

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-1-58-75>

УДК 664.8

Исследование эффективного коэффициента диффузии и энергии активации с целью энергосбережения при конвекционной сушке

Ж. Э. Сафаров¹⁾, Ш. А. Султанова¹⁾, Г. Гунеш²⁾, А. С. Понасенко³⁾,
Д. И. Самандаров¹⁾, М. М. Пулатов¹⁾, А. М. Миркомилев⁴⁾,
М. А. Насирова¹⁾

¹⁾Ташкентский государственный технический университет имени Ислама Каримова (Ташкент, Республика Узбекистан),

²⁾Стамбульский технический университет (Стамбул, Турецкая Республика),

³⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь),

⁴⁾Ташкентский химико-технологический институт (Ташкент, Республика Узбекистан)

Реферат. В данном исследовании проведена работа по расчету и математическому моделированию эффективного коэффициента диффузии и энергии активации при конвективной сушке продукта, рассчитан коэффициент его усадки при разных температурах. Эффективный коэффициент диффузии рассчитывался с использованием закона диффузии Фика, разработанного для конечной цилиндрической геометрии. С использованием уравнения эффективного коэффициента диффузии для температур воздуха 45, 55 и 65 °С получены следующие значения: $2,02 \cdot 10^{-10}$, $5,05 \cdot 10^{-10}$ и $8,08 \cdot 10^{-10}$ м²/с соответственно. Энергия активации рассчитана как 61,1 кДж/моль с использованием наклона графика $\ln(D_{\text{эф}})^{-1}/T$. Установлено, что коэффициенты усадки продукта при температурах воздуха для сушки 45; 55 и 65 °С составляют примерно 23, 32 и 40 % соответственно. Чтобы найти наиболее подходящую сетчатую структуру модели, было проведено исследование независимости сети с использованием средних значений влажности с точностью до 0,001. Нелинейные одновременные уравнения тепло- и массопереноса для осушающего воздуха 45, 55 и 65 °С решаются методом конечных элементов (MATLAB) с начальными и граничными условиями. Уравнения решаются с точностью до 0,001 для 30-минутных временных интервалов. Начальные условия, использованные в опыте, и теплофизические свойства продукта подробно представлены в таблицах и на графиках. Данные, полученные экспериментальным путем и методом математических вычислений, проанализированы, и было установлено, что результаты совместимы друг с другом. Согласно полученному результату математическая модель, выражающая одновременный тепло- и массоперенос, может быть использована для прогнозирования распределения влаги в зависимости от температуры в продукте при сушке.

Ключевые слова: математическая модель, эффективный коэффициент диффузии, коэффициент усадки, энергия активации, температура, криволинейный регрессионный анализ

Для цитирования: Исследование эффективного коэффициента диффузии и энергии активации с целью энергосбережения при конвекционной сушке / Ж. Э. Сафаров [и др.] // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2025. Т. 68, № 1. С. 58–75. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-1-58-75>

Адрес для переписки

Понасенко Андрей Святославович
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 276-39-23
buii@bntu.by

Address for correspondence

Ponassenko Andrey S.
Belarusian National Technical University
65, Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 276-39-23
buii@bntu.by

Research of the Effective Diffusion Coefficient and Activation Energy for the Purpose of Energy Saving during Convection Drying

J. E. Safarov¹⁾, Sh. A. Sultanova¹⁾, G. Gunes²⁾, A. S. Ponassenko³⁾,
D. I. Samandarov¹⁾, M. M. Pulatov¹⁾, A. M. Mirkomilov⁴⁾, M. A. Nasirova¹⁾

¹⁾Tashkent State Technical University named after Islam Karimov
(Tashkent, Republic of Uzbekistan),

²⁾Istanbul Technical University (Istanbul, Republic of Turkey),

³⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus),

⁴⁾Tashkent Institute of Chemical Technology (Tashkent, Republic of Uzbekistan)

Abstract. In this study, the calculation and mathematical modelling of effective diffusion coefficient and activation energy in convective drying of a product were investigated. The shrinkage coefficient for different temperatures was also calculated. The effective diffusion coefficient was calculated using Fick's law developed for finite cylindrical geometry. Using the effective diffusion coefficient equation for air temperatures of 45, 55 and 65 °C, the results were obtained as $2.02 \cdot 10^{-10}$, $5.05 \cdot 10^{-10}$ and $8.08 \cdot 10^{-10}$ m²/s, respectively. The activation energy was calculated as 61.1 kJ/mol using the slope of the graph $\ln(D_{ef})^{-1}/T$. The product shrinkage coefficients at drying air temperatures of 45, 55 and 65 °C were found to be approximately 23, 32 and 40 %, respectively. In order to find the most suitable mesh structure of the model, a network independence study was carried out using average moisture content values with an accuracy of 0.001. Nonlinear simultaneous heat and mass transfer equations for 45, 55 and 65 °C dehumidifying air are solved by the finite element method (MATLAB) with initial and boundary conditions. The equations are solved with a tolerance value of 0.001 for thirty minutes time steps. The initial conditions used in the analyses and the thermophysical properties of the product are detailed in tables and graphs. The data obtained from the experimental and numerical solution were compared and it was seen that the results were compatible with each other. According to this result, a mathematical model expressing simultaneous heat and mass transfer can be used to predict the moisture and temperature distribution in the product during drying.

Keywords: mathematical model, effective diffusion coefficient, shrinkage coefficient, activation energy, temperature, curvilinear regression analysis

For citation: Safarov J. E., Sultanova Sh. A., Gunes G., Ponassenko A. S., Samandarov D. I., Pulatov M. M., Mirkomilov A. M., Nasirova M. A. (2025) Research of the Effective Diffusion Coefficient and Activation Energy for the Purpose of Energy Saving during Convection Drying. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 68 (1), 58–75. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-1-58-75> (in Russian)

Введение

Сушка представляет собой сложный диффузионный процесс, при котором процессы тепло- и массообмена происходят одновременно. Процесс воздушной сушки протекает с разной скоростью и состоит, как правило, из периода постоянной скорости сушки, за которой следует период ее уменьшения. В период постоянной скорости сушки поверхность продукта покрыта водой. По мере испарения воды с поверхности происходит массоперенос влаги. Скорость воздуха, температура и относительная влажность являются основными факторами, влияющими на скорость сушки. В период падения скорости сушки влагоперенос контролируется внутренними параметрами массопереноса, такими как капиллярный поток, диффузия жидкости и пара [1–3].

