



Определение теплофизических коэффициентов зерновоздушной смеси семян горчицы в условиях повышенной температуры

Алексей Петрович Евдокимов,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: apevdokimov@yandex.ru;

Алексей Андреевич Лещенко,
аспирант,
e-mail: leshchenko.el41@gmail.com

Волгоградский государственный аграрный университет, г. Волгоград, Российская Федерация

Реферат. Отмечено, что моделирование процесса высушивания пробы семян горчицы при термогравиметрическом измерении влажности позволит определить наиболее эффективные варианты конструкции сушильных камер. Семена горчицы в данном процессе представляют собой зерновоздушную смесь с определенными теплофизическими характеристиками. (*Цель исследования*) Измерить основные теплофизические коэффициенты зерновоздушной смеси горчицы для различных значений влажности при высокой температуре. (*Материалы и методы*) Использованы образцы семян горчицы влажностью от 3,24 до 15,07 процентов. Метод цилиндрического слоя позволяет равномерно распределить тепло при размещении нагревателя в центре слоя материала. Сконструированы экспериментальные установки для измерения коэффициентов теплопроводности и температуропроводности семян горчицы. Коэффициенты объемной и удельной теплоемкости определены расчетным путем. (*Результаты и обсуждение*) Построены графики зависимости коэффициентов теплопроводности, температуропроводности, объемной и удельной теплоемкости, а также объемной плотности зерновоздушной смеси семян горчицы от влажности. Найдены аппроксимирующие функции этих зависимостей в исследуемом диапазоне. (*Выводы*) В диапазоне влажности от 3,24 до 15,07 процентов коэффициент теплопроводности зерновоздушной смеси семян горчицы возрастает от 0,156 до 0,176 киловатта на метр и градус Кельвина; коэффициент температуропроводности повышается от $6,29 \cdot 10^{-8}$ до $7,70 \cdot 10^{-8}$ метр квадратный на секунду; объемная теплоемкость зерновоздушной смеси уменьшается с 2490,8 до 2286,9 килоджоуля на метр кубический и градус Кельвина. Установлено, что объемная плотность в том же диапазоне влажности сначала растет, а после достижения максимума при влажности около 7,5 процентов снижается. Удельная теплоемкость, напротив, уменьшается до точки минимума при влажности примерно 9 процентов, а затем возрастает.

Ключевые слова: семена горчицы, высушивание, зерновоздушная смесь, влажность, термогравиметрический метод, теплофизические свойства, теплопроводность, температуропроводность, теплоемкость.

■ **Для цитирования:** Евдокимов А.П., Лещенко А.А. Определение теплофизических коэффициентов зерновоздушной смеси семян горчицы в условиях повышенной температуры // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2024. Т. 18. №4. С. 86-93. DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-4-86-93. EDN: VWLFYX.

Scientific article

Thermophysical Coefficients of Mustard Seeds Grain-Air Mixture under High-Temperature Conditions

Aleksei P. Evdokimov,
Ph.D.(Eng.), associate professor,
e-mail: apevdokimov@yandex.ru;

Aleksei A. Leshchenko,
Ph.D.(Eng.) student,
e-mail: leshchenko.el41@gmail.com

Volgograd State Agrarian University, Volgograd, Russian Federation

Abstract. The paper highlights that modeling the drying process of mustard seed samples using thermogravimetric moisture measurement enables the identification of the most effective design options for drying chambers. In this process, mustard seeds form a grain-air mixture with specific thermophysical properties. (*Research purpose*) To measure the key thermophysical coefficients of the mustard grain-air mixture at different moisture content levels and high temperatures. (*Materials and methods*) Mustard seed samples with moisture content ranging from 3.24 to 15.07 percent were used. The cylindrical layer method enables uniform heat distribution by positioning the heater at the center of the material layer. Experimental setups were

designed to measure the thermal conductivity and thermal diffusivity coefficients of the mustard seeds, while the volumetric and specific heat capacity coefficients were calculated. (*Results and discussion*) Graphs illustrating the dependence of thermal conductivity, thermal diffusivity, volumetric and specific heat capacity, as well as the bulk density of the mustard seed grain-air mixture on moisture content were constructed. Approximating functions for these dependencies were identified within the studied range. (*Conclusions*) In the moisture content ranged from 3.24 to 15.07 percent, the thermal conductivity coefficient of the mustard seed grain-air mixture increases from 0.156 to 0.176 kW/(m·K); the thermal diffusivity coefficient rises from $6.29 \cdot 10^{-8}$ to $7.70 \cdot 10^{-8}$ m²/s; while the volumetric heat capacity of the mixture decreases from 2490.8 to 2286.9 kJ/(m³·K). It was found that the bulk density initially increases within the same moisture content range, reaching a maximum at around 7.5 percent, and then decreases. Conversely, the specific heat capacity decreases to a minimum point at approximately 9 percent moisture content, and then begins to rise.

Keywords: mustard seeds, drying, grain-air mixture, moisture content, humidity, thermogravimetric method, thermophysical properties, thermal conductivity, thermal diffusivity, heat capacity.

