

КОНЦЕНТРАЦИОННОЕ РАВНОВЕСИЕ ПРИ СУШКЕ КОЛЛОИДНЫХ КАПИЛЛЯРНО-ПОРИСТЫХ РАСТИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ**С.П. Рудобашта, Г.А. Зуева, А.С. Столбова**

Станислав Павлович Рудобашта (ORCID 0000-0002-3129-8562), Анна Сергеевна Столбова

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, sunineyess@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: zueva_galina15@mail.ru*

Получены экспериментальные изотермы десорбции влаги для образцов моркови сорта «Нантская» при температурах 30 °С, 40 °С и 50 °С. Исследования проведены статическим (эксикаторным) методом с применением насыщенных водных растворов различных солей. Графические зависимости изотерм десорбции влаги из образцов моркови имеют типичный для коллоидных капиллярно-пористых материалов S-образный вид и относятся к четвертому типу изотерм сорбции по классификации Брунауэра. Для удобства инженерных расчетов они описаны термодинамическим уравнением Гендерсона. Степень адекватности математической модели, описывающей изотермы равновесия, равна 0,75 (заметная), среднее квадратическое отклонение 0,871. Морковь относится к числу коллоидных капиллярно-пористых материалов растительного происхождения, которые дают значительную усадку в процессе сушки. Это свидетельствует о значительных изменениях в структуре материала в процессе сушки, влияющих на изотерму равновесия. Поэтому данные по равновесию при десорбции влаги из моркови были сопоставлены с данными по равновесию при десорбции влаги из других растительных материалов, но с незначительной усадкой (семена злаковых культур – пшеницы и ржи, зерна кукурузы разных сортов, семена овощной культуры – лука репчатого, ядер и оболочек семян подсолнечника), данные по равновесию при десорбции влаги из которых приведены в литературе. Сравнение проводилось по значениям коэффициентов уравнения Гендерсона. Было установлено, что коэффициент, который выражает зависимость равновесного влагосодержания от относительной влажности воздуха, у моркови выше, чем у других культур, тогда как коэффициент, который в совокупности с первым коэффициентом отвечает за температурную зависимость изотермы десорбции, соизмерим со значениями этого коэффициента у других культур, кроме семян лука репчатого. Последний коэффициент у семян лука репчатого заметно ниже, чем у семян других культур. Отмечено, что значения рассматриваемых коэффициентов тех или иных культур зависят от их индивидуального морфологического строения. Полученные значения коэффициентов уравнения Гендерсона могут быть использованы в инженерных расчетах процессов сушки и хранения при различных значениях температуры и влажности воздуха.

Ключевые слова: равновесие, сушка, изотерма десорбции, уравнение Гендерсона**Для цитирования:**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**For citation:**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

CONCENTRATION EQUILIBRIUM WHEN DRYING COLLOIDAL CAPILLARY POROUS MATERIAL (CARROT)

S.P. Rudobashta, G.A. Zueva, A.S. Stolbova

Stanislav P. Rudobashta (ORCID 0000-0002-3129-8562), Anna S. Stolbova

Department of Heat Engineering, Hydraulics and Enterprises Energy Supply, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Timiryazevskaya st., 49, Moscow, 127434, Russia
E-mail: srudobashta@rgau-msha.ru, sunineyess@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: zueva_galina15@mail.ru*

Experimental moisture desorption isotherms were obtained for samples of carrots of the Nantskaya variety at temperatures of 30 °C, 40 °C and 50 °C. The studies were carried out by the static (desiccator) method using saturated aqueous solutions of various salts. The graphic dependences of moisture desorption isotherms from carrot samples have an S-shaped form typical of colloidal capillary-porous materials and belong to the fourth type of sorption isotherms according to Brunauer's classification. For the convenience of engineering calculations, they are described by the Henderson thermodynamic equation. The degree of adequacy of the mathematical model describing the equilibrium isotherms is 0.75 (noticeable), the standard deviation is 0.871. Carrots are among the colloidal capillary-porous materials of plant origin, which shrink significantly during the drying process. This indicates significant changes in the structure of the material during drying, affecting the equilibrium isotherm. Therefore, data on equilibrium during moisture desorption from carrots were compared with data on equilibrium during moisture desorption from other plant materials, but with insignificant shrinkage (seeds of cereal crops - wheat and rye, corn grains of different varieties, vegetable seeds - onion, kernels and shells of sunflower seeds). Data on equilibrium during desorption of moisture from these seeds are given in the literature. The comparison was carried out by the values of the coefficients of the Henderson equation. It was found that the coefficient that expresses the dependence of the equilibrium moisture content on the relative humidity of the air is higher for carrots than for other crops, while the coefficient that, together with the first coefficient, is responsible for the temperature dependence of the desorption isotherm, is commensurate with the values of this coefficient for other crops except onion seeds. The last coefficient for onion seeds is noticeably lower than for seeds of other crops. It is noted that the values of the considered coefficients of certain cultures depend on their individual morphological structure. The obtained values of the coefficients of the Henderson equation can be used in engineering calculations of drying and storage processes at various temperatures and air humidity.

