

ФАЗОВОЕ КОНЦЕНТРАЦИОННОЕ РАВНОВЕСИЕ ПРИ СУШКЕ КОЛЛОИДНОГО КАПИЛЛЯРНО-ПОРИСТОГО МАТЕРИАЛА - ГОРОХА

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

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

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

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

Галина Альбертовна Зуева (ORCID 0000-0003-0696-4460)*

Кафедра высшей и прикладной математики, Ивановский государственный химико-технологический университет, Шереметевский пр., 7, Иваново, Российская Федерация, 153000

E-mail: galina@isuct.ru *

В данной работе экспериментально изучено фазовое концентрационное равновесие при сушке коллоидного капиллярно-пористого материала – гороха. Исследования проведены статическим (эксикаторным) методом с применением насыщенных водных растворов минеральных солей, с помощью которых создавалась определенная относительная влажность воздуха в эксикаторах. Для установления равновесия образцы выдерживали в эксикаторах в течение 1 мес. Значения относительной влажности воздуха над растворами солей при соответствующих температурах находили по известной диаграмме Шнайдера. Определяли изотермы десорбции влаги, для чего в эксикаторы помещали высоковлажные образцы гороха. Опыты проведены при трех температурах: 30, 40 и 50 °С. По данным измерений были построены изотермы десорбции влаги в координатах «относительная влажность воздуха-равновесное влагосодержание материала». Полученные изотермы десорбции были описаны уравнением Гендерсона, для которого были найдены значения коэффициентов этого уравнения и дана их статистическая оценка. Проведено сопоставление данных по равновесию гороха с аналогичными данными для других растительных коллоидных капиллярно-пористых материалов: овощей (нарезок моркови и свеклы), зерновых культур (зерновок ржи, пшеницы и кукурузы), семян овощных культур. Показано существенное влияние вида культуры на равновесное влагосодержание материала при сушке, тогда как внутривидовое влияние на равновесное влагосодержание имеет меньшее значение. Полученные данные по изотермам десорбции влаги при сушке могут быть использованы для инженерных расчетов кинетики сушки зерна гороха и для выбора температурно-влажностных условий его хранения после сушки.

Ключевые слова: сушка, фазовое концентрационное равновесие, уравнение Гендерсона, эксикаторный метод, горох

PHASE CONCENTRATION EQUILIBRIUM DURING DRYING COLLOID CAPILLARY-POROUS MATERIAL - PEA

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

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

Department of Heat Engineering, Hydraulics and Enterprises Energy Supply, Russian State Agrarian University – MAA named after K.A. Timiryazev, Timiryazevskaya st., 49, Moscow, 127434, Russia

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

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

Department of Higher and Applied Mathematics, Ivanovo State University of Chemistry and Technology, Shere-metevskiy ave., 7, Ivanovo, 153000, Russia

E-mail: galina@isuct.ru

In this work, we studied experimentally the phase concentration equilibrium during drying of a colloidal capillary-porous material - peas. The studies were carried out by a static (exsicator) method using saturated aqueous solutions of mineral salts, with the help of which certain relative air humidity was created in the desiccators. To establish equilibrium, the samples were kept in desiccators for one month. The values of relative air humidity over salt solutions at the corresponding temperatures were found from the well-known Schneider diagram. Moisture desorption isotherms were determined, for which high-moisture pea samples were placed in exsicators. The experiments were carried out at three temperatures: 30, 40 and 50 °C. According to the measurement data, moisture desorption isotherms were constructed in the coordinates "relative air humidity - equilibrium moisture content of the material." The resulting desorption isotherms were described by the Henderson equation, for which the values of the coefficients of this equation were found and their statistical evaluation was given. The data on the balance of peas were compared with similar data for other plant colloidal capillary-porous materials: vegetables (carrot and beet cuts), grain crops (rye, wheat and corn grains), and vegetable seeds. A significant influence of the type of culture on the equilibrium moisture content of the material during drying is shown, while the intraspecific influence on the equilibrium moisture content is less important. The obtained data on moisture desorption isotherms during drying can be used for engineering calculations of the kinetics of drying pea grain and for choosing the temperature and humidity conditions for its storage after drying.