■ **For citation:** Evdokimov A.P., Leshchenko A.A. Thermophysical coefficients of mustard seeds grain-air mixture under high-temperature conditions. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2024. Vol. 18. N4. 86-93 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-4-86-93. EDN: VWLFYX.

Измерение влажности материала термогравиметрическим методом основано на прямом вычислении его значения через массу испарившейся при высушивании влаги. Внутри семян происходят сложные процессы тепло- и влагопереноса [1-3]. Схема тепло- и влагопереноса в устройстве измерения влажности пробы термогравиметрическим методом в общем виде приведена на *рисунке 1*. Тепло от источника, размещенного на некотором расстоянии от пробы, через воздушную среду передается находящимся в контейнере семенам. Испаряющаяся из семян влага выделяется в окружающую среду, а тепло передается контейнеру и от него окружающей воздушной среде.

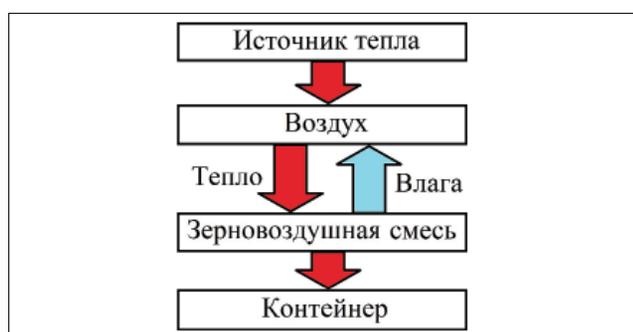


Рис. 1. Схема тепло- и влагопереноса при высушивании пробы семян горчицы для измерения влажности термогравиметрическим методом

Fig. 1. Diagram illustrating thermal and moisture conductivity during the drying of mustard seed sample used for thermogravimetric moisture measurement

Семена в контейнере могут располагаться в несколько слоев, тепло- и влагообмен происходит как в местах их соприкосновения, так и через воздушные промежутки между семенами [4, 5]. Образец с точки зрения процессов тепло- и влагообмена представляет собой сложную систему из семян и

воздуха между ними, которую при высушивании следует рассматривать как зерновоздушную смесь [6].

Термогравиметрический метод является перспективным направлением для создания новых и модернизации существующих приборов измерения влажности [7-10]. С помощью микропроцессорных средств и алгоритмов, разработанных с учетом свойств исследуемого материала, можно сократить время измерения, сохраняя низкую погрешность, свойственную приборам данного типа. Теплофизические свойства материала дают возможность для описания механизма высушивания и поиска эффективных режимов. Моделирование процесса позволит определить наилучший вариант конструкции сушильной камеры [11-13].

Теплофизические свойства сыпучих веществ, качественно характеризующих материалы, исследовались преимущественно в строительных, конструкционных материалах, горных породах и т.п. [14]. В отношении сыпучих сельскохозяйственных материалов теплофизические свойства известны лишь в диапазонах температуры, при которых происходят основные технологические процессы: уборка, сортировка, хранение, кондиционирование по влажности и т.п. [15]. В основном это диапазон от -10 до $+60$ °C.

Известно, что значения теплофизических параметров зависят от температуры и влажности материала [16]. Для семян горчицы теплофизические коэффициенты обычно определяются косвенно как результат расчета по известным их значениям для белков, липидов, углеводов, воды и других веществ в составе семян. Содержание воды является определяющей величиной в выражении значений теплофизических коэффициентов. Следует отметить, что это имеет значение только непосредственно для семян, а не для зерновоздушной смеси. В работе [17]

приводится сравнительный анализ теплофизических свойств двух сортов семян горчицы в широком диапазоне температуры, но не зависимости этих параметров от влажности.

При измерении влажности семян масличных культур высушивание проводится при 130 °С, однако данные о теплофизических свойствах при такой высокой температуре отсутствуют.

Задача моделирования процесса сушки связана с нахождением полей влагосодержания $u(x, y, z, \tau)$ и температуры $T(x, y, z, \tau)$. Температурное поле описывается уравнением теплопроводности, которое в декартовой системе координат имеет вид:

$$c\rho \cdot \frac{\partial T}{\partial \tau} = \lambda \cdot \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right), \quad (1)$$

где $c\rho$ – объемная теплоемкость материала (произведение удельной теплоемкости на объемную плотность), Дж/(м³·К); λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К); τ – время, с.

Коэффициент теплопроводности связан с другими тепловыми параметрами вещества выражением:

$$\lambda = a \cdot c\rho, \quad (2)$$

где a – коэффициент температуропроводности, м²/с.

Коэффициент температуропроводности a характеризует теплоинерционные свойства материала. Он, как и объемная теплоемкость, зависит от температуры, влажности и плотности материала. Очевидно, что численные значения коэффициентов в выражении (2) могут быть найдены через измерение двух из них и расчет третьей величины. Например, коэффициенты теплопроводности λ и температуропроводности a можно найти экспериментальным путем, а коэффициент объемной теплоемкости $c\rho$ – расчетным [18].