Key words: mass conductivity, diffusion, drying, seed core, shell, Henderson's equation

ВВЕДЕНИЕ

Знание равновесного влагосодержания того или иного материала необходимо для определения направления протекания массообменного процесса (сушка или поглощение влаги из газовой среды), расчета кинетики сушки и выбора условий хранения высушенного материала [1-3]. Сушка нарезанной на дольки моркови достаточно широко применяется в производстве с целью получения продукта, который допускает длительное хранение и транспортировку на большие расстояния (в районы Крайнего Севера, удаленные районы Сибири и т.д.).

Сушку нарезки овощей и фруктов осуществляют в сушилках разной конструкции, описанных в [4-10]. При больших производительностях сушку нарезанных на дольки фруктов и овощей проводят, как правило, в конвейерных конвективных сушилках [4, 5]. Спектр используемых в промышленности типов и конструкций сушилок непрерывно расширяется, в последнее время в целях энергосбережения активно стали применять теплонасосные сушилки [11]. Теоретические положения расчета тепломассопереноса в процессах сушки с использованием данных по концентрационному равновесию изложены в [12].

Данные по равновесному влагосодержанию различных материалов приводятся в справочниках и в другой технической литературе, например, в [4, 8-10], или в отдельных статьях, специально посвященных исследованию концентрационного равновесия [1, 2, 13, 14].

Они необходимы для расчета кинетики сушки на основе той или иной математической модели, описывающей кинетику сушки. В настоящее время для расчета кинетики сушки часто стали применять математические модели, основанные на решениях дифференциальных уравнений, описывающих внутренний тепломассоперенос [15-19].

При экспериментальном изучении равновесного влагосодержания материалов используются три основных метода: статический (эксикаторный), динамический – путем продувания навески материала потоком воздуха определенной температуры и влажности и сорбционный, при котором образец материала помещается в среду чистого водяного пара и снимается кривая кинетики сорбции (или десорбции) – до наступления равновесия.

Эксикаторный метод заключается в том, что материал помещают в среду влажного воздуха и выдерживают его в ней в течение длительного времени (порядка трех – четырех недель) при постоянной температуре [3]. Эти опыты проводят с использованием эксикаторов, в которые помещают вещество, поддерживающее определенную относительную влажность воздуха в них. В качестве таких веществ используют либо насыщенные водные растворы определенных солей, либо растворы серной кислоты разной концентрации. В эксикаторы помещают также бюксы с материалом, равновесное влагосодержание которого определяют. Равновесное влагосодержание материала определяют обычно весовым методом, а относительную влажность воздуха находят по табличным или графическим литературным данным. Для того, чтобы получить сразу всю изотерму равновесия, устанавливают обычно ряд эксикаторов с различными растворами, создающими разные относительные влажности воздуха над образцами материала. После выдержки образцов в эксикаторах длительное время, необходимое для установления равновесия, их из бюксов извлекают и определяют влажность весовым методом, досушивая образцы досуха. Это экспериментально простой способ, т.к. не требует применения сложных измерительных приборов, как это имеет место при динамическом методе или сорбционном. Последний требует вакуумирования установки с целью удаления из системы воздуха до остаточного давления 10^{-5} мм рт. ст. (для этих целей применяют форвакуумный и диффузионный насосы), а

также приборы для считывания изменяющегося веса образца в опыте.