Key words: drying, phase concentration equilibrium, Henderson equation, desiccator method, peas

Для цитирования:

Рудобашта С.П., Бабичева Е.Л., Зуева Г.А. Фазовое концентрационное равновесие при сушке коллоидного капиллярно-пористого материала - гороха. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2024. Т. 67. Вып. 2. С. 104–110. DOI: 10.6060/ivkkt.20246702.6811.

For citation:

Rudobashta S.P., Babicheva E.L., Zueva G.A. Phase concentration equilibrium during drying colloid capillary-porous material - pea. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2024. V. 67. N 2. P. 104–110. DOI: 10.6060/ivkkt.20246702.6811.

ВВЕДЕНИЕ

Знание равновесного влагосодержания материала применительно к процессу сушки необходимо для определения направления протекания процесса, который будет происходить (сушка или увлажнение материала), расчета кинетики сушки (поскольку движущей силой процесса является разность между фактическим и равновесным влагосодержанием) и правильного выбора условий хранения высушенного материала. Теоретические основы по использованию данных о фазовом концентрационном равновесии материала при расчете тепломассопереноса в процессе сушки изложены в [1]. Справочная литература [2-5], ряд научных статей [6-11] содержат сведения по равновесному влагосодержанию отдельных материалов. Однако, они далеко не полные и получены во многих случаях

при комнатной температуре [12], что затрудняет их использование в технических расчетах. Пополнение этих данных имеет несомненное практическое значение.

Важное значение имеет также обобщение и классификация данных по фазовому концентрационному равновесию в системе «материал-влажный воздух» поскольку индивидуальных материалов очень много, а экспериментальные данные ограничены. При этом надо учитывать не только класс материала (непористый материал, капиллярно-пористый или коллоидный капиллярно-пористый [13]), но и другие факторы, существенные для равновесия. Для растительных коллоидных капиллярно-пористых материалов таким фактором, в первую очередь, является принадлежность материала к определенной культуре: зерновая, зернобобовая,

масличная. Отметим, что применительно к процессу сушки необходимы сведения по равновесию не только при комнатной, но и при повышенных температурах.

Сведения по десорбционному равновесию зерен гороха при различных температурах отсутствуют, однако практическая потребность в таких данных имеется. Поэтому целью данной работы было получение изотерм десорбции влаги для зерен гороха при различных температурах и их сопоставление с изотермами других коллоидных капиллярно-пористых растительных материалов. Отметим, что горох чувствителен к воздействию повышенных температур при сушке (зерна из-за температурных перепадов в зерновках могут раскалываться), поэтому его сушат при невысоких температурах (максимальная температура зерна гороха 40-45 °С).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследования проводили с зерном гороха сорта «Слован» продовольственного типа (подтип «желтый») статическим (эксикаторным) методом. Для этого образцы зерен гороха помещали в эксикаторы в атмосферу воздуха определенной относительной влажности, влажность воздуха в том или ином эксикаторе создавали с помощью насыщенных растворов определенных солей. В опытах были использованы следующие соли: LiCl, MgCl₂, NaNO₂, NaNO₃, KCl, каждая из которых, находясь в насыщенном водном растворе, создает над раствором определенную относительную влажность воздуха. Значения относительной влажности воздуха брали по данным [14]. Опыты проводили при трех температурах: 30 °С, 40 °С и 50 °С. Для получения нужного температурного режима эксикаторы с исследуемыми образцами гороха помещали в сушильный шкаф ШС-80-01СПУ с установленной на заданном уровне температурой и выдерживали их там для установления равновесия в течение 1 мес. Температура в шкафу поддерживалась автоматически с помощью терморегулятора – с погрешностью ±0,5 °С. По истечении 1 мес. эксикаторы с образцами гороха из шкафа вынимали и определяли влагосодержание гороха весовым методом по ГОСТ 28561-90 «Продукты переработки плодов и овощей. Методы определения сухих веществ или влаги». Для определения веса образцов использовали лабораторные весы марки «Scale Cas MWP-300» электронного типа. Погрешность весов составляла не более 0,01 г, до взвешиваемой массы в 50 г.