Получение аналитических формул для выражения теплофизических коэффициентов в отношении зерновоздушной смеси семян горчицы не представляется возможным. Задача осложняется тем, что семена горчицы по своей геометрической форме (рис. 2) представляют сфероид, т.е. эллипсоид, у которого диаметры по двум из трех осей равны, и задача плотнейшей упаковки для таких тел значительно сложнее, чем для сфер [19].

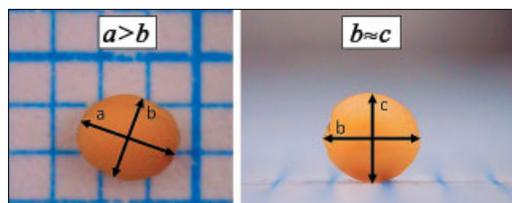


Рис. 2. Зерно горчицы в двух проекциях: a – длина; b – ширина; c – толщина

Fig. 2. Mustard seed shown in two projections: a – length; b – width; c – thickness

Таким образом, при построении модели тепло- и влагопереноса зерновоздушную смесь семян горчицы следует считать одним телом со своими значениями коэффициентов теплопроводности, температуропроводности и теплоемкости.

Цель исследования – измерить основные теплофизические коэффициенты зерновоздушной смеси горчицы для различных значений влажности при высокой температуре.

Материалы и методы. Для исследования теплофизических свойств зерновоздушной смеси горчицы был использован метод цилиндрического слоя материала. Данный метод позволяет равномерно распределять тепло при размещении нагревателя в центре слоя материала [20, 21].

Уравнение теплопроводности в этом случае удобнее записать, используя цилиндрическую систему координат:

$$c\rho \cdot \frac{\partial T(r, \tau)}{\partial \tau} = \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(r \cdot \lambda \cdot \frac{\partial T(r, \tau)}{\partial r} \right), \quad (3)$$

где r – радиус, отсчитываемый от оси цилиндрического слоя.

Коэффициенты тепло- и температуропроводности семян горчицы измеряли на экспериментальных установках (рис. 3).

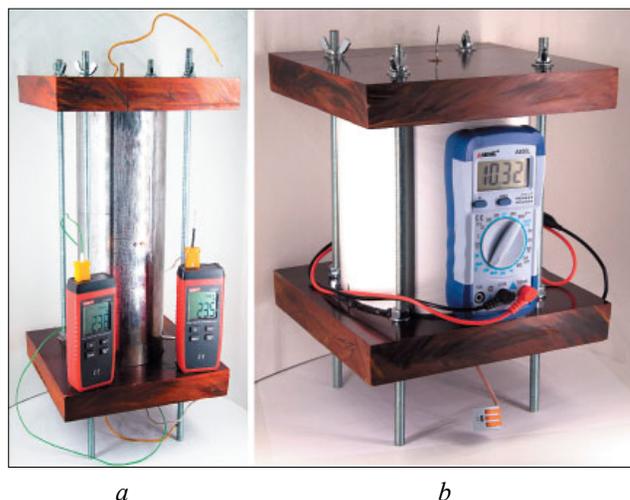


Рис. 3. Установки для измерения коэффициентов теплопроводности (а) и температуропроводности (б)
Fig. 3. Setups for measuring the thermal conductivity coefficient (a) and thermal diffusivity coefficient (b)

Установка для измерения коэффициента теплопроводности (λ) представляет собой две коаксиальные трубы длиной $l = 290$ мм с диаметрами $d_1 = 42,2$ мм и $d_2 = 101,4$ мм. Во внутренней трубе помещался электрический нагреватель, его мощность регулировалась с помощью лабораторного автотрансформатора. На внутренней поверхности внешней трубы и внешней поверхности внутренней трубы располагались термомпары, подключенные к

отдельным измерителям температуры. В полость между внутренней и внешней трубами помещались семена горчицы в виде цилиндрического слоя. Торцы труб закрыты карболитовыми плитами толщиной 31 мм. Для лучшей термоизоляции концов труб в местах их соприкосновения с торцевыми плитами уложено асбестовое волокно. Части конструкции фиксировались разборным шпилечным соединением.

После загрузки исследуемого материала и полной сборки установку переводили в горизонтальное положение. На нагревателе устанавливалась мощность, достаточная для того, чтобы при достижении стационарного теплового режима ($T_1 = const$, $T_2 = const$, $P = U \cdot I = const$) температура T_1 внутренней поверхности цилиндрического слоя семян была равна 130 ± 2 °С. В момент достижения такого режима фиксировались значения T_1 , T_2 и P .

В стационарном режиме коэффициент теплопроводности цилиндрического слоя семян может быть найден из выражения:

$$\lambda = \frac{P \cdot \ln\left(\frac{d_2}{d_1}\right)}{2 \cdot \pi \cdot l \cdot (T_1 - T_2)}, \quad (4)$$

где P – электрическая мощность нагревателя в стационарном тепловом режиме, Вт; d_1 и d_2 – внутренний и внешний диаметры цилиндрического слоя семян, м; l – длина цилиндрического слоя, м; T_1 и T_2 – температура соответственно внутренней и внешней поверхностей цилиндрического слоя, °С.