Один или несколько из этих процессов могут происходить одновременно в период падения скорости сушки. Температура воздуха, скорость воздушного потока, химический состав, физическая структура и толщина продукта влияют на скорость сушки. В гигроскопичных материалах наблюдаются два периода уменьшения скорости. В течение первого периода снижения скорости площадь влажной поверхности уменьшается в зависимости от того, как влага продукта поднимается в воздух. При достижении равновесной влажности на поверхности продукта начинается второй период снижения скорости и внутри продукта происходит испарение связанной влаги [4–7].

Масса воды, переносимая испарением с единицы площади в единицу времени, определяет скорость сушки. Когда начинают сушить влажный продукт, поверхность которого покрыта пленкой воды, скорость сушки равна скорости испарения с поверхности воды. Пока скорость, температура и влажность воздуха остаются постоянными, скорость сушки не изменяется. Влажность в момент, когда водяная пленка на поверхности продукта начинает исчезать, называется первой критической влажностью. Период постоянной скорости – это период сушки, который длится до тех пор, пока не уменьшится критическая влажность. Изменение абсолютной влажности и скорости сушки продукта во времени показано на рис. 1 [8].

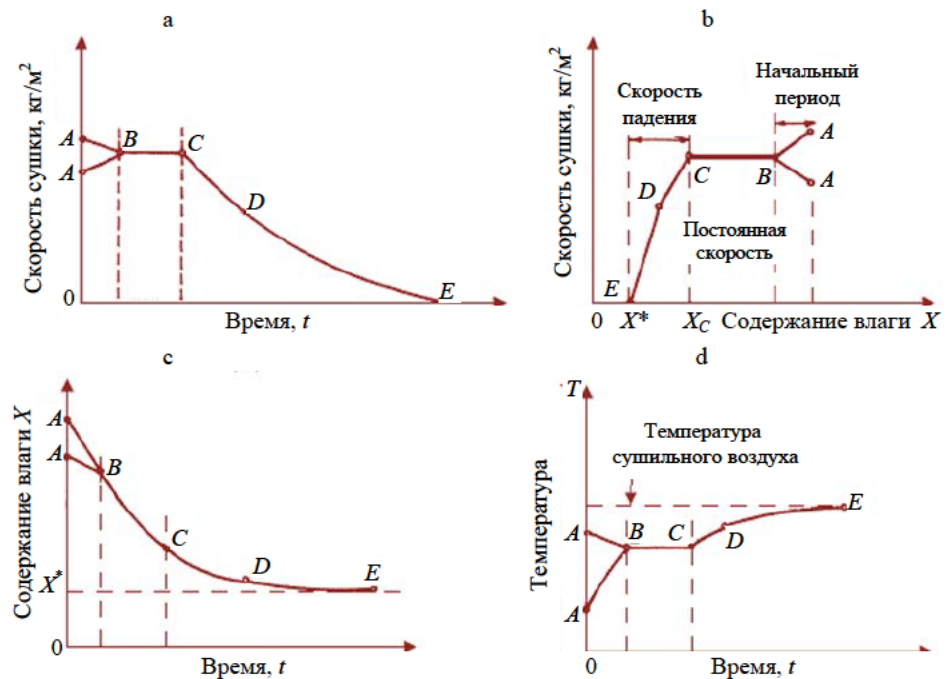


Рис. 1. а – изменение скорости сушки в зависимости от времени;
 б – то же в зависимости от влажности; с – изменение влажности в зависимости от времени;
 д – изменение температуры в зависимости от времени

Fig. 1. а – change in drying rate over time; б – change in drying rate depending on humidity;
 с – change in humidity over time; д – change in temperature over time

Влажность продукта постоянно снижается в разные периоды времени. В то же время температура поверхности продукта постоянна в диапа-

зоне BC (скорость воздуха, влажность, температура), так как внешние условия постоянны в зависимости от влажности воздуха. Это происходит за счет плавного испарения жидкости. В области BC теплообмен уравновешивается массопереносом:

AB : процесс нагревания или охлаждения влажного продукта до достижения равновесия;

BC : стабильное испарение жидкости в период постоянной скорости сушки;

A : первая критическая точка, при которой на поверхности влажного продукта начинают образовываться сухие участки;

CD : первый период падающей скорости сушки;

D : вторая критическая точка, при которой влага испарилась с поверхности продукта;

DE : второй период падающей скорости сушки.

При конвективной сушке поток горячего воздуха направляется к материалу в сушильной установке, позволяя теплоте передаваться материалу путем конвекции, удаляя при этом испаряющуюся воду из окружающей среды. Этот процесс продолжается до тех пор, пока в продукте не образуется равновесная влажность, зависящая от относительной влажности и температуры воздуха. Исходя из поставленной в данной научной работе задачи эффективный коэффициент диффузии и энергии активации при конвективной сушке можно рассчитать и смоделировать в такой последовательности.

Расчет содержания влаги в материале

Содержание влаги в продукте в пересчете на сухую и влажную основу:

$$W_{\text{co}} = \left(\frac{W_s}{m_K} \right) = \left(\frac{m - m_K}{m_K} \right); \quad (1)$$

$$W_{\text{во}} = \left(\frac{m_s}{m_s + m_K} \right) \cdot 100, \quad (2)$$

где W_{co} – содержание влаги в продукте на сухую основу; $W_{\text{во}}$ – то же на влажную основу; m – исходный вес продукта, г; m_s – масса воды в продукте, г; m_K – то же сухого продукта, г.

Скорость сушки (СС), которая представляет собой изменение влажности высушиваемого продукта в единицу времени, может быть выражена как

$$CC = \left(\frac{W_t - W_{t+\Delta t}}{\Delta t} \right) \cdot 100, \quad (3)$$

где W_t – влажность продукта при t ; $W_{t+\Delta t}$ – то же при $t + \Delta t$ в пересчете на сухую массу, г воды / г сухого вещества.

Модели сушки определяются в терминах безразмерного отношения влажности ($W_{\text{бв}}$). Для расчета содержания влаги в сухой основе, полученного в результате эксперимента по нахождению статистических параметров, запишем

$$W_{\text{бв}} = \frac{W_t - W_e}{W_b - W_e}, \quad (4)$$

где $W_{\text{бв}}$ – безразмерные влажности; W_e – равновесная влажность в конце сушки, г воды / г сухого вещества; W_b – начальная влажность, г воды / г сухого вещества.

В исследовании упрощено безразмерное соотношение влажности и использовано значение

$$W_{\text{бв}} = W_t / W_b.$$

Эффективный коэффициент диффузии находится с использованием значения наклона (e), полученного при построении графика зависимости $\ln(W_{\text{бв}})$ от времени

$$e = \left(\frac{\pi^2 D_{\text{эф}} t}{4L^2} \right). \quad (5)$$

Энергия активации E_0 (кДж/моль), представляющая собой начальную энергию химических реакций, рассчитывается по уравнению

$$D_{\text{эф}} = D_0 \exp\left(\frac{E_0}{RT}\right), \quad (6)$$

где R – универсальная газовая постоянная ($8,314 \cdot 10^{-3}$ кДж/(моль · К); D_0 – экспоненциальный множитель уравнения Аррениуса ($\text{м}^2/\text{с}$); T – температура осушающего воздуха.