РЕЗУЛЬТАТЫ ОПЫТОВ И ИХ АНАЛИЗ

В табл. 1 приведены наименования солей, создаваемые с их помощью значения относительной влажности воздуха [14] в эксикаторах и найденные в опытах значения равновесного влагосодержания u_p . Поскольку помещаемые в эксикаторы зерна гороха имели высокую естественную начальную влажность, то в процессе установления равновесия они отдавали излишки влаги и, следовательно, равновесие достигалось путем десорбции из них влаги. Это обстоятельство имеет большое практическое значение, т.к. известно [15], что на кривых равновесия капиллярно-пористых коллоидных материалов наблюдается сорбционный гистерезис, а именно: изотермы десорбции проходят выше изотерм сорбции. В расчетах кинетики сушки необходимо использовать именно равновесное влагосодержание, достигнутое путем десорбции, что и имело место в опытах.

Полученные экспериментальные данные по равновесию при температурах 30 °С, 40 °С и 50 °С представлены в табл. 1. По ним построены графики изотерм десорбции влаги, приведенные на рис. 1.

Таблица 1

Относительная влажность воздуха над насыщенными растворами солей и найденные в опытах значения u_p

Table 1. Relative air humidity over saturated salt solutions and the values of u_p found in experiments

| Соль | при $t = 30$ °С | | при $t = 40$ °С | | при $t = 50$ °С | |
|-------------------|-----------------|-------------------------|-----------------|-------------------------|-----------------|-------------------------|
| | φ , % | u_p , кг/(кг сух. м.) | φ , % | u_p , кг/(кг сух. м.) | φ , % | u_p , кг/(кг сух. м.) |
| LiCl | 11 | 0,052 | 11 | 0,035 | 10,8 | 0,030 |
| MgCl ₂ | 33 | 0,086 | 32 | 0,069 | 31 | 0,056 |
| NaNO ₂ | 63 | 0,0131 | 61 | 0,107 | 61 | 0,087 |
| NaNO ₃ | 73 | 0,163 | 71 | 0,131 | 70 | 0,106 |
| KCl | 84 | 0,217 | 83 | 0,194 | 83 | 0,166 |

Как видно из рис. 1, изотермы десорбции $u_p - f(\varphi)$ имеют типичный для капиллярно-пористых коллоидных материалов вид и относятся к четвертому типу изотерм сорбции по классификации Брунауэра [15]. С увеличением температуры равновесное влагосодержание снижается.

Полученные изотермы десорбции для удобства инженерных расчетов описали математически – термодинамическим уравнением Гендерсона, имеющим вид [16]

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

где u_p – равновесное влагосодержание гороха, кг/(кг сух. м-ла); T – температура, К; φ – относительная влажность воздуха, доли; a , b – коэффициенты уравнения.

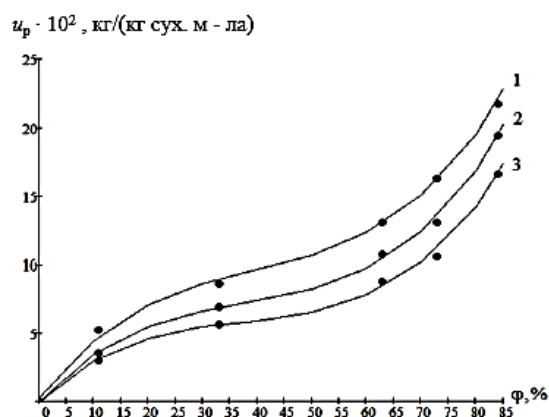


Рис. 1. Изотермы десорбции влаги для гороха: 1 - $t = 30$ °C; 2 - $t = 40$ °C; 3 - $t = 50$ °C

Fig. 1. Moisture desorption isotherms for peas: 1 - $t = 30$ °C; 2 - $t = 40$ °C; 3 - $t = 50$ °C

Для этого, прологарифмировав правую и левую часть уравнения (1), записали его в виде

$$\ln u_p = b \ln(a/T) + b \ln(-\ln(1-\varphi)) = A + b \ln(-\ln(1-\varphi)), \quad (2)$$

где $A = b \ln(a/T)$.

