

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 66.047.7

DOI: 10.26897/2687-1149-2022-1-45-48

ИССЛЕДОВАНИЕ РАВНОВЕСНОГО ВЛАГОСОДЕРЖАНИЯ НАРЕЗКИ СВЕКЛЫ КАК ПАРАМЕТРА, ИСПОЛЬЗУЕМОГО В АГРОИНЖЕНЕРНЫХ РАСЧЕТАХ

РУДОБАШТА СТАНИСЛАВ ПАВЛОВИЧ✉, *д-р техн. наук, профессор*¹srudobashta@rgau-msha.ru✉; <https://orcid.org/0000-0002-3129-8562>**ЗУЕВА ГАЛИНА АЛЬБЕРТОВНА**, *д-р физ.-мат. наук, профессор*²zueva_galina15@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0696-4460>**ГРАБОВ ИВАН АЛЕКСАНДРОВИЧ**, *магистрант*¹

grabov.ivan@bk.ru

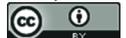
¹Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127550, Российская Федерация, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49²Ивановский государственный химико-технологический университет; 153000, Российская Федерация, г. Иваново, Шереметевский проспект, 7

Аннотация. В агроинженерных расчетах процесса сушки нарезки из свеклы, происходящего при повышенной температуре, необходимы значения ее равновесного влагосодержания. В связи с отсутствием в источниках литературы этих данных экспериментально статическим (эксикаторным) методом получены и проанализированы изотермы десорбции влаги для столовой свеклы, нарезанной на дольки, при температурах 30, 40 и 50°C. Для создания определенных значений относительной влажности воздуха в эксикаторах использовали насыщенные растворы различных минеральных солей, значения относительной влажности воздуха над которыми находили по известной диаграмме Шнайдера. Полученные изотермы десорбции влаги имеют типичный для капиллярно-пористых коллоидных материалов S-образный вид и соответствуют четвертому типу изотерм сорбции по классификации Брунауэра. Для удобства инженерных расчетов они описаны уравнением Гендерсона, которое позволяет рассчитывать значения равновесного влагосодержания материала при различных значениях относительной влажности воздуха и температуры. Найдены значения констант этого уравнения. Проведена статистическая оценка достоверности аппроксимации опытных данных уравнением Гендерсона, показавшая удовлетворительное соответствие этого уравнения опытным данным. Поскольку в эксикаторы при снятии равновесия помещали образцы свеклы с высокой (естественной) влажностью, то полученные изотермы являются изотермами десорбции, которые необходимы для расчета процесса сушки материала. Результаты исследований могут быть использованы при расчете процесса сушки нарезки свеклы, а также при организации процесса ее хранения.

Ключевые слова: влагосодержание материала, равновесие, статический метод, изотерма десорбции, столовая свекла.

Формат цитирования: Рудобашта С.П., Зуева Г.А., Грабов И.А. Исследование равновесного влагосодержания нарезки свеклы как параметра, используемого в агроинженерных расчетах // Агроинженерия. Т. 24. 2022. № 1. С. 45-48. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-1-45-48>.

© Рудобашта С.П., Зуева Г.А., Грабов И.А., 2022



ORIGINAL PAPER

MOISTURE EQUILIBRIUM OF SLICED BEETROOT AS AN AGROENGINEERING ANALYSIS PARAMETER

STANISLAV P. RUDOBASHTA✉, *Professor, DSc (Eng), Professor*¹srudobashta@rgau-msha.ru✉; <https://orcid.org/0000-0002-3129-8562>**GALINA A. ZUEVA**, *Head of Department, DSc (Phys.-Math.), Professor*²zueva_galina15@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0696-4460>**IVAN A. GRABOV**, *MSc student*¹

grabov.ivan@bk.ru

¹Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 49, Timiryazevskaya Str., Moscow, 127434, Russian Federation²Ivanovo State University of Chemistry and Technology, 153000, Russian Federation, Ivanovo, Sheremetievskiy Ave., 7