Установка для измерения коэффициента температуропроводности (рис. 3а) выполнена в виде цилиндрической трубы диаметром 150 мм и отрезка соосно расположенной нихромовой проволоки диаметром 1 мм такой же длины. В пространство между ними помещались семена, образующие цилиндрический слой. На расстоянии $r_0 = 10$ мм от нихромовой проволоки располагался терморезистор с отрицательным температурным коэффициентом, подключенный к измерителю сопротивления. По торцам установка закрыта карболитовыми плитами толщиной 31 мм. Концы нихромовой проволоки подключали к источнику переменного на-

пряжения $U = 3,3$ В. Экспериментально определено, что при таком напряжении за 30 секунд поверхность нихромовой проволоки нагревается до температуры 130 ± 2 °С.

Установка с семенами располагалась вертикально. С подачи на концы проволоки напряжения начинался отсчет времени до $\tau_{\text{мин}} = 30$ с, и напряжение отключалось. В течение 30 секунд измерялось сопротивление терморезистора внутри пробы семян. По достижении минимального сопротивления фиксировалось значение времени τ_{max} , соответствующее моменту наступления пиковой температуры в слое семян на расстоянии r_0 от нагревателя.

Расчетная формула для коэффициента температуропроводности имеет вид:

$$a = \frac{r_0^2}{4 \cdot \tau_{\text{max}}}, \quad (5)$$

где r_0 – расстояние от нагревательной проволоки до терморезистора, м; τ_{max} – время достижения пиковой температуры на терморезисторе с момента начала подачи импульса, с.

Значения объемной теплоемкости были найдены из выражения (2) как соотношение коэффициентов теплопроводности и температуропроводности: $cp = \lambda/a$.

Для расчета коэффициента удельной теплоемкости c через коэффициент объемной теплоемкости cp дополнительно измерены значения объемной плотности ρ путем взвешивания фиксированного объема зерновоздушной массы.

Определен диапазон влажности семян горчицы для исследования от 3,0 до 15,0%, соответствующий уровню влажности семян на предприятиях переработки семян горчицы. Семена, влажность которых находится за пределами этого диапазона, не должны подлежать дальнейшей переработке. Для исследования были подготовлены пробы семян влажностью 3,24% (подсушенные), 5,88% (исходные), 9,11, 11,87 и 15,07% (увлажненные). Для каждого из уровней влажности проводилось по три измерения. Данные обрабатывались с помощью программного обеспечения *Microsoft Excel* и *MathCAD*.

Таблица

Table

ЗНАЧЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ (λ), КОЭФФИЦИЕНТА ТЕМПЕРАТУРОПРОВОДНОСТИ (a), ОБЪЕМНОЙ ПЛОТНОСТИ (ρ), ОБЪЕМНОЙ ТЕПЛОЕМКОСТИ (cp) И УДЕЛЬНОЙ ТЕПЛОЕМКОСТИ (c)
VALUES OF THERMAL CONDUCTIVITY COEFFICIENT (λ), THERMAL DIFFUSIVITY COEFFICIENT (a), BULK DENSITY (ρ), VOLUMETRIC HEAT CAPACITY (cp) AND SPECIFIC HEAT CAPACITY (c)

Показатель	Влажность семян горчицы, %				
	3,24	5,88	9,11	11,87	15,07
$\lambda \cdot 10^3$, Вт/(м·К)	156,59±0,86	159,35±0,86	166,05±1,34	172,56±1,60	176,20±2,03
$a \cdot 10^8$, м ² /с	6,29±0,06	6,61±0,02	7,03±0,08	7,35±0,11	7,70±0,04
cp , кДж/(м ³ ·К)	2490,8±30,0	2411,4±17,9	2362,4±27,4	2346,8±37,9	2286,9±14,9
ρ , кг/м ³	667,05±2,78	674,83±1,05	683,62±1,96	663,04±7,76	644,01±3,01
c , кДж/(кг·К)	3,73±0,04	3,57±0,03	3,46±0,04	3,54±0,06	3,55±0,02

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ. Измеренные значения коэффициентов теплопроводности λ и температуропроводности a , объемной плотности ρ , а также рассчитанные с помощью выражения (2) значения объемной теплоемкости $ср$ и удельной теплоемкости с представлены в **таблице**. Проведена статистическая обработка данных, их средние значения для каждого уровня влажности W семян горчицы.

Получены зависимости коэффициентов теплопроводности и температуропроводности зерновоздушной смеси семян горчицы от влажности (рис. 4).

