

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-4-374-386>

УДК 662.711.4

Исследование тепло- и массообмена в процессе топливоподготовки частицы биомассы с высокой влажностью

А. В. Митрофанов^{1, 2)}, О. Б. Колибаба¹⁾, Р. Н. Габитов¹⁾, Д. А. Долинин¹⁾,
С. В. Василевич³⁾

¹⁾Ивановский государственный энергетический университет
(Иваново, Российская Федерация)

²⁾Торайгыров университет (Павлодар, Республика Казахстан)

³⁾Белорусская государственная академия авиации (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2023
Belarusian National Technical University, 2023

Реферат. В настоящее время актуальной задачей развития топливно-энергетических комплексов ряда стран является увеличение доли генерации за счет вовлечения в оборот твердого топлива. В ряду подобных проектов особенно значимыми являются те, которые позволяют утилизировать отходы различных производств. Пищевые продукты с истекшим сроком годности в таком контексте представляются возобновляемым местным энергетическим ресурсом. Однако такие продукты требуют серьезных мероприятий по их подготовке к сжиганию или другому виду высокотемпературной переработки с целью получения энергии. Целью настоящей работы является совершенствование методов подготовки топлива из утилизируемых плодов моркови (непригодных для использования в пищевой сфере). При топливоподготовке моркови стадия сушки является лимитирующей для рациональной организации ее переработки в котлоагрегатах. Кроме того, стадия сушки является крайне энергозатратной, поэтому надежное прогнозирование ее кинетики во многом определяет эффективность всего технологического процесса. В ходе исследования решены следующие задачи: разработан численный метод описания процессов внутренней и внешней задач тепломассообмена с использованием явной разностной аппроксимации дифференциальных уравнений тепломассопереноса; выполнена параметрическая идентификация предложенной одномерной математической модели с использованием известных из литературных источников эмпирических зависимостей; проведена эмпирическая проверка предложенной математической модели путем сравнения получаемых расчетных прогнозов с результатами собственных натурных экспериментов. Тот факт, что предложенная математическая модель и результаты натурного эксперимента являются независимыми, при этом расчетные прогнозы и экспериментальные данные находятся в хорошем соответствии, позволяет рассматривать предложенный метод расчета как достоверную научную основу для компьютерного метода расчета тепломассообменных процессов при организации приготовления топлива из плодов моркови.

Ключевые слова: топливоподготовка, морковь, возобновляемое топливо, сушка, численное моделирование, явная разностная аппроксимация, тепломассоперенос, инженерный метод расчета, отходы биомассы

Для цитирования: Исследование тепло- и массообмена в процессе топливоподготовки частицы биомассы с высокой влажностью/ А. В. Митрофанов [и др.] // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2023. Т. 66, № 4. С. 374–386. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-4-374-386>

Адрес для переписки

Василевич Сергей Владимирович
Белорусская государственная академия авиации
ул. Уборевича, 77,
220096, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 249-97-65
svasilevich@yandex.ru

Address for correspondence

Vasilevich Siarhei V.
Belarusian State Academy of Aviation
77, Ubovich str.,
220096, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 249-97-65
svasilevich@yandex.ru

Investigation of Heat and Mass Transfer in the Process of Fuel Preparation from Biomass Particles with High Moisture

A. V. Mitrofanov^{1,2)}, O. B. Kolibaba¹⁾, R. N. Gabitov¹⁾, D. A. Dolinin¹⁾,
S. V. Vasilevich³⁾

¹⁾ Ivanovo State Power Engineering University (Ivanovo, Russian Federation)

²⁾ Toraighyrov university (Pavlodar, Republic of Kazakhstan)

³⁾ Belarusian State Academy of Aviation (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. Currently, in a number of countries an urgent task for development of fuel and energy complexes is to increase the share of generation by involving solid fuels in circulation. Among such projects, those that allow the disposal of waste from various industries are particularly significant. Expired food products in this context are represented as a renewable local energy resource. However, such products require serious activities to prepare them for incineration or other type of high-temperature processing in order to obtain energy. The purpose of the present work is to improve methods of preparing fuel from recycled carrot fruits (unsuitable for use in the food sector). During the fuel preparation of carrots, the drying stage is limiting for the rational organization of its processing in boilers. In addition, the drying stage is extremely energy-consuming, so reliable prediction of its kinetics largely determines the efficiency of the entire technological process. In the course of the study, the following tasks were solved: a numerical method was developed for describing the processes of internal and external heat and mass transfer problems using an explicit difference approximation of differential equations of heat and mass transfer; parametric identification of the proposed one-dimensional mathematical model was performed using empirical dependencies known from literature sources; empirical verification of the proposed mathematical model was carried out by comparing the calculated forecasts obtained with the results of their own field experiments. The fact that the proposed mathematical model and the results of the full-scale experiment are independent, while the calculated forecasts and experimental data are in good agreement, makes us possible to consider the proposed calculation method as a reliable scientific basis for a computer method for calculating of heat and mass transfer processes when organizing the preparation of fuel from carrot fruits.