Эффективный коэффициент диффузии рассчитывается с использованием закона диффузии Фика, разработанного для конечной цилиндрической геометрии. В используемом выражении предполагается наличие постоянного коэффициента диффузии и переноса влаги путем диффузии. Эффективный коэффициент диффузии можно рассчитать с помощью уравнения [10]

$$W_{\text{бв}} = \frac{W_t - W_e}{W_b - W_e} = \frac{8r^2}{l^2} \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{j=1}^{\infty} \exp\left(-(\lambda_i^2 + \beta_j^2) \frac{D_{\text{эф}} t}{r^2}\right), \quad (7)$$

где $D_{\text{эф}}$ – эффективный коэффициент диффузии, $\text{м}^2/\text{с}$; r – радиус; l – характерная длина, м; t – время сушки, с; λ_i – корень функции Бесселя,

$$\beta_j = \frac{(2j-1)\pi r}{2l} \text{ при } j = 1, 2, 3. \quad (8)$$

Для длительного времени высыхания можно использовать только первый член серийного решения [11]:

$$W_{\text{об}} = \frac{W_t - W_e}{W_i - W_e} = \frac{32}{\lambda_i^2 \pi^2} \exp\left(-(\lambda_i^2 + \beta_i^2) \frac{D_{\text{эф}} t}{r^2}\right); \quad (9)$$

$$\ln(W_{\text{об}}) = \ln\left(\frac{32}{\lambda_i^2 \pi^2}\right) - \left(-(\lambda_i^2 + \beta_i^2) \frac{D_{\text{эф}} t}{r^2}\right). \quad (10)$$

Эффективный коэффициент диффузии получают из кривой изменения времени сушки с $\ln(W_{\text{об}})$, полученной в результате экспериментального исследования. Значение наклона рассчитывается из графика изменения значений $\ln(W_{\text{об}})$, приведенных в (10), в зависимости от времени высыхания

$$\text{Наклон} = \frac{5,7831 + \beta_i^2 D_{\text{эф}}}{r^2}. \quad (11)$$

Таким образом, эффективный коэффициент диффузии определен с использованием метода наклона.

Расчет скорости сушки

Экспериментальный расчет эффекта усадки представляет собой довольно сложную задачу. Поэтому необходимо произвести оценку степени усадки. В данном исследовании использовался метод линейного распределения скорости усадки в процессе сушки. Скорость усадки в любой точке продукта

$$u(x) = u(b) \frac{x}{b} \quad (12)$$

определяется как значение скорости на поверхности и задается уравнением

$$u(b) = \frac{b - b_2}{\Delta t}, \quad (13)$$

где b – начальная половина толщины; b_2 – половина толщины продукта в следующий раз [12].

Для расчета полутолщины продукта в любой момент времени и эффективного коэффициента диффузии за счет эффекта усадки можно использовать следующее выражение, которое получается в зависимости от содержания влаги в этот момент [13]:

$$b = b_0 \left[\frac{\rho_m + W_{\rho_s}}{\rho_m + W_0 W_{\rho_s}} \right], \quad \frac{D_{\text{эф}}}{D_{\text{эф}}} = \frac{b_0}{b_t}, \quad (14)$$

где $D_{\text{эф}}$ – эффективный коэффициент диффузии, $\text{м}^2/\text{с}$; $D_{\text{эф}}$ – коэффициент, полученный в результате эффекта сушки, использованный в численном анализе, $\text{м}^2/\text{с}$; b_0 – половина толщины продукции в первый момент и половина толщины продукции во время b_t [14].

Тепловая эффективность выражается как отношение энергии, затраченной на испарение воды из продукта, к общей энергии, затраченной в сушильной установке [15]:

$$\eta = \frac{W_m \lambda}{E_T}, \quad (15)$$

где λ – энтальпия испарения, кДж/кг; E_T – энергия активации, кДж/моль; W_m – количество испарившейся воды, кг.

Эффект усадки негативно сказывается на качестве продукции. Поэтому его следует учитывать в процессе сушки. Коэффициент усадки (S_b) можно получить с помощью следующего уравнения [16]:

$$S_b = \left(1 - \frac{V_t}{V_0}\right) \cdot 100. \quad (16)$$

Расчет эффективного коэффициента диффузии и энергии активации

Расчитаны эффективные коэффициенты диффузии тыквы для различных температур. С помощью уравнения (5) эффективный коэффициент диффузии для температур воздуха 45, 55 и 65 °C равен $2,02 \cdot 10^{-10}$, $5,05 \cdot 10^{-10}$ и $8,08 \cdot 10^{-10}$ м²/с соответственно.

Линейное уравнение зависимости эффективного коэффициента диффузии от температуры $D_{эф} = 0,303T^{-10,1}$ и коэффициент регрессии $R^2 = 1$. Как видно из рис. 2, эффективный коэффициент диффузии также увеличивается при повышении температуры воздуха для сушки.

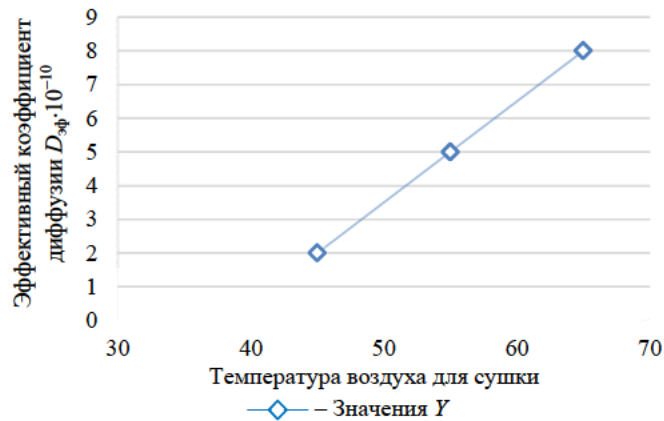


Рис. 2. Изменение эффективного коэффициента диффузии в зависимости от температуры осушающего воздуха

Fig. 2. Variation of effective diffusion coefficient as a function of drying air temperature

С использованием наклона графика $\ln(D_{эф})^{-1}/T$, показанного на рис. 3, и (6) была рассчитана энергия активации (61,1 кДж/моль). Уравнение (16) использовалось для расчета коэффициента усадки продукта. Установлено,

что коэффициенты усадки продукта при температуре воздуха для сушки 45, 55 и 65 °C составляют примерно 23, 32 и 40 % соответственно.