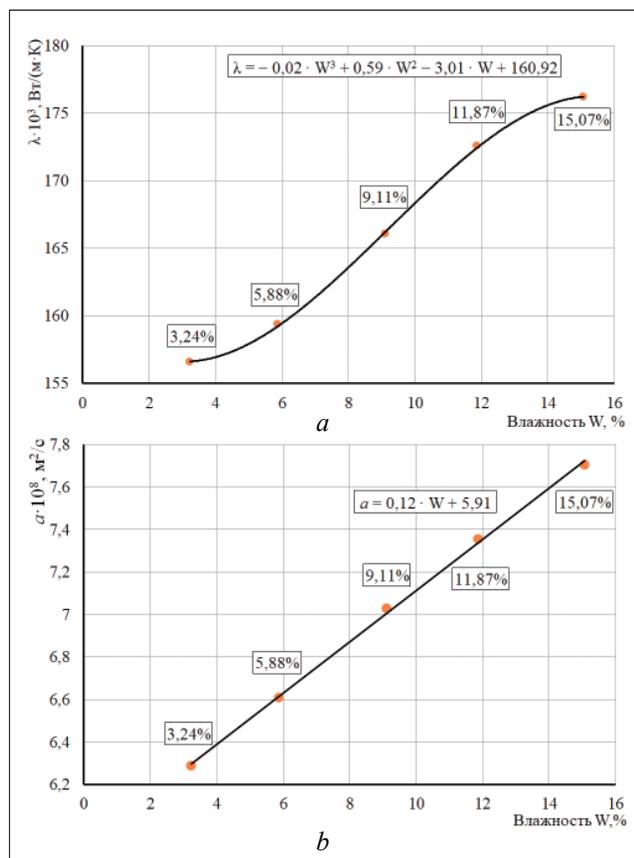


Рис. 4. Зависимость коэффициента теплопроводности (а) и коэффициента температуропроводности (б) зерновоздушной смеси семян горчицы от влажности

Fig. 4. Dependence of thermal conductivity of mustard seed grain-air mixture on moisture content

Увеличение коэффициента теплопроводности зерновоздушной смеси с увеличением ее влажности (рис. 4а) может быть связано с тем, что значение λ для сухой зерновоздушной смеси горчицы меньше, чем для воды [$\lambda_{\text{вода}} = 0,603 \text{ Вт/(м·К)}$]. Влага заполняет поры в семенах, вытесняя из них воздух, который препятствует прохождению тепла, поэтому по мере повышения влажности растет и коэффициент теплопроводности. Величина средней ошибки аппроксимации экспериментальных данных полиномиальной функцией третьего порядка $E_{\text{отн}} = 0,49\%$.

Аналогично изменяется коэффициент температуропроводности a (рис. 4б): его значение для сухой зерновоздушной смеси горчицы также меньше, чем для воды ($a_{\text{воды}} = 14,3 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2/\text{с}$). Средняя ошибка аппроксимации экспериментальных данных выражается линейной функцией $E_{\text{отн}} = 0,62\%$.

Расчетная зависимость объемной теплоемкости $ср$ зерновоздушной смеси семян горчицы от влажности представлена на рисунке 5а.

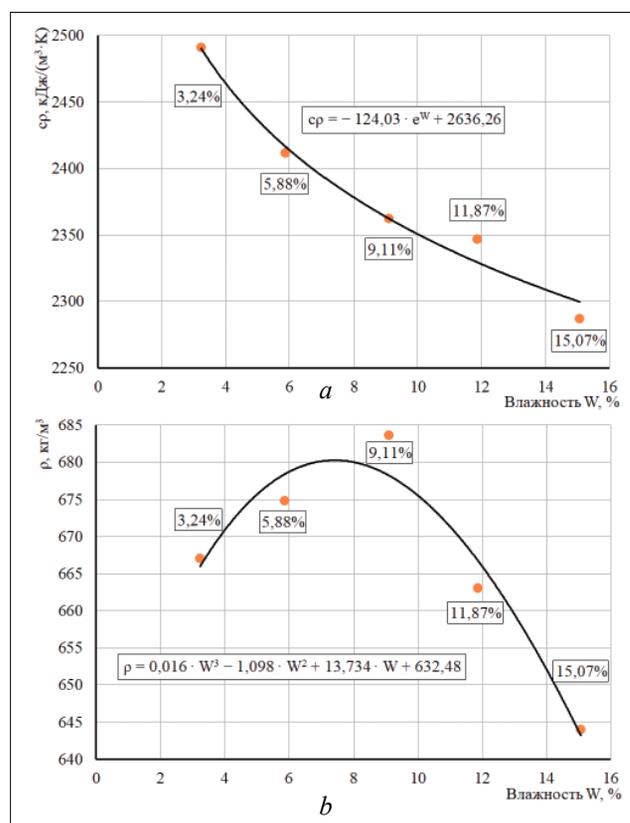


Рис. 5. Зависимость объемной теплоемкости $ср$ (а) и объемной плотности ρ (б) зерновоздушной смеси семян горчицы от влажности

Fig. 5. Dependence of volumetric heat capacity $ср$ (а) and bulk density ρ (б) of the mustard seed grain-air mixture on moisture content

В пределах заданного диапазона влажности наблюдается монотонное уменьшение объемной теплоемкости зерновоздушной смеси горчицы. С другой стороны, с ростом влажности объемная теплоемкость должна стремиться к значению воды, т.е. к $ср = 4200 \text{ кДж/(м}^3 \cdot \text{К)}$. Следовательно, должна быть точка минимума, в которой характер кривой изменится на увеличение, однако эта точка будет за пределами исследованной зоны влажности. Средняя ошибка аппроксимации экспериментальных данных $E_{\text{отн}} = 0,78\%$.