Целью исследования было получение изотерм десорбции влаги для нарезанной на дольки моркови и их сопоставление с изотермами других коллоидных капиллярно-пористых растительных материалов. Данные по десорбционному равновесию необработанной моркови при различных температурах отсутствуют. Вместе с тем, имеется практическая потребность в таких данных.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследования проводили статическим методом с использованием насыщенных растворов определенных солей для создания тех или иных значений относительной влажности воздуха в эксикаторах. Для создания в емкостях с помещенными в них образцами – нарезанной на дольки моркови – использовали насыщенные растворы следующих солей: LiCl, MgCl₂, Na₂Cr₂O₇, NaNO₂, NaNO₃, NaCl, KCl, K₂SO₄. Значения относительной влажности воздуха над растворами этих солей, в среде которого находились образцы при температурах опытов брали из [1, 2] (данные A. Schneider). Опыты проводили с образцами моркови сорта «Нантская». Образцы помещали в бюксы, которые устанавливали в нестандартные эксикаторы с насыщенными растворами солей, указанных выше, и выдерживали в воздушном термостате при температурах последовательно 30 °С, 40 °С и 50 °С в течение 1 мес., после чего эксикаторы с бюксами извлекали из термостата и определяли влагосодержание образцов весовым методом в соответствии с ГОСТ 28561-90 [20]. В соответствии с этим методом образцы, вынутые из бюксов, высушивали до полного удаления влаги в сушильном шкафу при температуре 70 °С в атмосфере сухого воздуха в течение 3 сут., после чего находили взвешиванием массу абсолютно сухих образцов и рассчитывали их влагосодержание как

$$u = (m_{\text{вл}} - m_{\text{сух}})/m_{\text{сух}}, \quad (1)$$

где $m_{\text{вл}}$, $m_{\text{сух}}$ – масса влажного и сухого образца, соответственно, г.

В опытах использовали сушильный шкаф модели ШС-80-01 СПУ и электронные лабораторные весы модели «ScaleCas MWP300» с точностью определения веса 0,001 г.

РЕЗУЛЬТАТЫ ОПЫТОВ И ИХ АНАЛИЗ

В табл. 1 приведены наименования солей, создаваемые с их помощью значения относительной влажности воздуха в эксикаторах и найденные в опытах значения равновесного влагосодержания u_p .

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 $t = 30\text{ }^\circ\text{C}$		при $t = 40\text{ }^\circ\text{C}$		при $t = 50\text{ }^\circ\text{C}$	
	ϕ , %	u_p , кг/(кг сух. м.)	ϕ , %	u_p , кг/(кг сух. м.)	ϕ , %	u_p , кг/(кг сух. м.)
LiCl	11	0,0136	11	0,0122	10,8	0,0084
MgCl ₂	33	0,0196	32	0,0160	31	0,0131
Na ₂ CrO ₇	53	0,0257	54	0,0214	54	0,0187
NaNO ₂	63	0,0327	61	0,0286	61	0,0244
NaNO ₃	73	0,0507	71	0,0462	70	0,0359
NaCl	75	0,0574	75	0,0545	74	0,0471
KCl	84	0,0772	83	0,0703	83	0,0608
K ₂ SO ₄	97	0,0979	97	0,0829	96	0,0705

Поскольку помещаемые в эксикаторы образцы моркови 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 [5], 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 рисунке.

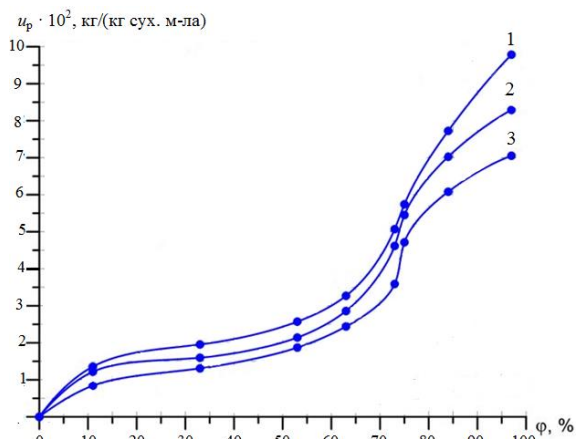


Рис. Изотермы десорбции влаги для нарезанной на дольки моркови сорта «Нантская»: 1 - $t = 30\text{ }^\circ\text{C}$; 2 - $t = 40\text{ }^\circ\text{C}$; 3 - $t = 50\text{ }^\circ\text{C}$