Abstract. To make the agroengineering analysis of the drying process of sliced beets, it is necessary to know its moisture equilibrium. Due to the lack of the reference data for elevated temperatures at which drying of this material is carried out, the isotherms of moisture desorption were obtained and analyzed by the experimental static (desiccator) method for sliced beetroot at temperatures of 30, 40 and 50°C. The authors used saturated solutions of various mineral salts to get specific values of the relative air humidity

in desiccators. They found the relative air humidity indicators in the space above them according to the well-known diagram of A. Schneider. The obtained moisture desorption isotherms are S-shaped, typical for capillary-porous colloidal materials, and they correspond to the fourth type of sorption isotherms according to the Brunauer classification. For the convenience of engineering analysis, they are described by the Henderson equation, which can be used to determine the values of the equilibrium moisture content of a material at various values of relative humidity and temperature. The authors have found values of the constants for this equation. A statistical assessment of the approximation reliability of the experimental data made by the Henderson equation has shown a satisfactory compliance of this equation with the experimental data. Since beetroot samples with high (natural) humidity were placed in desiccators when removing the equilibrium, the obtained isotherms are of the desorption type. They are exactly the type required to analyze the material drying process. The research results are applicable for analyzing the drying process for slicing beetroot and organizing the storage process.

Key words: material moisture content, equilibrium, static method, desorption isotherm, beetroot.

For citation: Rudobashta S.P., Zueva G.A., Grabov I.A. Moisture equilibrium of sliced beetroot as an agroengineering analysis parameter. *Agricultural Engineering (Moscow)*, 2022; 24(1): 45-48. (In Rus.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-1-45-48>.

Введение. В агроинженерных расчетах процесса сушки необходимо знать равновесное влагосодержание материала. В общем случае знание этого параметра необходимо для определения направления массообменного процесса (сушка или влагопоглощение влаги из газовой среды), расчета кинетики сушки и выбора условий хранения высушенного материала [1-5]. Сушку нарезанной на дольки свеклы достаточно широко применяют в производстве с целью длительного хранения и транспортировки высушенного материала на большие расстояния (в районы Крайнего Севера, удаленные районы Сибири и т.д.). При большой производительности сушку нарезанных на дольки фруктов и овощей осуществляют, как правило, в конвейерных конвективных сушилках [1].

Скорость сушки, под которой понимают первую производную от влагосодержания материала по времени, взятую по абсолютной величине, во втором периоде сушки (в периоде падающей скорости сушки) пропорциональна разности влагосодержаний материала – фактического и равновесного [1, 3]:

$$-\frac{d\bar{u}}{d\tau} = K(\bar{u} - u_p), \quad (1)$$

где \bar{u} – среднее по объему высушиваемого тела влагосодержание материала в момент времени τ , кг/(кг сух. м-ла); u_p – равновесное влагосодержание материала, кг/(кг сух. м-ла); $-d\bar{u} / d\tau$ – скорость сушки, 1/с; K – коэффициент сушки, 1/с.

Интегрирование уравнения (1) при $K = \text{const}$ дает зависимость для расчета продолжительности второго периода сушки τ_2 в среде с постоянными параметрами сушильного агента:

$$\tau_2 = \frac{1}{K} \ln \frac{\bar{u}_{\text{кр}} - u_p}{\bar{u}_{\text{к}} - u_p}, \quad (2)$$

где $\bar{u}_{\text{кр}}$, $\bar{u}_{\text{к}}$ – влагосодержание материала в момент начала второго периода сушки и, соответственно, конечное, кг/(кг сух. м-ла).

Уравнения (1) и (2) показывают, что равновесное влагосодержание необходимо для расчета кинетики сушки. При изменении параметров сушильного агента в ходе сушки необходимо учитывать эти изменения. Соответствующие расчетные зависимости для сушилок разного типа приводятся в источниках литературы [3, 4]. В этих случаях для кинетического расчета также требуется равновесное влагосодержание.