Keywords: fuel preparation, carrots, renewable fuel, drying, numerical modeling, explicit difference approximation, heat and mass transfer, engineering calculation method, biomass waste

For citation: Mitrofanov A. V., Kolibaba O. B., Gabitov R. N., Dolinin D. A., Vasilevich S. V. (2023) Investigation of Heat and Mass Transfer in the Process of Fuel Preparation from Biomass Particles with High Moisture. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 66 (4), 374–386. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-4-374-386> (in Russian)

Введение

В настоящее время тенденции развития топливно-энергетических комплексов ряда стран, в том числе России и Беларуси, предполагают увеличение генерации электроэнергии за счет вовлечения в оборот различных видов возобновляемого твердого топлива [1–3]. Указанные тенденции поддерживаются также существованием объективно острых задач по утилизации отходов и побочных продуктов других отраслей материального производства [4–6]. Примером такой задачи может служить необходимость поиска эффективных способов переработки пищевых продуктов, срок годности которых истек [6]. Однако следует иметь в виду, что, например, овощи и фрукты не подходят для непосредственного производства энергии

ввиду высокого содержания влаги [6, 7]. Для термохимической переработки биомассы рекомендуемая влажность сырья должна быть сведена к минимуму. Как правило, содержание влаги в сырой биомассе колеблется от 50 до 85 %, для эффективной же организации процесса пиролиза требуется сушка до значений влажности 12–15 % и менее [6, 7].

При этом важной особенностью обезвоживания негодных для использования овощей и фруктов является то, что рассмотрение перерабатываемых частиц как термически тонких тел часто является грубым допущением и, соответственно, эволюция полей температуры и влагосодержания в одиночной частице является критически важной не только с точки зрения расчета обезвоживания частицы, но и с точки зрения построения прогностически эффективной модели функционирования сушильного оборудования [8, 9]. Иногда исследователи ограничиваются решением только «внешней» задачи, полагая, что частицы материала можно рассмотреть в качестве термически тонких тел [10, 11], однако это всегда требует обоснования, так как тепломассоперенос в телах нередко сопровождается углублением зоны испарения, поэтому необходима классификация материалов как объектов сушки с учетом термических, тепломассообменных, структурно-механических и других характеристик [11–13]. В контексте данной работы представляется наиболее информативной классификация дисперсных материалов с учетом величины диффузионного критерия Био (Bi_d), значение которого определяет тип технологической задачи (до $Bi_d \leq 0,1$ – внешняя задача, до $Bi_d = 20$ – смешанная задача, $Bi_d > 20$ – внутренняя задача массообмена) [13].

Предлагаемое в настоящей работе исследование направлено на построение простой, но информативной модели миграции теплоты и влаги в цилиндрической частице моркови, которая может служить достоверной научной основой для формирования инженерного метода расчета аппаратуры для переработки биомассы в топливо, пригодное для дальнейшего энерготехнологического использования.

Методы и результаты исследования

Методы расчетного исследования. При построении математической модели процессов переноса, которые реализуются как внутри рассматриваемой фазы, так и между фазами, необходимы неизбежные упрощения. Расчетная схема моделирования процессов теплопереноса представлена на рис. 1. Исследуемый образец рассматривается как цилиндр, состоящий из заданного числа n цилиндрических элементарных слоев толщиной Δr каждый. Внутри любого такого элемента все характеристики полагаются одинаковыми. Соседние цилиндрические элементы в результате процессов переноса обмениваются порциями теплоты и массы. При этом обмен указанными аддитивными свойствами осуществляется через соответствующие цилиндрические поверхности (нумерация этих поверхностей

на рис. 1 не приведена, но номер внешней цилиндрической поверхности совпадает с номером ячейки, которую она ограничивает). Математическая формализация описания процесса теплопереноса в основных положениях совпадает со схемой, предложенной в работе [9], однако она дополнена потоками теплоты, связанными с мигрирующей влагой. Математические построения выполнены в рамках алгоритмического описания процессов, то есть модель явления представляется как набор из повторяющихся последовательно дискретных расчетных шагов [14].