Также установлена зависимость объемной плотности зерновоздушной массы горчицы от влажности (рис. 5б). Сначала с ростом влажности пустоты

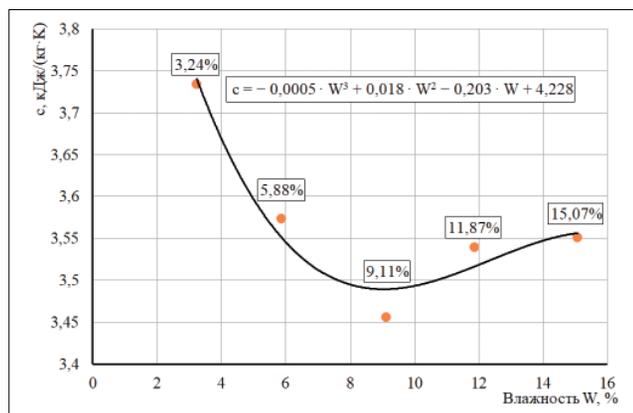


Рис. 6. Зависимость удельной теплоемкости c зерновоздушной смеси семян горчицы от влажности
Fig. 6. Dependence of specific heat capacity a of the mustard seed grain-air mixture on moisture content

в семенах наполняются влагой и плотность повышается до максимума при влажности примерно 7,5%, после чего происходит снижение. Это, вероятно, происходит из-за того, что семена начинают расширяться (разбухать), воздушные промежутки между ними увеличиваются, и плотность смеси падает.

Расчетная зависимость удельной теплоемкости зерновоздушной смеси семян горчицы от влажности представлена на *рисунке 6*.

Аппроксимирующая функция представлена в виде полинома третьего порядка при средней ошибке аппроксимации $E_{\text{отн}} = 0,86\%$. Так же, как и для объемной плотности, наблюдается смена характе-

ра динамики удельной теплоемкости в зависимости от влажности. По мере роста влажности зерновоздушной смеси горчицы сначала происходит снижение теплоемкости, а при влажности около 9% кривая плавно переходит в рост.

Выводы

Исследование теплофизических коэффициентов зерновоздушной смеси семян горчицы при температуре 130 °С в диапазоне влажности от 3,24 до 15,07% позволило установить следующее:

- коэффициент теплопроводности (λ) с увеличением влажности возрастает от 0,156 до 0,176 Вт/(м·К);
- коэффициент температуропроводности (a) с повышением влажности увеличивается от $6,29 \cdot 10^{-8}$ до $7,70 \cdot 10^{-8}$ м²/с;
- объемная теплоемкость ($c\rho$) зерновоздушной смеси уменьшается с 2490,8 до 2286,9 кДж/(м³·К).

Объемная плотность (ρ) в том же диапазоне влажности сначала растет, достигая точки максимума при влажности около 7,5%, а затем падает. Удельная теплоемкость (c), напротив, уменьшается до точки минимума при влажности примерно 9%, а затем возрастает.

Полученные зависимости теплофизических коэффициентов семян горчицы от влажности и их аппроксимирующие функции позволят учесть влияние влажности семян на процесс тепло- и влагообмена. Эти параметры будут использованы при моделировании процесса высушивания семян горчицы в сушильной камере устройства термогравиметрического измерения влажности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Загоруйко М.Г., Марин Р.А. Теплоперенос в зерновке при переменных режимах // *Аграрный научный журнал*. 2021. N7. С. 84-87. DOI: 10.28983/asjy2021i7pp84-87.
2. Павлов С.А., Пехальский И.А., Марин Р.А. Экспериментальные исследования теплопереноса в зерновке при осциллирующей сушке зерна // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2016. N4. С. 32-37.
3. Ольшанский А.И., Жерносек С.В., Гусаров А.М. Исследование теплообмена в процессах тепловой обработки и сушки теплоизоляционных материалов // *Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ*. 2022. Т. 65. N2. С. 156-168. DOI: 10.21122/1029-7448-2022-65-2-156-168.
4. Павлов С.А., Левина Н.С., Лукин И.Д. Исследование сушки селекционных семян в плотном слое // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2018. Т. 12. N1. С. 22-26. DOI: 10.22314/2073-7599-2018-12-1-22-26.
5. Сорочинский В.Ф., Догадин А.Л. Изменение полей влагосодержания и температуры в зерне при сушке // *Хранение и переработка сельхозсырья*. 2019. N1. С. 47-56. DOI: 10.36107/spfp.2019.78.
6. Юнин В.А., Захаров А.М., Кузнецов Н.Н., Зыков А.В. Процесс сушки измельченного растительного материала в барабанной сушилке // *Известия НВ АУК*. 2020. N1(57). С. 335-349. DOI: 10.32786/2071-9485-2020-01-33.
7. Каландаров П.И. Термогравиметрический метод измерения влажности: оценка точности и эффективность применения в агропромышленном комплексе // *Метрология*. 2021. N2. С. 44-62. DOI: 10.32446/0132-4713.2021-2-44-62.
8. Avezova N.I., Matyakubova P.M., Boboyev G.G. Ways to develop innovative processes in grain production. *ICISCT*. 2019. 1-4. DOI: 10.1109/ICISCT47635.2019.9012034.
9. Ерошенко Г.П., Шаруев Н.К., Шаруев В.Н., Евстафьев Д.П. Особенности разработки электротехнических устройств контроля параметров сельскохозяйственных продуктов // *Измерительная техника*. 2018. N10. С. 61-65. DOI: 10.32446/0368-1025it.2018-10-61-65.
10. Дринча В.М., Ценч Ю.С. Основы и перспективы развития технологий послеуборочной обработки зерна и подготовки семян // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2020. Т. 14. N4. С. 17-25. DOI: 10.22314/2073-7599-2020-14-4-17-25.