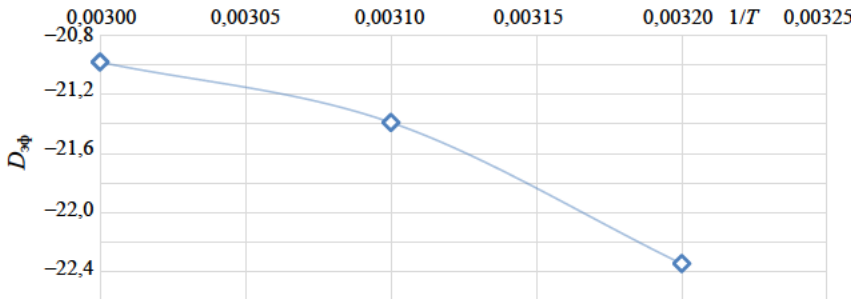


Рис. 3. Изменение эффективного коэффициента диффузии в зависимости от температуры (1/T)

Fig. 3. Variation of effective diffusion coefficient as a function of temperature (1/T)

При повышении температуры на каждые 10 °C объемное изменение продукта составляло примерно 8,5 %. На рис. 4 показана зависимость между влажностью продукта и изменением коэффициента усадки после 6 ч сушки ломтиков тыквы при различных температурах. На основании полученных результатов можно утверждать, что температура воздуха при сушке является эффективным параметром усадки продукта.

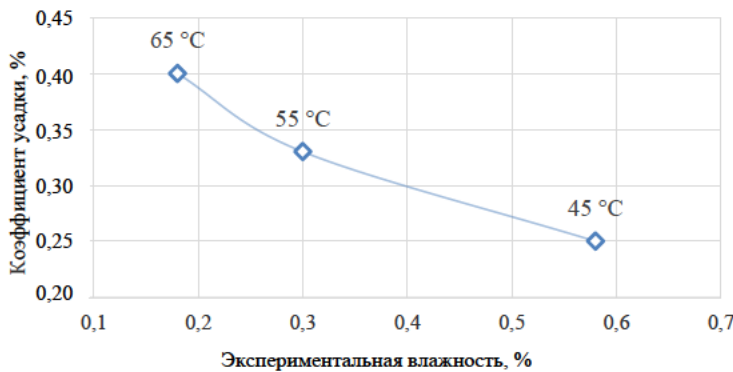


Рис. 4. Изменение влажности с коэффициентом усадки в конце сушки при разных температурах

Fig. 4. Variation of moisture content with shrinkage coefficient at the end of drying at different temperatures

Математическая модель и проверочный анализ процесса сушки

В данном исследовании принудительной конвекционной сушки использовалась двумерная осесимметричная модель для определения одновременных уравнений тепло- и массопереноса (рис. 5). Теоретическое исследование реализуется путем моделирования полусреза поперечного сечения цилиндрического образца.

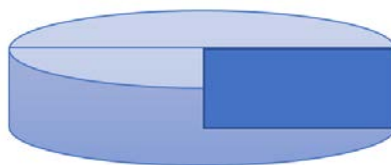


Рис. 5. Осесимметричная модель

Fig. 5. Axisymmetric model

При анализе процесса сушки сделаны следующие предположения:

- изначально содержание влаги и значение температуры в продукте принимались однородными (равномерными);
- теплоперенос в продукте осуществляется кондуктивным путем, а массоперенос жидкости – диффузионным;
- происходит передача теплоты от воздуха к продукту за счет конвекции и теплопроводности, диффузия от твердого тела к воздуху и перенос массы за счет конвекции;
- учитывается эффект усадки (эффективный коэффициент диффузии за счет эффекта усадки) продукта во время сушки;
- влияние радиации не учитывается;
- теплофизические свойства воздуха считались постоянными в течение периода сушки.

Прежде всего, чтобы найти наиболее подходящую сетчатую структуру модели, было проведено исследование независимости сети с использованием средних значений влажности с точностью до 0,001. Нелинейные одновременные уравнения тепло- и массопереноса для осушающего воздуха 45, 55 и 65 °С решаются методом конечных элементов (MATLAB) с начальными и граничными условиями (со значением допуска 0,001 для 30-минутных временных шагов). Исходные условия, использованные при анализе, и теплофизические свойства продукта приведены в табл. 1.

Таблица 1

Теплофизические свойства тыквы и экспериментальные условия сушки
Thermophysical properties of pumpkin and experimental drying conditions

Параметр	Единица	Источник
Плотность продукта, кг/м ³	980	[12]
Коэффициент теплопередачи, Вт/(м·К)	0,006M + 0,120	[17]
Удельная теплоемкость, Дж/(кг·К)	0,811M ² – 24,75 + 1742	[17]
Энтальпия испарения, Дж/кг	0,23 · 10 ⁷	[18]
Скорость воздуха, м/с	0,5; 0,7; 1,0	[19]
Начальная влажность продукта, %	72	[19]
Температура сушки, °С	45, 55, 65	[19]

Модель проверена путем сравнения значений содержания влаги и температуры, полученных в результате экспериментов и математическим вычислением. На рис. 6 приведено сравнение значений влагосодержания, полученных в результате эксперимента, со средними значениями влагосодержания, полученными в результате математического вычисления при различных темпера-

турах сушки воздуха. Установлено, что существует разница примерно 2,2; 2,9 и 6,8 % между значениями, полученными в результате эксперимента и математического вычисления, при температурах 45, 55 и 65 °С.

Численный анализ также проводился без учета усадочной ситуации. Результаты моделей с усадкой и без нее представлены на рис. 5. Что касается содержания влаги в продукте, то получена разница примерно 2 % между численными результатами условий усадки и без усадки [20].