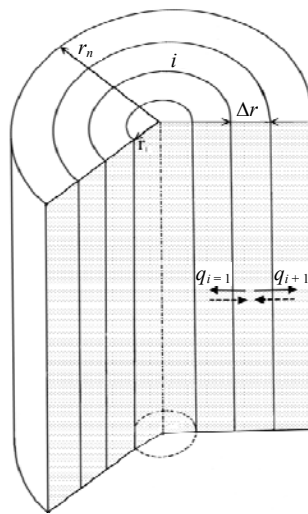


Рис. 1. Расчетная схема моделирования радиального переноса теплоты в цилиндрической частице

Fig. 1. The calculation scheme of the radial heat transfer model in a cylindrical particle

Эволюция состояния частицы наблюдается в дискретные моменты времени $t_k = (k - 1)\Delta t$, где Δt – продолжительность временного перехода; k – номер временного перехода (целочисленный аналог времени).

Тепловое состояние частицы характеризуется вектором-столбцом $Q = \{Q_i\}$, который имеет размерность $n \times 1$. Любой (i -й) элемент этого вектора – это количество теплоты, содержащейся в соответствующем цилиндрическом слое. Далее цилиндрические слои будем считать представительным объемом рассматриваемого объекта.

Тепловое состояние i -го представительного объема изменяется с учетом кондуктивных потоков теплоты из соседних слоев с номерами $(i + 1)$ и $(i - 1)$, которые могут обмениваться рассматриваемым объемом порциями теплоты q_{i-1} и q_{i+1} :

$$q_{i-1}^k = \left[-\lambda_i^k \frac{(T_i^k - T_{i-1}^k)}{\Delta r} \right] (2\pi r_{i-1} L) \Delta t \quad \text{для } i = \overline{2, n}; \quad (1)$$

$$q_{i+1}^k = \left[-\lambda_i^k \frac{(T_i^k - T_{i+1}^k)}{\Delta r} \right] (2\pi r_i L) \Delta t \text{ для } i = \overline{1, n-1}, \quad (2)$$

где T_i – элемент вектора температур материала $\mathbf{T} = \{T_i\}$ в представительных объемах (имеет размерность $n \times 1$); L – высота цилиндрической частицы.

Помимо кондуктивного распространения теплоты внутри частицы на тепловое состояние также оказывает влияние массоперенос влаги между ячейками. Для моделирования внутренней диффузии влаги в радиальном направлении цилиндра использован расчетный подход, основанный на применении математического аппарата теории цепей Маркова [10, 11]. Текущее распределение массы влаги по ячейкам характеризуется вектором $\mathbf{M} = \{M_i\}$. Изменение вектора $\mathbf{M}$ описывается рекуррентным матричным равенством вида

$$\mathbf{M}^{k+1} = \mathbf{P}\mathbf{M}^k, \quad (3)$$

где $\mathbf{P}$ – матрица переходных вероятностей. Квадратная матрица $\mathbf{P}$ содержит вероятности диффузионного переноса влаги, которые расположены симметрично относительно главной диагонали. Так, например, для частицы, представляемой набором из четырех слоев, матрица переходных вероятностей будет иметь вид:

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} 1-d & d & 0 & 0 \\ d & 1-2d & d & 0 \\ 0 & d & 1-2d & d \\ 0 & 0 & d & 1-d \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Каждый столбец такой матрицы заполнен вероятностями переноса влаги из соответствующей ячейки (сумма вероятностей в столбце равна 1).

Идентификация вероятностей диффузионного переноса d выполняется через установление связи между этой вероятностью и эффективным коэффициентом диффузии влаги D

$$d = D \frac{\Delta t}{(\Delta r)^2}. \quad (5)$$

Коэффициент диффузии влаги рассчитывается по известным [15] эмпирическим соотношениям, но отдельно для каждого представительного объема:

$$D_i = 2,779 \cdot 10^{-4} \cdot \exp \left(-0,97 - \frac{3459,8}{T_i} + 0,059 \cdot \frac{M_i}{m_i} \right), \quad (6)$$

где M_i/m_i – влагосодержание материала в i -м цилиндрическом слое, кг влаги/кг сухого вещества; m_i – масса сухого вещества в представительном

объеме. Распределение содержания влаги в образце характеризуется массивом $X = \{x_i\}$.

Миграция влаги влечет за собой перераспределение теплоты. Содержание теплоты, заключенной в диффундирующей влаге, характеризуется вектором $Q_w = \{Q_{wi}\}$. Изменение во времени этого вектора описывается по аналогии с выражением (3):

$$Q_w^{k+1} = PQ_w^k. \quad (7)$$

Таким образом, зависимости (1), (2) определяют кондуктивное распространение теплоты в радиальном направлении образца, а выражения (3)–(7) определяют перенос теплоты за счет миграции влаги внутри тела.