При экспериментальном изучении равновесного влагосодержания материалов применяют три основных метода: статический (эксикаторный); динамический (продувание навески материала потоком воздуха определенной температуры

и влажности); сорбционный, когда образец материала помещается в среду чистого водяного пара и до наступления равновесия снимается кривая кинетики сорбции (или десорбции).

Эксикаторный метод заключается в погружении бюкса с материалом, равновесное влагосодержание которого определяют, в среду влажного воздуха и выдержки в течение длительного времени (порядка 3-4 нед.) при постоянной температуре [6]. В эксикаторе для поддержания определённой относительной влажности воздуха используют либо насыщенные водные растворы определённых солей, либо растворы серной кислоты разной концентрации, берут ряд эксикаторов с различными растворами. Влажность образцов определяют весовым методом, досушивая образцы досуха, а относительную влажность воздуха в эксикаторах находят по табличным или графическим данным. Это экспериментально простой способ, не требующий применения сложных измерительных приборов.

Динамический и сорбционный методы требуют применения специальной аппаратуры. В частности, при сорбционном методе для измерения веса материала требуются прецизионные весы [6]. В качестве таких весов часто используют оттарированную кварцевую спиральную пружину (весы Мак-Бэна). В настоящее время появились высокоточные электронные весы, которые вытесняют кварцевые пружинные весы в этих опытах.

В настоящее время отсутствуют данные по равновесному влагосодержанию столовой свеклы, нарезанной на дольки.

Цель исследования: получение изотерм десорбции влаги для столовой свеклы, нарезанной на дольки.

Материалы и методы. В исследовании применялся статический метод. Для создания в эксикаторах определенных значений относительной влажности воздуха использовали насыщенные растворы солей: LiCl, MgCl₂, Na₂CrO₇·2H₂O, NaNO₂, NaNO₃, NaCl, KCl, K₂SO₄. Использовали значения относительной влажности воздуха над растворами этих солей при температуре опыта [7]. Опыты проводили с образцами из столовой свеклы сорта «Бордо». Нарезки из свеклы помещали в бюксы, которые устанавливали в эксикаторы с насыщенными растворами указанных солей, и выдерживали в воздушном термостате при температурах 30, 40 или 50°C в течение 1 мес. После этого эксикаторы с бюксами извлекали из термостата и определяли влагосодержание образцов весовым методом в соответствии с ГОСТ 28561-90. Вынутые из бюксов образцы досушивали в сушильном шкафу при температуре 70°C в атмосфере сухого воздуха в течение 3 сут., после чего взвешиванием находили массу

абсолютно сухих образцов и рассчитывали их влагосодержание по формуле:

$$u = (m_{вл.} - m_{сух.}) / m_{сух.} \tag{3}$$

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

Воздух в сушильном шкафу осушали с помощью предварительного прокаленного силикагеля марки КСК. В опытах использовали сушильный шкаф модели ШС-80-01 СПУ, а для определения веса образцов – электронные лабораторные весы модели «ScaleCas MWP300» с точностью определения веса 0,001 г.

Результаты и обсуждение. Создаваемые в эксикаторах с помощью солей значения относительной влажности

воздуха и найденные в опытах значения равновесного влагосодержания u_p приведены в таблице 1.

Поскольку помещаемые в эксикаторы образцы свеклы 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, так как известно [2], что на кривых равновесиях 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.

Таблица 1

Относительная влажность воздуха, ϕ , над насыщенными растворами солей¹ и найденные в опытах значения равновесного влагосодержания, u_p

Table 1

Relative air humidity (ϕ) over saturated salt solutions¹ and the values of u_p found in experiments

Соль Salt	при $t = 30^\circ\text{C}$		при $t = 40^\circ\text{C}$		при $t = 50^\circ\text{C}$	
	ϕ , %	$u_p \cdot 10^2$, кг/кг сухого материала kg/kg dry material	ϕ , %	$u_p \cdot 10^2$, кг/кг сухого материала kg/kg dry material	ϕ , %	$u_p \cdot 10^2$, кг/кг сухого материала kg/kg dry material
LiCl	11	0,0131	11	0,0114	10,8	0,0096
MgCl ₂	33	0,0156	32	0,0137	31	0,0121
Na ₂ CrO ₇ ·2H ₂ O	53	0,0225	54	0,0204	54	0,0186
NaNO ₂	63	0,0280	61	0,0261	61	0,0238
NaNO ₃	73	0,0442	71	0,0373	70	0,0338
NaCl	75	0,0499	75	0,0463	74	0,0427
KCl	84	0,0717	83	0,0671	83	0,0594
K ₂ SO ₄	97	0,0797	97	0,0768	96	0,0716

По полученным экспериментальным данным построены изотермы десорбции влаги (рис.).