Уравнение (2) при $T = \text{const}$ выражает линейную зависимость между величинами $\ln(-\ln(1-\varphi))$ и $\ln u_p$. Обработкой опытных равновесных данных, полученных при разных значениях температуры, с использованием метода наименьших квадратов (МНК) [17] получили следующие значения констант в уравнении (2):

при $t = 30$ °C $a = 6,242$, $b = 0,499$;

при $t = 40$ °C $a = 8,179$, $b = 0,584$;

при $t = 50$ °C $a = 5,706$, $b = 0,574$.

Далее нашли среднее арифметическое полученных коэффициентов: $a = 6,740$, $b = 0,554$ и рассчитали по уравнению (1) значения равновесного влагосодержания u_p при этих значениях коэффициентов для разных температур T . На основании расчетных и экспериментальных данных построили корреляционный квадрат, по горизонтальной оси которого отложили экспериментальные значения u_p , а по вертикальной – соответствующие расчетные значения. Как видно из рис. 2, изображающего корреляционный квадрат, расчетные значения u_p удовлетворительно согласуются с экспериментальными. Это показывает корректность обработки экспериментальных данных на основе уравнения Гендерсона и нахождения коэффициентов данного уравнения a и b .

Степень адекватности η^2 математической модели, представленной уравнением (1), с полученными значениями коэффициентов a и b , рассчитывали по уравнению

$$\eta^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\Phi_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (\Phi_i - \bar{y})^2 + \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}. \quad (3)$$

Здесь приближаемая функция $y = f(x)$ задана таблицей своих значений:

$y_i = f(x_i)$, $i = 1, 2, \dots, n$ и имеется некоторая приближающая функция $\Phi(x)$. Вычислим значения функции $\Phi(x)$ в табличных точках: $\Phi_i = \Phi(x_i)$, $i = 1, 2, \dots, n$. Среднее для приближаемой функции находится по следующей формуле:

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i.$$

$u_p \cdot 10^2$, кг/(кг сух. м-ла),
расчет

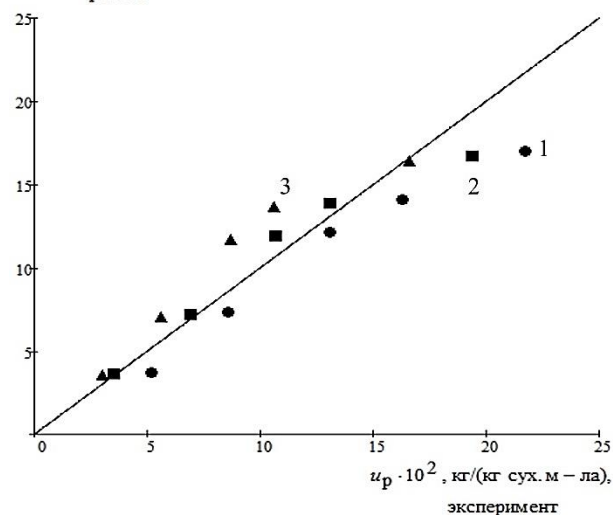


Рис. 2. Корреляционный квадрат, расчетные и экспериментальные значения равновесного влагосодержания гороха:

● - $t = 30$ °C; ■ - $t = 40$ °C; ▲ - $t = 50$ °C

Fig. 2. Correlation square, calculated and experimental values of the equilibrium moisture content of peas: ● - $t = 30$ °C; ■ - $t = 40$ °C; ▲ - $t = 50$ °C

Для определения степени адекватности модели воспользовалась шкалой Чеддока [18]:

| η^2 | Степень адекватности модели |
|----------|-----------------------------|
| 0,1-0,3 | слабая |
| 0,5 | умеренная |
| 0,7 | заметная |
| 0,9 | высокая |
| 0,99 | весьма высокая |

Среднее квадратическое отклонение рассчитывали по формуле:

$$T^* = \frac{1}{\sqrt{n}} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \Phi(x_i))^2} \quad (4)$$

Степень адекватности математической модели оказалась равной $\eta^2 = 0,86$ (практически, высокая), среднее квадратическое уклонение $T^* = 2,04$.