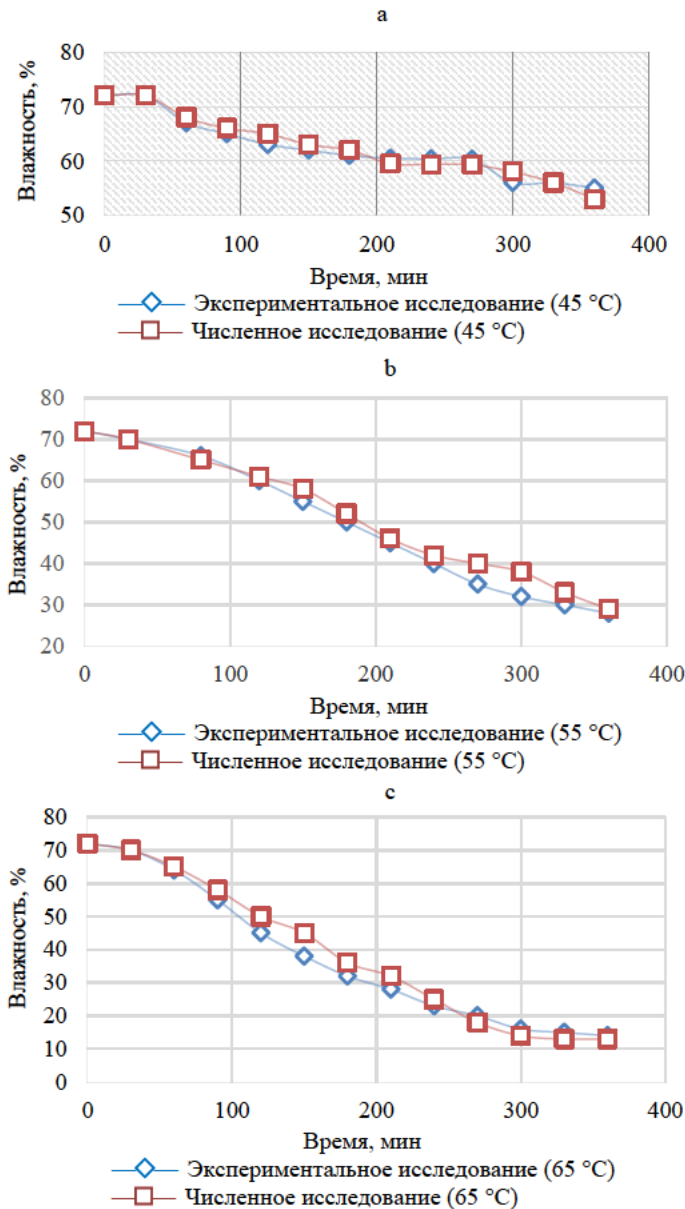


Рис. 6. Изменение влажности продукта в процессе сушки: а – 45 °С; б – 55 °С; в – 65 °С

Fig. 6. Time variation of a product moisture content during the drying process: a – 45 °C; b – 55 °C; c – 65 °C

Как видно из рис. 6, в отличие от других сравнений регрессионный анализ выполнен для графических изменений результатов двух сравниваемых методов. Здесь для линейных кривых используется простая модель линейной регрессии ($y = \beta_0 + \beta_1 x + \epsilon$; β_1 – точка отсечки регрессии; ϵ – значение ошибки, наклон регрессии). В некоторых случаях связь между переменными может быть нелинейной. В этих случаях используется полиномиальная регрессия ($\beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2^2 + \dots + \beta_i x_i^n + \epsilon$).

Коэффициент регрессии показывает нам, сколько процентов зависимых переменных (y – температура, влажность) в модели можно объяснить независимыми переменными (x – время).

По результатам регрессионного анализа влагосодержания, полученного для температуры 45 °С (табл. 2 и 3), установлено, что он является более точной оценкой изменения влагосодержания в зависимости от времени сушки, так как значение численного исследования R^2 ближе к 1. По результатам регрессионного анализа, выполненного для 55 °С в тех же условиях (табл. 4–6), видно, что экспериментальное исследование дало лучшие результаты. По результатам регрессионного анализа для 65 °С видно, что экспериментальные данные имеют лучшую оценку содержания влаги (табл. 7, 8).

Таблица 2

**Линейный регрессионный анализ содержания влаги
 экспериментального исследования в зависимости от времени при 45 °С
 Linear regression analysis of the moisture content of the experimental study
 as a function of time at 45 °С**

Параметр	СС	ССК	ССКв	ЗС	R^2	СО	Уравнение регрессии
Регрессия	1	183,906	183,906	702,26	98,46	0,51	$y = 71,30 - 0,03351x$
Ошибка	11	2,881	0,262				
Общий	12	186,786					

Примечание. В табл. 2–14 даны обозначения: СС – степени свободы; ССК – скорректированная сумма квадратов; ССКв – скорректированные средние квадраты; ЗС – значение статистики; R^2 – коэффициент регрессии; СО – стандартная ошибка.

Таблица 3

**Линейный регрессионный анализ влажности численного исследования
 в зависимости от времени при 45 °С
 Linear regression analysis of the moisture content of the numerical study at 45 °С
 as a function of time at 45 °С**

Параметр	СС	ССК	ССКв	ЗС	R^2	СО	Уравнение регрессии
Регрессия	1	307,97	307,97	1266,84	99,14	0,49	$y = 71,86 - 0,04336x$
Ошибка	11	2,674	0,243				
Общий	12	310,644					

Таблица 4

**Линейный регрессионный анализ содержания влаги
 экспериментального исследования в зависимости от времени при 55 °С**
**Linear regression analysis of the moisture content of the experimental study
 as a function of time at 55 °C**

Параметр	СС	ССК	ССКв	ЗС	R ²	СО	Уравнение регрессии
Регрессия	1	896,14	896,14	2837,58	99,61	0,56	$y = 71,50 - 0,07397x$
Ошибка	11	3,474	0,316				
Общий	12	899,614					

Таблица 5

**Линейный регрессионный анализ влажности численного исследования
 с эффектом усадки при 55 °С во времени**
**Linear regression analysis of moisture content of a numerical study
 with shrinkage effect at 55 °C over time**

Параметр	СС	ССК	ССКв	ЗС	R ²	СО	Уравнение регрессии
Регрессия	1	882,421	882,421	341,13	96,88	1,6	$y = 69,71 - 0,07340x$
Ошибка	11	28,454	2,587				
Общий	12	910,875					

Таблица 6

**Линейный регрессионный анализ содержания влаги
 в зависимости от времени безусадочного численного исследования при 55 °С**
**Linear regression analysis of moisture content as a function of time
 of shrinkage-free numerical study at 55 °C**

Параметр	СС	ССК	ССКв	ЗС	R ²	СО	Уравнение регрессии
Регрессия	1	941,281	941,281	434,4	97,53	1,47	$y = 69,03 - 0,07581x$
Ошибка	11	23,836	2,167				
Общий	12	965,117					

Таблица 7

**Линейный регрессионный анализ содержания влаги
 в экспериментальном исследовании в зависимости от времени при 65 °С**
**Linear regression analysis of moisture content in the experimental study
 as a function of time at 65 °C**

Параметр	СС	ССК	ССКв	ЗС	R ²	СО	Уравнение регрессии
Регрессия	1	2119,87	2119,87	5717,06	99,81	0,6	$y = 72,66 - 0,1138x$
Ошибка	11	4,08	0,37				
Общий	12	2123,94					

Таблица 8

**Линейный регрессионный анализ содержания влаги
 в численном исследовании в зависимости от времени при 65 °С**
**Linear regression analysis of moisture content in a numerical study
 as a function of time at 65 °C**

Параметр	СС	ССК	ССКв	ЗС	R ²	СО	Уравнение регрессии
Регрессия	1	1272,54	1272,54	318,95	96,67	1,99	$y = 68,69 - 0,8814x$
Ошибка	11	43,89	3,99				
Общий	12	1316,42					

На рис. 7 показаны изменения температуры в центре продукта, полученные экспериментально и математически для каждой температуры воздуха при сушке. Средняя разница между значениями температуры продукта, полученными в результате экспериментального и математического вычисления, составила 7, 9 и 5 % для температур воздуха сушки 45, 55 и 65 °С соответственно. Значения влажности и температуры, которые являются результатом математического решения, и данные, полученные в результате эксперимента, совместимы друг с другом.