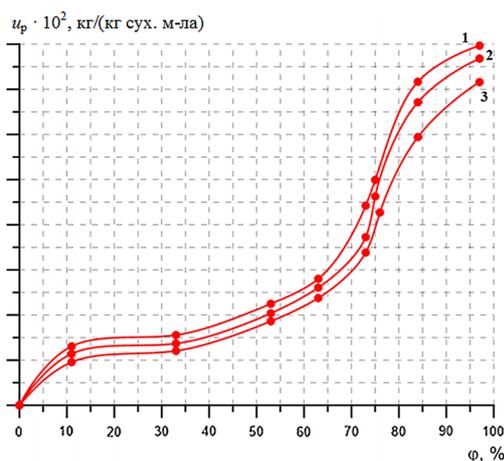


Рис. Изотермы десорбции влаги для столовой свеклы сорта «Бордо», нарезанной на дольки:
1) $t = 30^\circ\text{C}$; 2) $t = 40^\circ\text{C}$; 3) $t = 50^\circ\text{C}$

Fig. Isotherms of moisture desorption for sliced beetroot of the “Bordeaux” variety:
1) $t = 30^\circ\text{C}$; 2) $t = 40^\circ\text{C}$; 3) $t = 50^\circ\text{C}$

Изотермы десорбции $u_p = f(\phi)$ имеют типичный для капиллярно-пористых коллоидных материалов вид [2] и относятся к четвертому типу изотерм сорбции по классификации Брунауэра [4]. С увеличением температуры равновесное влагосодержание снижается.

Полученные изотермы десорбции для удобства инженерных расчетов были описаны математически – термодинамическим уравнением Гендерсона, имеющим вид [8]:

$$u_p = \left(-\frac{a}{T} \ln(1 - \phi) \right)^b, \quad \phi < 1, \tag{4}$$

где u_p – равновесное влагосодержание столовой свеклы, кг/(кг сух. мат.); T – температура, К; ϕ – относительная влажность воздуха, доли; a , b – константы уравнения.

Определено: $a = 1,49$; $b = 0,637$.

Степень адекватности математической модели η^2 рассчитывается по уравнению;

$$\eta^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\Phi_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}, \tag{5}$$

где приближаемая функция $y = f(x)$ задана таблицей своих значений: $y_i = f(x_i)$, $i = 1, 2, \dots, n$ и имеется некоторая

¹ ГОСТ 28561-90. Продукты переработки плодов и овощей. Методы определения сухих веществ или влаги. М.: ФГУП «Стандартинформ», 2011. 85 с.

приближающая функция $\Phi(x)$. Вычисляются значения функции $\Phi(x)$ в табличных точках: $\Phi_i = \Phi(x_i), i = 1, 2, \dots, n$. Среднее для приближаемой функции находится по формуле:

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

Для определения степени адекватности модели можно использовать шкалу Чеддока (табл. 2) [9]:

Таблица 2

Шкала Чеддока

Chaddock scale

η^2	Степень адекватности модели / Model adequacy
0,1...0,3	Слабая / Weak
0,5	Умеренная / Moderate
0,7	Заметная / Noticeable
0,9	Высокая / High
0,99	Весьма высокая / Very high