Межфазное взаимодействие между образцом и сушильным агентом осуществляется через его наружную поверхность. Интенсивность межфазного теплообмена в общем случае зависит от характера распределения полей скоростей и температур потока в пространстве сушильного оборудования, для описания которых необходимы специальные модели [9–11]. Однако в настоящей работе рассматривается упрощенная ситуация, когда теплофизические свойства сушильного агента и параметры потока могут считаться постоянными. Определяемые критерии теплообмена в таком случае тоже будут иметь постоянные значения, для оценки которых используются известные соотношения [16]:

$$Nu = C Re^y Pr^{0,38} \left(\frac{Pr}{Pr_w} \right)^{0,25}, \quad (8)$$

где Nu – критерий Нуссельта; Re – критерий Рейнольдса; Pr – критерий Прандтля, Pr_w – критерий Прандтля, в котором кинематическая вязкость и температуропроводность берутся при температуре стенки обтекаемого потоком цилиндра, а не при температуре потока. Эмпирические параметры C и y принимаются в зависимости от режима течения: $C = 0,50$ и $y = 0,50$ при $5 < Re < 1000$; $C = 0,25$ и $y = 0,60$ при $1000 < Re < 200000$; $C = 0,023$ и $y = 0,80$ при $30000 < Re < 2000000$ [16].

Для оценки числа Шервуда Sh используется следующее опытное соотношение [17]:

$$Sh = 1,1 \cdot \varepsilon Re^{0,28} Sc^{1/3}, \quad (9)$$

где ε – порозность слоя (в данном случае $\varepsilon = 1$); Sc – критерий Шмидта.

Искомые коэффициенты теплообмена α и массообмена β рассчитываются как [16]:

$$\alpha = Nu\lambda/(2r_n), \quad (10)$$

$$\beta = ShD/(2r_n). \quad (11)$$

Таким образом, количество теплоты q_s , отдаваемое частицей за счет теплоотдачи за один рекуррентный расчетный шаг, может быть определено по формуле

$$q_s^k = -\alpha(T_n^k - T_g)(2\pi r_n L) \frac{\Delta t}{dr}, \quad (12)$$

где T_g – температура сушильного агента (принята постоянной); T_n^k – температура материала (нижний индекс обозначает номер представительного слоя, верхний индекс показывает номер шага по времени).

Количество влаги Δm , отдаваемое частицей за время Δt через наружную поверхность, определяется как

$$\Delta m^k = -\beta(p_{ws}^k - p_{wg}^k)(2\pi r_n L) \frac{\Delta t}{dr}, \quad (13)$$

где p_{ws} и p_{wg} – парциальные давления влаги на поверхности частицы и в воздухе (рассчитываются по эмпирическим соотношениям, которые также были использованы в наших предыдущих работах [11]).

Тепловое состояние всех ячеек может быть описано следующими балансовыми соотношениями:

$$Q_i^{k+1} = Q_i^k + q_{i-1}^k + q_{i+1}^k + Q_{wi}^k \text{ для } i = \overline{2, (n-1)}; \quad (14)$$

$$Q_i^{k+1} = Q_i^k + q_{i+1}^k + Q_{wi}^k \text{ для } i = 1; \quad (15)$$

$$Q_i^{k+1} = Q_i^k + q_{i-1}^k + Q_{wi}^k - q_s^k - r_w \Delta m^k \text{ для } i = n, \quad (16)$$

где r_w – количество теплоты, отдаваемое частицей с каждой единицей массы влаги.

Векторы Q и T связаны соотношением $Q = T \cdot c \cdot \rho$, где c – вектор теплостойкостей влажных частиц и ρ – вектор их плотностей ($\cdot$ – означает поэлементное умножение матриц).

Методы экспериментального исследования. Экспериментальные исследования процесса конвективной сушки влажного продукта (моркови) были проведены на установке, схема которой представлена на рис. 2а. Экспериментальная установка состояла из сушильного шкафа 1, весового устройства 2, исследуемого образца 3, термопар 4, модуля ввода аналогового сигнала 5 (МВА-8) и компьютера 6.

Методика эксперимента заключалась в следующем. Два образца 3 длиной 150 мм и толщиной 30 мм помещали в сушильный шкаф 1. По толщине образца размещали 4 термопары типа ТХА(К). Для получения правильного представления о поле температур образца особое внимание обращали на точность размещения термопар 4 в образце. Для исключения переноса теплоты через электроды термопары устанавливали с торца и размещали в изотермических поверхностях. Точки замера температуры выбирали на оси тела или около нее, так как температурные градиенты здесь либо равны нулю, либо невелики. Все это позволяло величину ошибки при замерах свести к минимуму. Сигнал с термопар поступал на аналоговый модуль МВА-8 и далее обрабатывался на компьютере 6. Показания

термопар фиксировали с интервалом времени в пять секунд. Сушку образца выполняли до установления постоянства его массы.