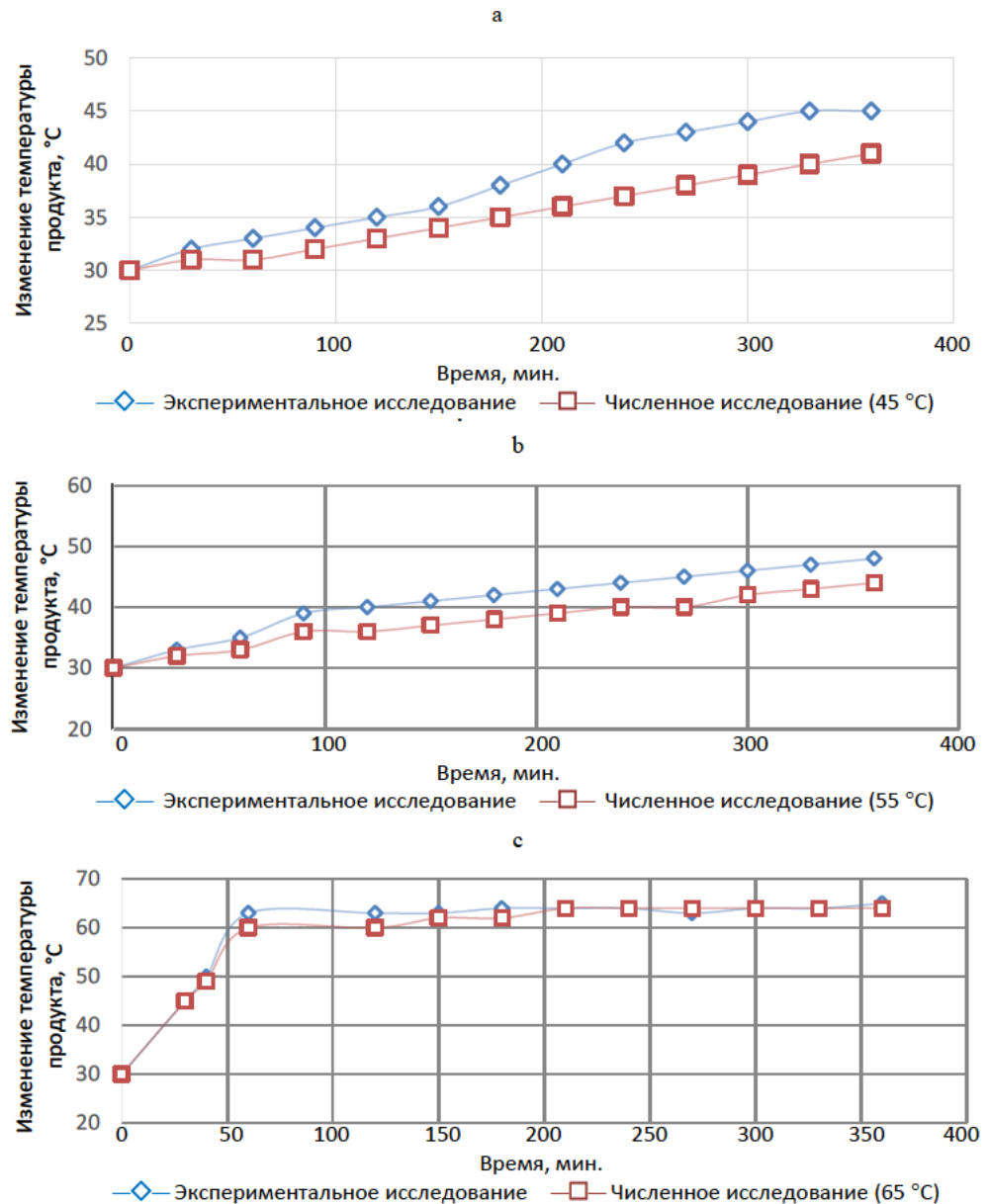


Рис. 7. Изменение температуры продукта во время сушки

Fig. 7. Product temperature change during drying

Криволинейный регрессионный анализ температуры продукта для экспериментальных и математических исследований при температурах 45, 55 и 65 °С приведен в табл. 9–14. Видно, что результаты экспериментального исследования для 45 °С и регрессионного анализа математического исследования для 55 и 65 °С сопоставимы.

Таблица 9

Криволинейный регрессионный анализ зависимости температуры экспериментального исследования от времени при 45 °С

Curvilinear regression analysis of the experimental study temperature dependence on time at 45 °С

Параметр	СС	ССК	ССКв	ЗС	R ²	СО	Уравнение регрессии
Регрессия	3	193,19	64,3996	151,25	98,06	0,65	$y = 21,49 - 0,1640x - 0,000699x^2 + 0,000001x^3$
Ошибка	9	3,832	0,4258				
Общий	12	197,031					

Таблица 10

Криволинейный регрессионный анализ зависимости температуры численного исследования от времени при 45 °С

Curvilinear regression analysis of the numerical study temperature dependence on time at 45 °С

Параметр	СС	ССК	ССКв	ЗС	R ²	СО	Уравнение регрессии
Регрессия	3	292,5	97,4999	145,46	97,98	0,81	$y = 21,47 + 0,2120x - 0,000920x^2 + 0,000001x^3$
Ошибка	9	6,032	0,6703				
Общий	12	298,532					

Таблица 11

Криволинейный регрессионный анализ зависимости температуры экспериментального исследования от времени при 55 °С

Curvilinear regression analysis of the experimental study temperature dependence on time at 55 °С

Параметр	СС	ССК	ССКв	ЗС	R ²	СО	Уравнение регрессии
Регрессия	3	396,673	132,22	106,22	97,25	1,11	$y = 23,12 + 0,2758x - 0,001289x^2 + 0,000002x^3$
Ошибка	9	11,204	1,245				
Общий	12	407,877					

Таблица 12

Криволинейный регрессионный анализ зависимости температуры численного исследования в зависимости от времени при 55 °С

Curvilinear regression analysis of the numerical study temperature dependence on time at 55 °С