Fig. Moisture desorption isotherms for sliced carrots of the Nantes variety: 1 - $t = 30\text{ }^\circ\text{C}$; 2 - $t = 40\text{ }^\circ\text{C}$; 3 - $t = 50\text{ }^\circ\text{C}$

Как видно из рисунка, изотермы десорбции $u_p - f(\phi)$ имеют типичный для коллоидных капиллярно-пористых материалов вид [5] и относятся к четвертому типу изотерм сорбции по классификации Брунауэра [5]. С увеличением температуры равновесное влагосодержание снижается.

Полученные изотермы десорбции для удобства инженерных расчетов были описаны математически – термодинамическим уравнением Гендерсона, имеющим вид [1]

$$u_p = \left(-\frac{a}{T} \ln(1-\phi) \right)^b, \quad \phi < 1, \quad (2)$$

где u_p – равновесное влагосодержание моркови, %; T – температура, К; ϕ – относительная влажность воздуха, доли; a , b – коэффициенты уравнения. Было найдено: $a = 2,024$; $b = 0,658$. Были рассчитаны также степень адекватности математической модели η^2 и среднее квадратическое отклонение T^* – по уравнениям [21]:

– степень адекватности

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

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

$$y_i = f(x_i), \quad i = 1, 2, \dots, n$$

и имеется некоторая приближающая функция $\Phi(x)$. Вычислим значения функции $\Phi(x)$ в табличных точках:

$$\Phi_i = \Phi(x_i), \quad i = 1, 2, \dots, n.$$

Среднее для приближаемой функции находится по следующей формуле:

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

Для определения степени адекватности модели пользовались таблицей Чеддока [21].

– среднее квадратическое отклонение

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

Степень адекватности математической модели оказалась равной $\eta^2 = 0,75$ (заметная), среднее квадратическое отклонение $T^* = 0,871$.

Морковь относится к числу коллоидных капиллярно-пористых материалов растительного происхождения, которые дают значительную усадку в процессе сушки (по данным наших исследования толщина диска моркови при изменении его влагосодержания от начального значения 5,7 кг/(кг сух. м-ла) до нуля уменьшается на 66%). Это свидетельствует

о значительных изменениях в структуре материала в процессе сушки. Поэтому представляло интерес сопоставить данные по коэффициентам « a » и « b » данного материала с аналогичными коэффициентами других растительных материалов, незначительно изменяющих свои размеры в процессе сушки. Результаты такого сопоставления приведены в табл. 2. Равновесное влагосодержание, приведенное в табл. 2, рассчитано по уравнению (2).

Как видно из таблицы, коэффициент « b », который описывает зависимость равновесного влагосодержания от относительной влажности воздуха, у моркови выше, чем у других культур, тогда как коэффициент « a », который в совокупности с коэффициентом « b » отвечает за температурную зависимость изотермы десорбции, соизмерим со значениями этого коэффициента у других культур,

кроме семян лука репчатого. Коэффициент « a » у семян лука репчатого заметно ниже, чем у семян у других культур. Значения коэффициентов « a » и « b » тех или иных культур зависят от их индивидуального морфологического строения.

Более высокое значение коэффициента « b » у моркови объясняется тем, что морковь изначально содержит значительно большее количество влаги, чем семена зерновых культур и лука репчатого: как указано выше, начальное влагосодержание моркови в наших опытах составляло 5,7 кг/(кг сух. м-ла), тогда как у семян оно в несколько раз меньше. Это указывает на существенные различия в морфологических структурах сравниваемых материалов, которые проявляются и в количестве влаги, удерживаемой материалом в состоянии равновесия.

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*

№ п/п	Материал	Коэффициент a	Коэффициент b	Температура, °С	Источник
1.	Нарезанная морковь	2,024	0,658	30-50	данная работа
3.	Пшеница и рожь	2,270	0,375	не указано	[1]
4.	Семена лука репчатого	1,300	0,370	37	[1]
5.	Зерна кукурузы: - сорт кукурузы «Пионер ПР-8521»;	2,043	0,419	24-48	[2]
	- сорт кукурузы «Пионер ПР-7709 ФАО 160»;	2,778	0,452		
	- сорт кукурузы «Майсодур Амелиор Ф-70»	2,629	0,448		

Примечание: *- значения коэффициента « a » в [1] 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 [1] are given for the case when u_p is calculated as a percentage, here, for comparability of the results of the literature data with the data of this work, they are recalculated into values when u_p is expressed in fractions

ВЫВОДЫ

Экспериментально получены и проанализированы изотермы равновесия нарезанной на дольки моркови – при температурах 30, 40 и 50 °С.