Схема расположения термопар в образце показана на рис. 2b. Термопары 1 и 2 были расположены симметрично по центру образца и заглублены на расстояние 7,5 мм от наружной цилиндрической поверхности; спаи термопар 3 и 4 были расположены на оси образца и заведены через его торцевые поверхности на глубину 45 мм.

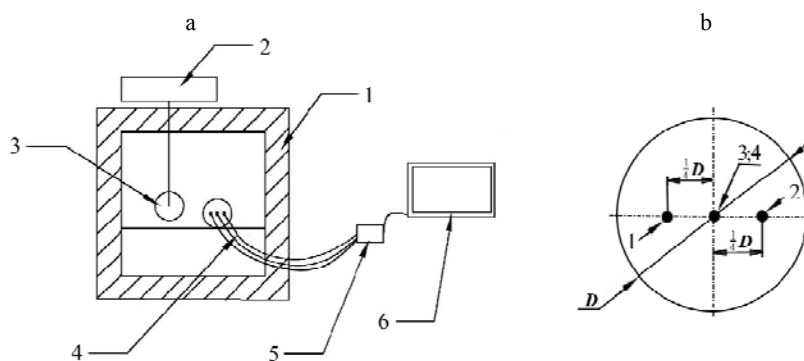


Рис. 2. а – схема экспериментальной установки: 1 – сушильный шкаф; 2 – весовое устройство; 3 – исследуемый образец; 4 – термопары; 5 – модуль ввода аналоговый; 6 – компьютер; б – характеристика схемы измерения температур: 1; 2; 3; 4 – точки расположения термопар в сечении образца

Fig. 2. а – experimental setup diagram: 1 – drying chamber; 2 – weighing device; 3 – test sample; 4 – thermocouples; 5 – analog input module; 6 – computer; б – characteristics of the temperature measurement diagram: 1; 2; 3; 4 – the location points of the thermocouples in the sample cross section

Для получения более достоверных результатов и снижения влияния случайных погрешностей один и тот же эксперимент повторяли пять раз. В качестве исходных данных для последующих расчетов принимали усредненные по числу опытов значения температур для данного режима нагрева.

Экспериментальные исследования процесса конвективной сушки влажного материала проведены в трех температурных режимах при постоянной температуре сушильного агента, равной 100 °С, 150 °С и 200 °С. На рис. 3 представлены результаты эксперимента при температуре сушильного агента 150 °С. Аналогичные данные получены для температур сушильного агента, равных 100 и 200 °С. Погрешность проведения эксперимента не превышает 3 %.

Результаты и обсуждение

Некоторые результаты исследования, отражающие пространственно-временные характеристики происходящих в образце процессов тепло- и массопереноса, представлены на рис. 3–5. На рис. 3 представлены результаты сравнения расчетных и экспериментальных значений параметров на кривой сушке. Рис. 3 иллюстрирует кинетическую характеристику изменения влагосодержания в образце в целом.

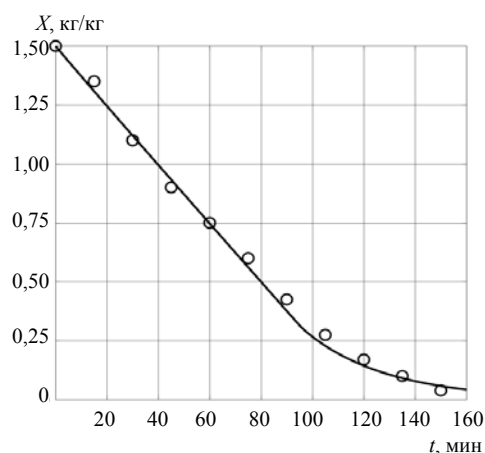


Рис. 3. Изменение влагосодержания образца со временем
(маркеры – экспериментальные данные; линия – расчетный прогноз)

Fig. 3. Evolution of the moisture content in the sample over time
(the markers represent experimental data; the line – calculated prediction)

Рис. 4 показывает интегральную скорость обезвоживания образца. Рис. 3, 4 позволяют судить о характере удаления влаги из образца. В начальный период скорость обезвоживания практически постоянна, однако в это время происходит незначительное снижение скорости влаги, особенно заметное в первые 20 минут процесса (рис. 4). При этом на графике изменения влагосодержания (рис. 3) это практически не заметно (нелинейность крайне незначительна). Очевидно, что внутренняя диффузия влаги незначительно лимитирует процесс, поэтому период постоянной скорости сушки в полной мере реализуется в период 40–90 минут. Затем наступает второй период сушки, характеризующийся резким падением скорости обезвоживания.