Данные по коэффициентам a и b в уравнении Гендерсона для гороха были сопоставлены с аналогичными коэффициентами для других культур с тем, чтобы выяснить влияние вида культуры на эти коэффициенты. Результаты сопоставления приведены в табл. 2. Равновесное влагосодержание, приведенное в табл. 2, рассчитано по уравнению (1).

Как видно из таблицы, коэффициент « b », который описывает зависимость равновесного влагосодержания от относительной влажности воздуха, имеет наибольшее значение у нарезанных моркови и свеклы, у гороха он ниже, чем у этих культур, но выше, чем у остальных, показанных в таблице.

Коэффициент « a », который в совокупности с коэффициентом « b » отвечает за температурную зависимость изотермы десорбции, имеет наибольшее значение у гороха. Наименьшее значение коэффициента « a » наблюдается у семян лука репчатого. Значения коэффициентов « a » и « b » тех или иных культур зависят от их индивидуального морфологического строения.

К изложенному следует добавить следующее: значения равновесных влагосодержаний у нарезок моркови и свеклы при одних и тех значениях относительной влажности воздуха имеют большие значения, чем у других культур. Так, при $\varphi = 0,84$ и $t = 30$ °С экспериментальные значения величины u_p у гороха и нарезок моркови и свеклы составляют:

- горох: 0,217 кг/ (кг сух. м-ла);
- нарезка моркови: 0,0772 кг/ (кг сух. м-ла);
- нарезка свеклы: 0,0717 кг/ (кг сух. м-ла);

т. е. при одних и тех же значениях φ и t равновесное влагосодержание гороха в три раза больше, чем у нарезок моркови и свеклы.

Сравним далее экспериментальные данные по равновесию зерен кукурузы при $\varphi = 0,85$, $t = 36$ °С [7], а также семян лука репчатого и семян горчицы белой $\varphi = 0,85$ и $t = 37$ °С [6].

- зерна кукурузы: $u_p = 0,167$ кг/(кг сух. м-ла);
- семена лука репчатого: $u_p = 0,184$ кг/(кг сух. м-ла);
- семена горчицы белой: $u_p = 0,162$ кг/(кг сух. м-ла).

Как видно из этих данных, различия в значениях равновесных влагосодержаний зерен кукурузы и семян овощных культур не столь велики, как у предыдущей группы материалов, что объясняется схожестью морфологических строений этих материалов.

Таблица 2

Сравнение коэффициентов a и b в уравнении Гендерсона для различных материалов*
 Table 2. Comparison of the coefficients a and b in the Henderson equation for different materials*

| Материал | Коэффициент a | Коэффициент b | Температура, °С | Источник |
|---|-----------------|-----------------|-----------------|---------------|
| Зернобобовые: | | | | |
| 1. Горох | 6,740 | 0,554 | 30-50 | данная работа |
| Овощи: | | | | |
| 2.Нарезанная морковь | 2,024 | 0,658 | 30-50 | [11] |
| 3.Нарезанная свекла | 1,490 | 0,637 | 30-50 | [19] |
| Зерновые: | | | | |
| 4. Пшеница и рожь | 2,270 | 0,375 | не указано | [6] |
| 5. Зерна кукурузы: | | | | |
| - сорт кукурузы «Пионер ПР-8521»; | 2,043 | 0,419 | 24-48 | [7] |
| - сорт кукурузы «Пионер ПР-7709 ФАО 160»; | 2,778 | 0,452 | 24-48 | [7] |
| - сорт кукурузы «Майсодур Амелиор Ф-70» | 2,629 | 0,448 | 24-48 | [7] |
| Семена овощных культур: | | | | |
| 6. Семена лука репчатого | 1,300 | 0,370 | 37 | [6] |