Опытные изотермы для удобства инженерных расчетов описаны уравнением Гендерсона.

Проведено сопоставление коэффициентов этого уравнения для моркови с соответствующими коэффициентами других сельскохозяйственных культур.

Полученные данные по равновесию нарезанной на дольки моркови могут быть использованы при кинетическом расчете процесса сушки, а также при задании температурно-влажностного режима воздушной среды при их хранении.

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. 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.

REFERENCES

1. 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).

2. **Рудобашта С.П., Муравлева Е.А., Зуева Г.А.** Равновесное влагосодержание семян кукурузы. *Наука в Централ. России*. 2017. № 6 (30). С. 69-78.
3. *Modern Drying Technology*. 5 V. Set. Ed. by Evangelos Tsotsas, Arun S. Mujumdar. Germany, Weinheim: Wiley VCH Verlag GmbH and Co. KGaA. 2014. 1984 p.
4. **Атаназевич В.И.** Сушка пищевых продуктов. М.: ДеЛи. 2000. 295 с.
5. **Рудобашта С.П.** Теплотехника. М.: Изд. Перо. 2015. 671 с.
6. **Акулич П.В.** Расчеты сушильных и теплообменных установок. Минск: Беларус. навука. 2010. 443 с.
7. **Акулич П.В., Акулич А.В.** Конвективные сушильные установки: методы и примеры расчета. Минск: Выш. шк. 2019. 376 с.
8. *Handbook of Industrial Drying*. Ed. by A.S. Mujumdar. Boca Raton, FL: RC/Taylor & Francis. 2007. 1280 p.
9. **Kudra T., Mujumdar A.S.** *Advanced Drying Technologies*. New York and Basel: Marcel Dekker, Inc. 2002. 459 p.
10. **Jangam S.V., Law C.L., Mujumdar A.S.** *Drying Foods, Vegetables and Fruits*. 2011. V. 2. 220 p.
11. **Alves-Filho Odilio.** *Heat Pump Drying. Theory, Design and Industrial Application*. Boca Raton: CRC Press. 2015. 345 p. DOI: 10.1201/b18783.
12. **Bergman Theodore L., Lavine Adrienne S., Incropera Frank P., David P. Dewitt.** *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc. 2011. 1076 p.
13. **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.
14. **Kiranoudis C.T., Maroulis Z.B., Tsami E., Marinou-Kouris D.** Equilibrium 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.
15. **Sychevskii V.A.** Heat and mass transfer in convective wood-drying plants. *J. Eng. Phys. Thermophys.* 2018. V. 91. N 3. P. 705- 711. DOI: 10.1007/s10891-018-1793-0.
16. **Sorokovaya N.N., Snezhkin Y.F., Shapar' R.A., Sorokovoi R.Y.** Mathematical simulation and optimization of the continuous drying of thermolabile materials. *J. Eng. Phys. Thermophys.* 2019. V. 92. N 5. P. 1180-1190. DOI: 10.1007/s10891-019-02032-3.
17. **Akulich P.V.** Simulation of heat and mass transfer of droplets in drying an overheated liquid under conditions of combined energy effect. *J. Eng. Phys. Thermophys.* 2019. V. 92. N 2. P. 389-397. DOI: 10.1007/s10891-019-01943-5.
18. **Rudobashta S.P., Zueva G.A.** On-farm heat pump - assisted fluidized bed dryer and its kinetics calculation. *Dry. Technol.* 2020. V. 38. N 1-2. P. 6-18. DOI: 10.1080/07373937.2019.1591436.
19. **Рудобашта С.П., Зуева Г.А., Зайцев В.А.** Моделирование процесса глубокой сушки гранулированного полиамида при конвективно-инфракрасном энергоподводе. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2019. Т. 62. Вып. 12. С. 94-100. DOI: 10.6060/ivkkt.20196212.6064.