Результаты, представленные на рис. 3, свидетельствуют о приемлемой, с инженерной точки зрения, прогнозирующей эффективности модели (расхождение между прогнозом и экспериментальными точками не превышает 5 %).

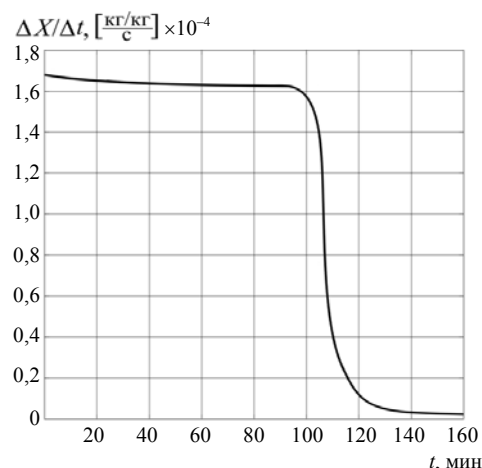


Рис. 4. Скорость изменения влагосодержания образца со временем

Fig. 4. Rate of change in sample moisture content over time

Результаты, представленные на рис. 5, 6, отражают локальные характеристики процессов тепломассопереноса. На рис. 5 показана расчетная дифференциальная характеристика обезвоживания образца. Следует отметить, что это не кривая скорости сушки, которая характеризует скорость убыли массы всего образца, это скорость убыли массы влаги поверхностного слоя материала, поэтому она имеет несколько иной (монотонно убывающий) характер.

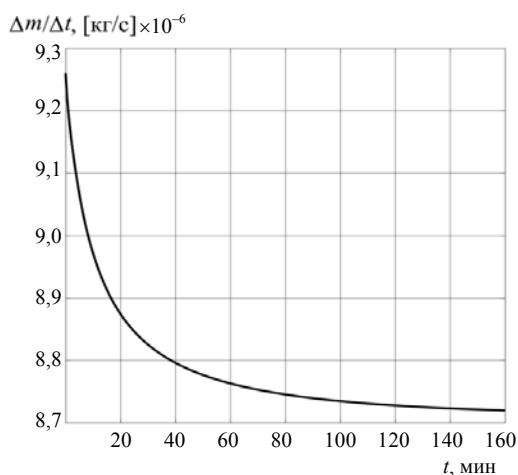


Рис. 5. Расчетное изменение скорости убыли массы влаги в наружном цилиндрическом слое

Fig. 5. Calculated evolution of the rate of loss of moisture mass in the outer cylindrical layer

Рис. 6 показывает локальные значения температур материала в процессе сушки образца. Результаты сравнения расчета и эксперимента показывают высокую прогнозирующую способность предложенной математической модели.

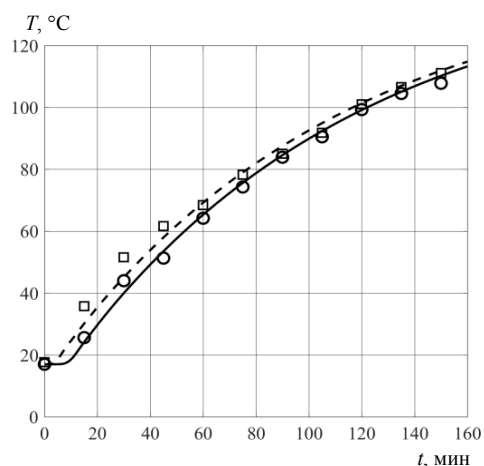


Рис. 6. Изменение температуры в различных точках образца со временем (маркеры – экспериментальные данные; линии – расчетные прогнозы): ○ – сплошная линия – на оси образца; □ – пунктирная линия – на расстоянии 7–8 мм оси образца

Fig. 6. Temperature evolution at various points of the sample over time (markers – experimental data; lines – calculated forecasts): ○ – solid line – on the sample axis; □ – dotted line – at a distance of 7–8 mm from the sample axis

ВЫВОДЫ

В ходе исследования решены задачи разработки и эмпирической проверки математической модели обезвоживания плодов моркови в процессе их подготовки к переработке в котлоагрегатах. Предложенная математическая модель сочетает описание сопряженных процессов внутреннего и внешнего тепломассообмена, что позволяет получать качественно-непротиворечивые решения. Выполненная в ходе собственных экспериментальных исследований эмпирическая проверка результатов моделирования позволяет с уверенностью констатировать высокую прогностическую эффективность модели.