Примечание: *- значения коэффициента « a » в [6] приведены для случая, когда u_p рассчитывается в процентах, здесь они для сопоставимости результатов литературных данных с данными данной работы пересчитаны в величины, когда u_p выражается в долях

Note: *- the values of the coefficient “ a ” in [6] are given for the case when u_p is calculated as a percentage; here, for the comparability of the results of literature data with the data of this work, they are recalculated into values when u_p is expressed in shares

Проведенный анализ показывает, что, наряду с параметрами «а» и «b» уравнения Гендерсона, на равновесное влагосодержание значительно влияет принадлежность материала к определенному виду культур.

Данные по равновесию зерен гороха могут быть использованы для расчета кинетики их сушки (например, на основе математических моделей, приводимых в [20-22]), а также для выбора параметров воздушной среды при их хранении. Отметим, что данные по фазовому концентрационному равновесию высушиваемых материалов так же важны для кинетического расчета процесса сушки, как и данные по массопроводности, последние пополняются новыми результатами, например, [23, 24]).

ВЫВОДЫ

Полученные экспериментальные данные по фазовому концентрационному равновесию при

сушке зерна гороха могут быть использованы в инженерных расчетах кинетики сушки и выборе условий хранения высушенного материала.

Показана применимость уравнения Гендерсона для описания изотерм десорбции влаги исследованного материала, найдены численные значения коэффициентов этого уравнения, что позволяет использовать его на практике.

Проведено сопоставление данных по равновесию зерен гороха с данными по равновесию других растительных коллоидных капиллярно-пористых материалов, показано, что видовая принадлежность материала существенна для значений равновесного влагосодержания, тогда как различия равновесных влагосодержаний в пределах культуры одного вида менее значимы.

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

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

ЛИТЕРАТУРА

1. **Bergman Theodore L., Lavine Adrienne S., Incropera Frank P., David P. Dewitt.** Fundamentals of Heat and Mass Transfer. John Hoboken, NJ: Wiley & Sons, Inc. 2011. 1076 p.
2. **Атаназевич В.И.** Сушка пищевых продуктов. Справочное пособие. М.: ДеЛи. 2000. 295 с.
3. Handbook of Industrial Drying. Ed. by A.S. Mujumdar. Boca Raton, FL: RC/Taylor & Francis. 2007. 1280 p.
4. **Kudra T., Mujumdar A.S.** Advanced Drying Technologies. New York and Basel: Marcel Dekker, Inc. 2002. 459 p.
5. Drying of Foods, Vegetables and Fruits. V. 2. Ed. by V. Jangam Sachin, Law Chung Lim, Mujumdar Arun S. 2011. 220 p.
6. **Рудобашта С.П., Зуева Г.А., Зуев Н.А.** Гигроскопические свойства семян. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2015. Т. 58. Вып. 1. С. 68-71.
7. **Рудобашта С.П., Муравлева Е.А., Зуева Г.А.** Равновесное влагосодержание семян кукурузы. *Наука в Центр. России.* 2017. №6 (30). С. 69-78.
8. Modern Drying Technology. 5 V. Set. Ed. by Tsotsas Evangelos, Mujumdar Arun S. Germany. Weinheim: Wiley VCH Verlag GmbH and Co., KGaA. 2014. 1984 p.
9. **Rudobashta S.P., Zueva G.A., Kuteinikov V.I.** Phase Concentration Equilibrium of Seeds the Sunflower. *Russ. J. Gen. Chem.* 2021. V. 9. N 6. P. 1-4. DOI: 10.1134/S1070363221060372.
10. **Kiranoudis C.T., Maroulis Z.B., Tsami E., Marinou-Kouris D.** Equili moisture content and heat of desorption of some vegetables. *J Food Eng.* 1993. V. 20. P. 55-74. DOI: 10.1016/0260-8774(93)90019-G.
11. **Рудобашта С.П., Зуева Г.А., Столбова А.С.** Концентрационное равновесие при сушке коллоидных капиллярно-пористых растительных материалов. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2022. Т. 65. Вып. 6. С. 75-80. DOI: 10.6060/ivkkt.20226506.6567.
12. **Никитина Л.М.** Таблицы равновесного удельного влагосодержания и энергии связи влаги с материалами. М.-Л.: Госэнергоиздат. 1963. 174 с.