Параметр	СС	ССК	ССКв	ЗС	R ²	СО	Уравнение регрессии
Регрессия	3	661,659	220,553	120,27	97,57	1,35	$y = 22,72 + 0,3180x - 0,001404x^2 + 0,000002x^3$
Ошибка	9	16,505	1,834				
Общий	12	678,163					

Таблица 13

**Криволинейный регрессионный анализ температуры
 экспериментального исследования в зависимости от времени при 65 °С**

**Curvilinear regression analysis of experimental study
 temperature dependence on time at 65 °C**

Параметр	СС	ССК	ССКв	ЗС	R ²	СО	Уравнение регрессии
Регрессия	3	765,366	255,122	27,09	90,03	3,06	$y = 26,10 + 0,4330x - 0,002145x^2 + 0,000003x^3$
Ошибка	9	84,771	9,419				
Общий	12	850,137					

Таблица 14

**Криволинейный регрессионный анализ температуры
 численного исследования в зависимости от времени при 65 °С**

**Curvilinear regression analysis of numerical study
 temperature dependence on time at 65 °C**

Параметр	СС	ССК	ССКв	ЗС	R ²	СО	Уравнение регрессии
Регрессия	3	1026,71	342,238	34,04	91,9	3,17	$y = 265,90 + 0,4331x - 0,002087x^2 + 0,000003x^3$
Ошибка	9	90,5	10,055				
Общий	12	1117,21					

ВЫВОДЫ

1. Эффективный коэффициент диффузии при температуре воздуха 45, 55 и 65 °С составил $2,02 \cdot 10^{-10}$, $5,05 \cdot 10^{-10}$ и $8,08 \cdot 10^{-10}$ м²/с. В соответствии с этим результатом определено, что температура воздуха для сушки является эффективным параметром.

2. Энергия активации – это количество энергии, которое необходимо преодолеть, чтобы произошла химическая реакция. В этом исследовании энергия активации продукта рассчитана как 61,1 кДж/моль с использованием наклона графика $\ln(D_{\text{эф}})^{-1}/T$.

3. Коэффициент усадки рассчитан для определения изменения объема продукта, причем наибольшее изменение объема происходило при 65 °С. По коэффициенту усадки, рассчитанному в конце сушки, и по экспериментальному графику влажности видно, что температура воздуха для сушки оказывает влияние на изменение объема продукта. Установлено, что коэффициент усадки в продукте увеличивался одновременно с повышением температуры воздуха сушки.

4. Установлено, что с увеличением температуры сушильного воздуха время сушки соответственно уменьшается и процесс сушки происходит быстрее (преимущественно в период снижения скорости для всех температур).

5. Сопоставление данных, полученных при экспериментальном и математическом вычислении, подтверждает их совместимость. Согласно этому математическая модель, выражающая одновременный тепломассоперенос, может быть использована для прогнозирования распределения влаги и температуры в продукте при сушке.

ЛИТЕРАТУРА

1. Воронова, Н. П. Решение одной задачи оптимального управления процессом тепломассопереноса / Н. П. Воронова // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2004. № 5. С. 76–78. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2004-0-5-76-78>.
2. Analysis of the Process of Mass Transfer During Drying / A. R. Tarawade, B. Özçelik, Sh. A. Sultanova, J. E. Safarov // *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 2021. Vol. 848. Art. 012003. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/848/1/012003>.
3. Ольшанский, А. И. Исследование кинетики тепловлагообмена при термической обработке и сушке тонких влажных теплоизоляционных материалов / А. И. Ольшанский, А. Н. Голубев // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. Объединений СНГ*. 2023. Т. 66, № 1. С. 66–79. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-1-66-79>.
4. Heldman, D. R. Principles of food Processing / D. R. Heldman, R. W. Hartel. Gaithersburg: Aspen Publishers, Inc., 1999. <https://doi.org/10.1007/978-1-4899-4584-6>.
5. Geankoplis, C. J. Transport Processes and Unit Operations / C. J. Geankoplis. New Jersey: Prentice Hall, 1993.
6. Rizvi, S. S. Thermodynamic Properties of Foods in Dehydration / S. S. Rizvi // *Engineering properties of foods* / eds.: M. A. Rao, S. S. H. Rizvi. Third Ed. Boca Raton et al.: Taylor & Francis, 2005. P. 239–326. <https://doi.org/10.1201/9781420028805.ch7>.
7. Research of Mulberry Fruit Drying in a Convection-Infrared Drying Equipment / A. Tarawade, D. Samandarov, J. Safarov, Sh. Sultanova // *Proceedings of International Conference on Technological Advancements in Computational Sciences, ICTACS 2022*. P. 825–830. <https://doi.org/10.1109/ictacs56270.2022.9988323>.
8. Avci, A. The analysis of the Drying Process on Unsteady Forced Convection in Thin Films of Ink / A. Avci, M. Can // *Applied Thermal Engineering*. 1999. Vol. 19. P. 641–657. [https://doi.org/10.1016/s1359-4311\(98\)00079-9](https://doi.org/10.1016/s1359-4311(98)00079-9).
9. Baker, C. G. Industrial Drying of Foods / C. G. Baker. First Edition. New York: Blackie Academic and Professional, 1997. <https://doi.org/10.1007/978-1-4613-1123-2>.
10. McMinn, W. A. Principles, Methods and Applications of the Convective Drying of Foodstuffs / W. A. McMinn, T. R. Magee. Food and Bioproducts Processing. 1999. Vol. 77, No 3. P. 175–193. <https://doi.org/10.1205/096030899532466>.
11. Madamba, P. S. The thin layer drying characteristics of garlic slices / P. S. Madamba, R. H. Driscoll, K. A. Buckle // *Journal of Food Engineering*. 1996. Vol. 29, No 1. P. 75–97. [https://doi.org/10.1016/0260-8774\(95\)00062-3](https://doi.org/10.1016/0260-8774(95)00062-3).
12. Karim, M. A. Mathematical Modelling and Experimental Investigation of Tropical Fruits Drying / M. A. Karim, M. N. Hawlader // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2005. Vol. 48, No 23–24. P. 4914–4925. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2005.04.035>.
13. Desmorieux, H. Analysis of Dryer Performance for Tropical Foodstuffs Using the Characteristic Drying Curve Concept / H. Desmorieux, C. Moyne // *Drying '92. Proceedings of the 8th International Drying Symposium (IDS '92), Montreal, Quebec, Canada, August 2–5 1992*. P. 834–843.
14. Kumar, C. Effective Diffusivity and Evaporative Cooling in Convective Drying of Food Material / C. Kumar, G. J. Millar, M. A. Karim // *Drying Technology*. 2015. Vol. 33. P. 227–237. <https://doi.org/10.1080/07373937.2014.947512>.