Обобщая решение указанных задач исследования, можно предложить разработанную математическую модель в качестве основы компьютерного метода расчета тепломассообменных процессов при организации приготовления топлива из плодов моркови, использование которого позволит строить режимные карты с меньшим объемом экспериментальных работ, а также ставить и решать задачи оптимального управления энергоемкими процессами топливоподготовки по различным целевым функциям.

ЛИТЕРАТУРА

1. Корсак, Е. П. Формирование системы угроз энергетической безопасности Республики Беларусь / Е. П. Корсак // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2019. Т. 62, № 4. С. 388–398. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-4-388-398>.
2. Фортов, В. Е. Состояние развития возобновляемых источников энергии в мире и в России / В. Е. Фортов, О. С. Попель // Теплоэнергетика. 2014. № 6. С. 4–13.
3. Лосюк, Ю. А. Некоторые аспекты термохимической конверсии торфа / Ю. А. Лосюк, С. В. Жибрик, С. В. Корчиненко // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2008. № 5. С. 60–66.
4. Карпунин, И. И. Использование отходов растительного сырья для производства энергии / И. И. Карпунин, В. В. Кузьмич, Т. Ф. Балабанова // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2011. №6. С. 72–75.
5. Гриценко, А. В. Совместное сжигание продуктов пиролиза шин и древесных пеллет / А. В. Гриценко, Н. В. Внукова, Е. И. Позднякова // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2021. Т. 64, № 4. С. 363–376. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-4-363-376>.
6. Model for Convective Drying of Carrots for Pyrolysis / F. M. Berruti [et al.] // Journal of Food Engineering. 2009. Vol. 92, No 2. P. 196–201. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2008.10.036>.
7. State-of-the-Art of the Pyrolysis and Co-Pyrolysis of Food Waste: Progress and Challenges / G. Su [et al.] // Science of The Total Environment. 2022. Vol. 809. Article 151170. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151170>.
8. Массопроводность при сушке ядер и оболочек семян подсолнечника / С. П. Рудобашта [и др.] // Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология. 2021. Т. 64, вып. 5. С. 80–87. <https://doi.org/10.6060/ivkkt.20216405.6337>.
9. Расчетно-экспериментальное исследование теплового процесса в одиночной цилиндрической частице / А. В. Митрофанов [и др.] // Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология. 2022. Т. 65, № 9. С. 97–104. <https://doi.org/10.6060/ivkkt.20226509.6679>.

10. Theoretical Study of Particulate Flows Formation in Circulating Fluidized Bed / V. Mizonov [et al.] // Recent Innovations in Chemical Engineering. 2018. Vol. 11, No 1. P. 20–28. <https://doi.org/10.2174/2405520410666170620105102>.
11. Theoretical and Experimental Study of Particulate Solids Drying in Circulating Fluidized Bed / A. Mitrofanov [et al.] // JP Journal of Heat and Mass Transfer. 2019. Vol. 18, No 2. P. 267–276. <https://doi.org/10.17654/HM018020267>.
12. Акулич, П. В. Тепломассоперенос в цилиндрических пористых телах с учетом нестационарности параметров на углубляющейся границе испарения / П. В. Акулич // Известия Национальной академии наук Беларуси. Серия физико-технических наук. 2016. № 3. С. 71–76.
13. Оптимизация аппаратного оформления сушильных процессов в технике взвешенного слоя / В. Б. Сажин [и др.] // Успехи в химии и химической технологии. 2007. Т. XXI, № 1 (69). С. 49–65.
14. Беркович, С. Я. Клеточные автоматы как модель реальности: поиски новых представлений физических и информационных процессов / С. Я. Беркович. М.: изд-во МГУ, 1993. 112 с.
15. Heat and Mass Transfer During Drying of a Bed of Shrinking Particles – Simulation for Carrot Cubes Dried in a Spout-Fluidized-Bed Drier / I. Białobrzewski [et al.] // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2008. Vol. 51, Iss. 19–20. P. 4704–4716. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2008.02.031>.
16. Новый справочник химика и технолога. Процессы и аппараты химических технологий / под ред. Г. М. Островского. СПб.: Профессинал, 2004. Ч. I. 848 с.
17. Dwivedi, P. N. Particle-Fluid Transfer in Fixed and Fluidized Beds / P. N. Dwivedi, S. N. Upadhyay // Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development. 1977. Vol. 16, No 2. P. 157–165. <https://doi.org/10.1021/i260062a001>.