REFERENCES

1. **Bergman Theodore L., Lavine Adrienne S., Incropera Frank P., David P. Dewitt.** Fundamentals of Heat and Mass Transfer. John Hoboken, NJ: Wiley & Sons, Inc. 2011. 1076 p.
2. **Atanazevich V.I.** Drying food. Reference manual. M.: DeLi. 2000. 295 p. (in Russian).
3. Handbook of Industrial Drying. Ed. by A.S. Mujumdar. Boca Raton, FL: RC/Taylor & Francis. 2007. 1280 p.
4. **Kudra T., Mujumdar A.S.** Advanced Drying Technologies. New York and Basel: Marcel Dekker, Inc. 2002. 459 p.
5. Drying of Foods, Vegetables and Fruits. V. 2. Ed. by V. Jangam Sachin, Law Chung Lim, Mujumdar Arun S. 2011. 220 p.
6. **Rudobashta S.P., Zueva G.A., Zuev N.A.** Hygroscopic properties of seeds. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.].* 2015. V. 58. N 1. P. 68-71 (in Russian).
7. **Rudobashta S.P., Muravleva E.A., Zueva G.A.** Corn seed equilibrium moisture content. *Nauka Tsentr. Rossii.* 2017. N 6 (30). P. 69-78 (in Russian).
8. Modern Drying Technology. 5 V. Set. Ed. by Tsotsas Evangelos, Mujumdar Arun S. Germany. Weinheim: Wiley VCH Verlag GmbH and Co., KGaA. 2014. 1984 p.
9. **Rudobashta S.P., Zueva G.A., Kuteinikov V.I.** Phase Concentration Equilibrium of Seeds the Sunflower. *Russ. J. Gen. Chem.* 2021. V. 9. N 6. P. 1-4. DOI: 10.1134/S1070363221060372.
10. **Kiranoudis C.T., Maroulis Z.B., Tsami E., Marinou-Kouris D.** Equili moisture content and heat of desorption of some vegetables. *J Food Eng.* 1993. V. 20. P. 55-74. DOI: 10.1016/0260-8774(93)90019-G.
11. **Rudobashta S.P., Zueva G.A., Stolbova A.S.** Concentration equilibrium when drying colloidal capillary porous material (carrot). *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.].* 2022. V. 65. N 6. P. 75-80 (in Russian). DOI: 10.6060/ivkkt.20226506.6567.
12. **Nikitina L.M.** Tables of equilibrium specific moisture content and binding energy of moisture with materials. M.-L.: Gosenergoizdat. 1963. 174 p. (in Russian).

