* 2022. V. 2661(1). 050001. DOI: 10.1063/5.0108355.
 17. **Rudobashta S.P., Babicheva E.L., Zueva G.A.** Phase concentration equilibrium during drying colloid capillary-porous material - pea. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2024. V. 67. N 2. P. 104-110 (in Russian). DOI: 10.6060/ivkkt.20246702.6811.
 18. **Kafarov V.V., Dorokhov I.N.** System analysis of chemical technology processes. Fundamentals of strategy. M.: Izd. Yurayt. 2023. 499 p. (in Russian).
 19. **Rudobashta S.P.** Heat engineering. M.: Pero. 2015. 672 p. (in Russian).
 20. **Lykov A.V.** Drying theory. M.: Energiya. 1968. 472 p. (in Russian).
 21. **Lykov A.V.** Thermal conduction theory. M.: Vyssh. shk. 1967. 600 p. (in Russian).
 22. **Aerov M.E., Todes O.M.** Hydraulic and thermal foundations of the operation of apparatuses with a stationary and fluidized granular layer. M.-L.: Khimiya. 1968. 510 p. (in Russian).
 23. **Gelperin N.I., Einstein V.G., Kvasha V.B.** Fundamentals of fluidization technology. M.: Khimiya. 1967. 664 p. (in Russian).
 24. **Fedosov S.V., Bakanov M.O.** Modeling of heat conduction and diffusion processes in canonical bodies using the "micro-processes" method for the range of low fourier numbers. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2021. V. 64. N 10. P. 78-83. (in Russian). DOI: 10.6060/ivkkt.20216410.6387.
 25. **Bobkov S.P.** Use of discrete approaches for simulation the basic processes of chemical technology. *Russ. J. Gen. Chem.* 2021. V. 91. N 6. P. 1190-1197. DOI: 10.1134/S1070363221060311.

Поступила в редакцию 12.09.2023

Принята к опубликованию 08.12.2023

Received 12.09.2023

Accepted 08.12.2023