Поступила 03.01.2023 Подписана в печать 09.03.2023 Опубликовано онлайн 31.07.2023

REFERENCES

1. Korsak E. P. (2019) Formation of the System of Threats to Energy Security of the Republic of Belarus. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 62 (4), 388–398. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-4-388-398> (in Russian).
2. Fortov V. E., Popel' O. S. (2014) The Current Status of the Development of Renewable Energy Sources Worldwide and in Russia. *Thermal Engineering*, 61 (6), 389–398. <https://doi.org/10.1134/s0040601514060020>.
3. Losiuk Y. A., Gibric S. V., Korchinenko S. V. (2008) Some Aspects of Thermochemical Decomposition of Peat. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, (5), 60–66 (in Russian).
4. Karpunin I. I., Kuzmich V. V., Balabanova T. F. (2011) Usage of Vegetal Wastes for Energy Production. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, (6), 72–75 (in Russian).
5. Grytsenko A. V., Vnykova N. V., Pozdnyakova O. I. (2021) Co-Combustion of Tire Pyrolysis Products and Wood Pellets. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 64 (4), 363–376. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-4-363-376> (in Russian).

6. Berruti F. M., Klaas M., Briens C., F. Berruti F. (2009) Model for Convective Drying of Carrots for Pyrolysis. *Journal of Food Engineering*, 92 (2), 196–201. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2008.10.036>.
7. Su G., Ong H. C., Fattah I. M. R., Ok Y. S., Jang J.-H., Wang H.-T. (2022) State-of-the-Art of the Pyrolysis and Co-Pyrolysis of Food Waste: Progress and Challenges. *Science of The Total Environment*, 809, 151170. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151170>.
8. Rudobashta S. P., Zueva G. A., Dmitriev V. M., Kochetkov V. N. (2021) Mass Conductivity for Drying Nuclei and Seed Sunflower Shells. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Seriya: Khimiya i Khimicheskaya Tekhnologiya = ChemChemTech*, 64 (5), 80–87. <https://doi.org/10.6060/ivkkt.20216405.6337> (in Russian).
9. Mitrofanov A. V., Ovchinnikov L. N., Ovchinnikov N. L., Ogurtsov A. V., Lapshina O. I. (2022) Computational and Experimental Study of the Thermal Process in an Individual Cylindrical Particle. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Seriya: Khimiya i Khimicheskaya Tekhnologiya = ChemChemTech*, 65 (9), 97–104. <https://doi.org/10.6060/ivkkt.20226509.6679> (in Russian).
10. Mizonov V., Mitrofanov A., Camelo A., Ovchinnikov L. (2018) Theoretical Study of Particulate Flows Formation in Circulating Fluidized Bed. *Recent Innovations in Chemical Engineering*, 11 (1), 20–28. <https://doi.org/10.2174/2405520410666170620105102>.
11. Mitrofanov A., Mizonov V., Shuina E., Kasatkina N., Shpeynova N. (2019) Theoretical and Experimental Study of Particulate Solids Drying in Circulating Fluidized Bed. *JP Journal of Heat and Mass Transfer*, 18 (2), 267–276. <https://doi.org/10.17654/HM018020267>.
12. Akulich P. V. (2016) Heat and Mass Transfer in Cylindrical Porous Bodies with Account of Nonstationarity of Parameters of Deepening Evaporation Boundary. *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus, Physical-Technical Series*, (3), 71–76 (in Russian).
13. Sazhin V. B., Sazhin B. S., Sazhina M. B., Otrubyanikov E. V. (2007) Optimization of Hardware Design of Drying Processes in the Technique of a Suspended Layer. *Uspekhi v Khimii i Khimicheskoi Tekhnologii* [Advances in Chemistry and Chemical Technology], XXI (1), 49–65 (in Russian).
14. Berkovich S. Ya. (1993) *Cellular Automata as a Model of Reality: the Search for New Representations of Physical and Informational Processes*. Moscow, MSU Publ. 112 (in Russian).
15. Białobrzewski I., Zielińska M., Mujumdar A., Markowski M. (2008) Heat and Mass Transfer During Drying of a Bed of Shrinking Particles – Simulation for Carrot Cubes Dried in a Spout-Fluidized-Bed Drier. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 51 (19–20), 4704–4716. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2008.02.031>.
16. Ostrovskii G. M., Abiev R. Sh., Barabash V. M., Bilenko L. F., Bogdanov V. V., Britov V. P. (2004) *The New Handbook of Chemist and Technologist. Processes and Apparatuses of Chemical Technologies. Ch. I*. St. Petersburg, Professional Publ. 848 (in Russian).
17. Dwivedi P. N., Upadhyay S. N. (1977) Particle-Fluid Transfer in Fixed and Fluidized Beds. *Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development*, 16 (2), 157–165. <https://doi.org/10.1021/i260062a001>.