13. **Рудобашта С.П., Карташов Э.М.** Химическая технология: диффузионные процессы. М.: Юрайт. 2018. Ч. 1. 263 с.
14. **Schneider A.** Neue Diagramme zur Bestimmung der relativen Luftfeuchtigkeit über gesättigten wässrigen Salzlösungen und wässrigen Schwefelsäurelösungen bei verschiedenen Temperaturen. *Zeitschrift HOLZ als Roh- und Werkstoff*. 1960. Jahrg. 18. Heft 7. P. 9. DOI: 10.1007/BF02627216.
15. **Рудобашта С.П.** Теплотехника. М.: Изд. Перо. 2015. 671 с.
16. **Henderson S.M.** A basic concept of equilibrium moisture content. *Agricult. Eng.* 1952. 33(1). P. 29 - 32.
17. **Самарский А.А.** Введение в численные методы. М.: Наука. 1997. 239 с.
18. **Тихомиров Н.П., Дорохина Е.Ю.** Эконометрика. М.: Росс. эконом. акад. Экзамен. 2002. 640 с.
19. **Рудобашта С.П., Зуева Г.А., Грабов И.А.** Исследование равновесного влагосодержания нарезки свеклы как параметра, используемого в агроинженерных расчетах. *Агроинженерия*. 2022. Т. 24. № 1. С. 45-48. DOI: 10.26897/2687-1149-2022-1-45-48.
20. **Лыков А.В.** Теория сушки. М.: Энергия. 1960. 465 с.
21. **Рудобашта С.П.** Математическое моделирование процесса конвективной сушки дисперсных материалов. *Известия академии наук. Энергетика*. 2000. № 4. С. 98-100.
22. **Rudobashta S.P., Zueva G.A.** On-farm heat pump - assisted fluidized bed dryer and its kinetics calculation. *Drying Technol.* 2020. 38 (1-2). P. 6-18. DOI: 10.1080/07373937.2019.1591436.
23. **Рудобашта С.П., Зуева Г.А., Дмитриев В.М., Кочетков В.Н.** Массопроводность при сушке ядер и оболочек семян подсолнечника. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2021. Т. 64. Вып. 5. С. 80-87. DOI: 10.6060/ivkkt.20216405.6337.
24. **Коселева М.К., Рудобашта С.П., Дорняк О.Р., Дмитриев В.М.** Массопроводность плоских волокнистых материалов при их конвективной сушке. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2023. Т. 66. Вып. 1. С. 120-125. DOI: 10.6060/ivkkt.20236601.6683.
13. **Rudobashta S.P., Kartashov E.M.** Chemical technology: diffusion processes. M.: Yurayt. 2018. Part 1. 263 p. (in Russian).
14. **Schneider A.** Neue Diagramme zur Bestimmung der relativen Luftfeuchtigkeit über gesättigten wässrigen Salzlösungen und wässrigen Schwefelsäurelösungen bei verschiedenen Temperaturen. *Zeitschrift HOLZ als Roh- und Werkstoff*. 1960. Jahrg. 18. Heft 7. P. 9. DOI: 10.1007/BF02627216.
15. **Rudobashta S.P.** Heat engineering. M.: Ed. Pero. 2015. 671 p. (in Russian).
16. **Henderson S.M.** A basic concept of equilibrium moisture content. *Agricult. Eng.* 1952. 33(1). P. 29 - 32.
17. **Samarsky A.A.** Introduction to numerical methods. M.: Nauka. 1997. 239 p. (in Russian).
18. **Tikhomirov N.P., Dorokhina E.Yu.** Econometrics. M.: Ross. ekonom. akad. Ekzamen. 2002. 640 p. (in Russian).
19. **Rudobashta S.P., Zueva G.A., Grabov I.A.** Moisture Equilibrium of Sliced Beetroot as an Agroengineering Analysis Parameter. *Agricult. Eng.* 2022. 24(1). P. 45-48 (in Russian). DOI: 10.26897/2687-1149-2022-1-45-48.
20. **Luikov A.V.** Theory of drying. M.: Energiya. 1960. 465 p. (in Russian).
21. **Rudobashta S.P.** Mathematical modeling of the process of convective drying of dispersed materials. *Proceedings of the Academy of Sciences. Energy*. 2000. N 4. P. 98-10 (in Russian).
22. **Rudobashta S.P., Zueva G.A.** On-farm heat pump - assisted fluidized bed dryer and its kinetics calculation. *Drying Technol.* 2020. 38 (1-2). P. 6-18. DOI: 10.1080/07373937.2019.1591436.
23. **Rudobashta S.P., Kochetkov V.N., Zueva G.A., Dmitriev V.M.** Mass conductivity for drying nuclei and shells of sunflower seeds. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2021. V. 64. N 5. P. 80-87 (in Russian). DOI: 10.6060/ivkkt.20216405.6337.
24. **Kosheleva M.K., Rudobashta S.P., Dorniyak O.R., Dmitriev V.M.** Mass conductivity of flat fibrous materials during their convective drying. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2022. V. 66. N 1. P. 120-125 (in Russian). DOI: 10.6060/ivkkt.20236601.6683.

Поступила в редакцию 01.02.2023

Принята к опубликованию 28.07.2023

Received 01.02.2023

Accepted 28.07.2023