15. El-Mesery, H. S. Comparison of a Gas Fired Hot-Air Dryer with an Electrically Heated Hot-Air Dryer in Terms of Drying Process, Energy Consumption and Quality of Dried Onion Slices / H. S. El-Mesery, G. Mwithiga // *African Journal of Agricultural Research*. 2012. Vol. 7, No 31. P. 4440–4452. <https://doi.org/10.5897/ajar12.614>.
16. Datta, A. K. Porous Media Approaches to Studying Simultaneous Heat and Mass Transfer in Food Processes. I: Problem Formulations / A. K. Datta // *Journal of Food Engineering*. 2007. Vol. 80, No 1. P. 80–95. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2006.05.013>.
17. Thermal Properties of Gros Michel Banana Grown in Ghana / A. Bart-Plange, A. Addo, H. Ofori, V. Asare // *ARP Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2012. Vol. 7, No 4. P. 478–484.
18. Dandamrongrak R., Young G., Mason R. Evaluation of Various Pretreatments for the Dehydration of Banana and Selection of Suitable Drying Models // *Journal of Food Engineering*. 2002. Vol. 55. P. 139–146. [https://doi.org/10.1016/s0260-8774\(02\)00028-6](https://doi.org/10.1016/s0260-8774(02)00028-6).
19. Есьман, Р. И. Математическая модель движущихся теплоносителей / Р. И. Есьман, Л. И. Шуб // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2010. № 6. С. 53–59.
20. Study of Cellulose Extraction and Cavitation From Plant Raw Materials / A. B. Usenov, D. I. Samandarov, D. K. Alimova // *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 2022. Vol. 1112. Art. 012148. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1112/1/012148>.

Поступила 30.10.2024 Подписана в печать 08.01.2025 Опубликована онлайн 31.01.2025

REFERENCES

1. Voronova N. P. (2004) Solution of Problem Pertaining to Optimum Control over Heat- and Mass Transfer Process. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, (5), 76–78. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2004-0-5-76-78> (in Russian).
2. Tarawade A. R., Özçelik B., Sultanova Sh. A., Safarov J. E. (2021) Analysis of the Process of Mass Transfer During Drying. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 848, 012003. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/848/1/012003>.
3. Ol'shanskii A. I., Golubev A. N. (2023) Investigation of the Kinetics of Heat and Moisture Exchange during Heat Treatment and Drying of Thin Wet Thermal Insulation Materials. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 66 (1), 66–79. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-1-66-79> (in Russian).
4. Heldman D. R., Hartel R. W. (1998) *Principles of Food Processing*. Gaithersburg: Aspen Publishers, Inc. <https://doi.org/10.1007/978-1-4899-4584-6>.
5. Geankoplis C. J. (1993) *Transport Processes and Unit Operations*. New Jersey: Prentice-Hall.
6. Rizvi S. S. (2005) Thermodynamic Properties of Foods in Dehydration. Rao M. A., Rizvi S. S., Datta A. K. (eds.). *Engineering Properties of Foods*. Third Ed. Boca Raton, Taylor & Francis, 239–326. <https://doi.org/10.1201/9781420028805.ch7>.
7. Tarawade A., Samandarov D., Safarov J., Sultanova Sh. (2022) Research of Mulberry Fruit Drying in a Convection-Infrared Drying Equipment. *Proceedings of International Conference on Technological Advancements in Computational Sciences, ICTACS 2022*, 825–830. <https://doi.org/10.1109/ictacs56270.2022.9988323>.
8. Avci A., Can M. (1999) The Analysis of the Drying Process on Unsteady Forced Convection in Thin Films of Ink. *Applied Thermal Engineering*, 19, 641–657. [https://doi.org/10.1016/S1359-4311\(98\)00079-9](https://doi.org/10.1016/S1359-4311(98)00079-9).
9. Baker C. G. (1997) *Industrial drying of foods*. First Edition. New York, Blackie Academic and Professional. <https://doi.org/10.1007/978-1-4613-1123-2>.

10. McMinn W. A., Magee T. R. (1999) Principles, Methods and Applications of the Convective Drying of Food Stuffs. *Food and Bioproducts Processing*, 77 (3), 175–193. <https://doi.org/10.1205/096030899532466>.
11. Madamba P. S., Driscoll R. H., Buckle K. A. (1996) The Thin Layer drying Characteristics of Garlic Slices. *Journal of Food Engineering*, 29 (1), 75–97. [https://doi.org/10.1016/0260-8774\(95\)00062-3](https://doi.org/10.1016/0260-8774(95)00062-3).
12. Karim M. A., Hawlader M. N. A. (2005) Mathematical Modelling and Experimental Investigation of Tropical Fruits Drying. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 48 (23–24), 4914–4925.
13. Desmorieux H., Moyné C. (1992) Analysis of Dryer performance for Tropical Foodstuffs using the Characteristic Drying Curve Concept. *Drying '92. Proceedings of the 8th International Drying Symposium (IDS '92), Montreal, Quebec, Canada, August 2–5 1992*, 834–843.
14. Kumar C., Millar G. J., Karim M. A. (2015) Effective Diffusivity and Evaporative Cooling in Convective Drying of Food Material. *Drying Technology*, 33 (2), 227–237. <https://doi.org/10.1080/07373937.2014.947512>.
15. El-Mesery H. S., Mwithiga G. (2012) Comparison of a Gas Fired Hot-Air Dryer with an Electrically Heated Hot-Air Dryer in Terms of Drying Process, Energy Consumption and Quality of Dried Onion Slices. *African Journal of Agricultural Research*, 7 (31), 4440–4452. <https://doi.org/10.5897/AJAR12.614>.
16. Datta A. K. (2007) Porous Media Approaches to Studying Simultaneous Heat and Mass Transfer in Food Processes. I: Problem Formulations. *Journal of Food Engineering*, 80 (1), 80–95. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2006.05.013>.
17. Bart-Plange A., Addo A., Ofori H., Asare V. (2012) Thermal Properties of Gros Michel Banana Grown in Ghana. *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*, 7 (4), 478–484.
18. Dandamrongrak R., Young G., Mason R. (2002) Evaluation of Various Pre-Treatments for the Dehydration of Banana and Selection of Suitable Drying Models. *Journal of Food Engineering*, 55 (2), 139–146. [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(02\)00028-6](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(02)00028-6).
19. Esman R. I., Shub L. I. (2010) Mathematical Model of Moving Heat Carriers. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, (6), 53–59 (in Russian).
20. Usenov A. B., Samandarov D. I., Alimova D. K., Saparov Dj. E., Sultanov Sh. A. (2022) Study of Cellulose Extraction and Cavitation from Plant Raw Materials. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 1112, 012148. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1112/1/01214>.