11. Шевцов А.А., Лыткина Л.И., Ткач В.В. и др. Моделирование тепловой обработки семян масличных культур высокотемпературным теплоносителем // *Хранение и переработка сельхозсырья*. 2018. N4. С. 163-171. DOI: 10.36107/spfp.2018.68.
12. Sorokovaya N.N., Snezhkin Yu.F., Shapar R.A., Sorokovoi R.Ya. Mathematical simulation and optimization of the continuous drying of thermolabile materials. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2019. Vol. 92. N3. 1180–1190. DOI: 10.1007/s10891-019-02032-3.
13. Глухарев В.А., Сивицкий Д.В., Попов И.Н., Верзилин А.А. Определение оптимальных режимов энергоэффективного процесса сушки зерна // *Аграрный научный журнал*. 2018. N5. С. 42-45. DOI: 10.28983/asj.v0i5.349.
14. Кутузов С.В., Васильченко Г.Н., Чирка Т.В., Панов Е.Н. Теплопроводность сырого и графитированного кокса // *Огнеупоры и техническая керамика*. 2013. N3. С. 29-33. DOI: 10.17073/1683-4518-2013-1-43-48.
15. Paziuk V. Study of the properties of rapeseed as a drying object. *Engineering, Energy, Transport AIC*. 2023. 86-93. DOI: 10.37128/2520-6168-2023-1-10.
16. Дранников А.В., Тертычная Т.Н., Шевцов А.А. и др. Исследование теплофизических характеристик зерна тритикале сорта Горка методом нестационарного теплового режима // *Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий*. 2021. Т. 83. N2(88). С. 17-22. DOI: 10.20914/2310-1202-2021-2-17-22.
17. Ropelewska E., Jankowski K.J., Zapotoczny P., Bogucka B. Thermophysical and chemical properties of seeds of traditional and double low cultivars of white mustard. *Zemdirbyste-Agriculture*. 2018. N105 (3). 257-264. DOI: 10.13080/z-a.2018.105.033.
18. Ходунков В.П., Заричняк Ю.П. Перспективные методы измерения теплопроводности твердых тел // *Известия вузов. Приборостроение*. 2022. Т. 65. N9. С. 668-676. DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-9-668-676.
19. Казаков А.Л., Лемперт А.А., Та Ч.Т. Вычислительный алгоритм для решения задачи упаковки шаров двух различных типов в трехмерное множество с неевклидовой метрикой // *Вычислительные методы и программирование*. 2020. Т. 21. N2. С. 152-163. DOI: 10.26089/NumMet.v21r213.
20. Пономарев С.В., Буланов Е.В., Буланова В.О., Дивин А.Г. Минимизация погрешностей измерения коэффициентов теплопроводности и температуропроводности теплоизоляционных материалов методом плоского импульсного источника теплоты // *Измерительная техника*. 2018. N12. С. 43-45. DOI: 10.32446/0368-1025it.2018-12-43-45.
21. Tумchik G. Improving the way of determination substances thermal physical characteristics by direct heating thermistor method. *Przegląd elektrotechniczny*. 2019. N1. 123-128. DOI: 10.15199/48.2019.04.21.