20. ГОСТ 28561-90. Продукты переработки плодов и овощей. Методы определения сухих веществ или влаги. М.: Стандартинформ. 2011. 85 с.
21. **Тихомиров Н.П., Дорохина Е.Ю.** Эконометрика. М.: Росс. Экон. акад. Экзамен. 2002. 640 с.
2. **Rudobashta S.P., Muravleva E.A., Zueva G.A.** Corn seed equilibrium moisture content. *Nauka Tsentral. Rossii*. 2017. N 6 (30). P. 69-78 (in Russian).
3. *Modern Drying Technology*. 5 V. Set. Ed. by Evangelos Tsotsas, Arun S. Mujumdar. Germany, Weinheim: Wiley VCH Verlag GmbH and Co. KGaA. 2014. 1984 p.
4. **Atanazevich V.I.** *Drying food*. M.: DeLi. 2000. 295 p. (in Russian).
5. **Rudobashta S.P.** *Heat engineering*. M.: Izd. Pero. 2015. 671 p. (in Russian).
6. **Akulich P.V.** *Calculations for drying and heat exchangers*. Minsk: Belarus. Navuka. 2010. 443 p. (in Russian).
7. **Akulich P.V., Akulich A.V.** *Convection drying plants: methods and calculation examples*. Minsk: High school. 2019. 376 p. (in Russian).
8. *Handbook of Industrial Drying*. Ed. by A.S. Mujumdar. Boca Raton, FL: RC/Taylor & Francis. 2007. 1280 p.
9. **Kudra T., Mujumdar A.S.** *Advanced Drying Technologies*. New York and Basel: Marcel Dekker, Inc. 2002. 459 p.
10. **Jangam S.V., Law C.L., Mujumdar A.S.** *Drying Foods, Vegetables and Fruits*. 2011. V. 2. 220 p.
11. **Alves-Filho Odilio.** *Heat Pump Drying. Theory, Design and Industrial Application*. Boca Raton: CRC Press. 2015. 345 p. DOI: 10.1201/b18783.
12. **Bergman Theodore L., Lavine Adrienne S., Incropera Frank P., David P. Dewitt.** *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc. 2011. 1076 p.
13. **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.
14. **Kiranoudis C.T., Maroulis Z.B., Tsami E., Marinou-Kouris D.** Equilibrium 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.
15. **Sychevskii V.A.** Heat and mass transfer in convective wood-drying plants. *J. Eng. Phys. Thermophys.* 2018. V. 91. N 3. P. 705- 711. DOI: 10.1007/s10891-018-1793-0.
16. **Sorokovaya N.N., Snezhkin Y.F., Shapar' R.A., Sorokovoi R.Y.** Mathematical simulation and optimization of the continuous drying of thermolabile materials. *J. Eng. Phys. Thermophys.* 2019. V. 92. N 5. P. 1180-1190. DOI: 10.1007/s10891-019-02032-3.
17. **Akulich P.V.** Simulation of heat and mass transfer of droplets in drying an overheated liquid under conditions of combined energy effect. *J. Eng. Phys. Thermophys.* 2019. V. 92. N 2. P. 389-397. DOI: 10.1007/s10891-019-01943-5.
18. **Rudobashta S.P., Zueva G.A.** On-farm heat pump - assisted fluidized bed dryer and its kinetics calculation. *Dry. Technol.* 2020. V. 38. N 1-2. P. 6-18. DOI: 10.1080/07373937.2019.1591436.
19. **Rudobashta S. P., Zueva G. A., Zaytsev V.A.** Modeling of the Deep Drying Process of Granulated Polyamide at Convective-Infrared Energy Sub-Supply. *ChemChemTech [Изв. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2019. V. 63. N 12. P. 94-100 (in Russian). DOI: 10.6060/ivkkt.20196212.6064.
20. ГОСТ 28561-90. Fruit and vegetable products. Methods for determination of total solids or moisture. M.: Standardinform. 2011. 85 p. (in Russian).
21. **Tikhomirov N.P., Dorokhina E.Yu.** *Econometrics*. M.: Ross. Ekon.akad. ekzamen. 2002. 640 p. (in Russian).

Поступила в редакцию (Received) 21.12.2021
Принята к опубликованию (Accepted) 27.04.2022