REFERENCES

1. Zagoruiko M., Marin R. Heat and mass transfer in the grain under variable conditions. *Agrarian Scientific Journal*. 2021. 84-87 (In Russian). DOI: 10.28983/asj.y2021i7pp84-87.
2. Pavlov S.A., Pekhal'skiy I.A., Marin R.A. Experimental studies of mass transfer in caryopsis at grain oscillating drying. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2016. N4. 32-37 (In Russian).
3. Ol'shanskii A.I., Zhernosek S.V., Gusarov A.M. Investigation of heat and mass transfer in the processes of heat treatment and drying of thermal insulation materials. *Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*. 2022. Vol. 65. N2. 156-168 (In Russian). DOI: 10.21122/1029-7448-2022-65-2-156-168.
4. Pavlov S.A., Levina N.S., Lukin I.D. Research of selection seeds drying in dense layer. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2018. Vol. 12. N1. 22-26 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2018-12-1-22-26.
5. Sorochinsky V.F., Dogadin A.L. Change of limits for humidity and temperature when drying grain crops. *Storage and Processing of Farm Products*. 2019. N1. 47-56 (In Russian). DOI: 10.36107/spfp.2019.78.
6. Yunin V.A., Zakharov A.M., Kuznetsov N.N., Zykov A.V. The drying process of crushed plant material in a drum dryer. *Proceedings of the Lower Volga Agro-University Complex*. 2020. N1(57). 335-349 (In Russian). DOI: 10.32786/2071-9485-2020-01-33.
7. Kalandarov P.V. Assessment of the accuracy of the thermogravimetric method for measuring humidity and the effectiveness of the application of this method in the agro-industrial complex. *Metrology*. 2021. N2. 44-62 (In Russian). DOI: 10.32446/0132-4713.2021-2-44-62.
8. Avezova N.I., Matyakubova P.M., Boboyev G.G. Ways to Develop Innovative Processes in Grain Production. *ICISCT*. 2019. N1-4 (In English). DOI: 10.1109/ICISCT47635.2019.9012034.
9. Eroshenko G.P., Sharuev N.K., Sharuev V.N., Evstafyev D.P. Design features electrical devices control parameters of agricultural products. *Measurement Techniques*. 2018. N10. 61-65 (In Russian). DOI: 10.32446/0368-1025it.2018-10-61-65.
10. Drincha V.M., Tsench Yu.S. Fundamentals and prospects for the technologies development for post-harvest grain processing and seed preparation. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2020. Vol. 14. N4. 17-25 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2020-14-4-17-25.
11. Shevtsov A.A., Lytkina L.I., Tkach V.V. et al. Modeling of heat treatment of oilseeds high temperature coolant. *Storage and Processing of Farm Production*. 2018. N4. 163-171 (In Russian). DOI: 10.36107/spfp.2018.68.
12. Sorokovaya N.N., Snezhkin Yu.F., Shapar R.A., Sorokovoi R.Ya. Mathematical simulation and optimization of the continuous drying of thermolabile materials. *Journal of*

- Engineering Physics and Thermophysics*. 2019. Vol. 92. N3. 1180-1190 (In English). DOI: 10.1007/s10891-019-02032-3.
13. Glucharev V.A., Sivitskiy D.V., Popov I.N., Verzilin A.A. Optimization of parameters of energy unit drying agent for grain crops drying. *Agrarian Scientific Journal*. 2018. N 5. 42-45 (In Russian). DOI: 10.28983/asj.v0i5.349.
 14. Kutuzov S.V., Vasil'chenko G.N., Chirka T.V., Panov E.N. Heat conductivity of carbon materials. *New Refractories*. 2013. N1. 43-48 (In Russian). DOI: 10.36107/spfp.2018.68.
 15. Paziuk V. Study of the properties of rapeseed as a drying object. *Engineering, Energy, Transport AIC*. 2023. 86-93 (In English). DOI: 10.37128/2520-6168-2023-1-10.
 16. Drannikov A.V., Tertychnaya T.N., Shevtsov A.A. et al. Investigation of the thermophysical characteristics of the Gorka variety triticale grain by the non-stationary thermal regime method. *Proceedings of VSUET*. 2021. Vol. 83. N2. 17-22 (In Russian). DOI: 10.20914/2310-1202-2021-2-17-22.
 17. Ropelewska E., Jankowski K.J., Zapotoczny P., Bogucka B. Thermophysical and chemical properties of seeds of traditional and double low cultivars of white mustard. *Zemdirbyste-Agriculture*. 2018. N105 (3). 257-264 (In English). DOI: 10.13080/z-a.2018.105.033.
 18. Khodunkov V.P., Zarichnyak Yu.P. Promising methods for measuring the thermal conductivity of solids. *Journal of Instrument Engineering*. 2022. Vol. 65. N9. 668-676 (In Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-9-668-676.
 19. Kazakov A.L., Lempert A.A., Ta T.T. An algorithm for packing balls of two types in a three-dimensional set with a non-euclidean metric. *Numerical Methods and Programming*. 2020. 21. N2. 152-163 (In Russian). DOI: 10.26089/NumMet.v21r213.
 20. Ponomarev S.V., Bulanov E.V., Bulanova V.O., Divin A.G. Minimizing the errors of heat-insulating materials heat conductivity and thermal diffusivity measuring by the method of plane pulse source of heat. *Measurement Techniques*. 2018. N12. 43-45 (In Russian). DOI: 10.32446/0368-1025it.2018-12-43-45.
 21. Tymchik G. Improving the way of determination substances thermal physical characteristics by direct heating thermistor method. *Przegląd elektrotechniczny*. 2019. N1. 123-128 (In English). DOI: 10.15199/48.2019.04.21.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Заявленный вклад соавторов:

Евдокимов А.П. – научное руководство, участие в разработке плана исследования, анализе полученных экспериментальных данных, обсуждении материалов статьи, разработка рекомендаций, критический анализ и доработка текста;

Лещенко А.А. – поиск литературы в отечественных и зарубежных источниках, получение экспериментальных данных и их первичный анализ, подготовка текста статьи.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Coauthors' contribution:

Evdokimov A.P. – scientific guidance, participation in the development of the research plan, analysis of the experimental data, discussion of the article materials, development of recommendations, critical analysis and revision of the manuscript;

Leshchenko A.A. – literature search in domestic and foreign sources, obtaining experimental data and their primary analysis, preparation of the manuscript.

The authors read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию
Статья принята к публикации

The paper was submitted to the Editorial Office on
The paper was accepted for publication on

28.08.2024
30.10.2024