Table 2

Библиографический список

1. Атаназевич В.И. Сушка пищевых продуктов: Справочное пособие. М.: ДеЛи, 2000. 295 с.
2. Лыков А.В. Теория сушки. М.: Энергия, 1960. 465 с.
3. Рудобашта С.П. Математическое моделирование процесса конвективной сушки дисперсных материалов // Известия Российской академии наук. Энергетика. 2000. № 4. С. 98-109.
4. Rudobashta S.P., Zueva G.A. On-farm heat pump – assisted fluidized bed dryer and its kinetics calculation. *Drying Technology*, 2020; 38 (1-2): 6-18. <https://doi.org/10.1080/07373937.2019.1591436>
5. Гинзбург А.С., Савина И.М. Массовлагообменные характеристики пищевых продуктов: Справочник. М.: Легкая и пищевая промышленность, 1982. 280 с.
6. Кельцев Н.В. Основы адсорбционной техники. М.: Химия, 1976. 512 с.
7. Schneider A. Neue Diagramme zur Bestimmung der relativen Luftfeuchtigkeit über gesättigten wässrigen Salzlösungen und wässrigen Schwefelsäurelösungen bei verschiedenen Temperaturen: Institut für Holzforschung und Holztechnik der Universität München. *Holz Roh Werkst.* 1960; 18 (7): 269-272. <https://doi.org/10.1007/BF02627216>
8. Henderson S.M. A basic concept of equilibrium moisture content. *Agricultural Engineering*, 1952; 33 (1): 29-32.
9. Тихомиров Н.П., Дорохина Е.Ю. Эконометрика: Учебник. М.: Российская экономическая академия, 2002. 640 с.

Критерии авторства

Рудобашта С.П., Зуева Г.А., Грабов И.А. выполнили теоретические исследования, на основании полученных результатов провели эксперимент и подготовили рукопись. Рудобашта С.П., Зуева Г.А., Грабов И.А. имеют на статью авторские права и несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 16.09.2021

Одобрена после рецензирования 10.10.2021

Принята к публикации 14.10.2021

Среднее квадратическое уклонение рассчитывается по формуле:

$$T^* = \frac{1}{\sqrt{n}} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \Phi(x_i))^2}. \tag{6}$$

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

Данные по равновесию нарезанной на дольки столовой свеклы могут быть использованы для расчета кинетики ее сушки (например, на основе математических моделей [2-4]), а также для выбора параметров воздушной среды при ее хранении.

Выводы

1. Полученные изотермы десорбции нарезанной на дольки столовой свеклы сорта «Бордо» могут быть использованы для расчета кинетики сушки и выбора условий хранения высушенного материала.
2. Уравнение Гендерсона с найденными значениями его коэффициентов удовлетворительно описывает опытные данные и поэтому рекомендуется для инженерных расчетов.

References

1. Atanazevich V.I. Sushka pishchevykh produktov. Spravochnoye posobiye [Drying food. Reference manual]. Moscow, DeLi, 2000. 295 p. (In Rus.)
2. Luikov A.V. Teoriya sushki [Theory of drying]. Moscow, Energiya, 1960. 465 p. (In Rus.)
3. Rudobashta S.P. Mathematical modeling of the process of convective drying of dispersed materials. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Energy*. 2000; 4: 98-10. (In Rus.)
4. Rudobashta S.P., Zueva G.A. On-farm heat pump – assisted fluidized bed dryer and its kinetics calculation. *Drying Technology*, 2020; 38 (1-2): 6-18. <https://doi.org/10.1080/07373937.2019.1591436>
5. Ginzburg A.S., Savina I.M. Massovlagoobmennye kharakteristiki pishchevykh produktov. Spravochnik [Mass moisture exchange characteristics of food products. Directory]. Moscow, Legkaya i pishcheyaya promyshlennost', 1982. 280 p. (In Rus.)
6. Kel'tsev N.V. Osnovy adsorbtsionnoy tekhniki. [Basics of adsorption technology]. Moscow, Khimiya, 1976. 512 p. (In Rus.)
7. Schneider A. Neue Diagramme zur Bestimmung der relativen Luftfeuchtigkeit über gesättigten wässrigen Salzlösungen und wässrigen Schwefelsäurelösungen bei verschiedenen Temperaturen: Institut für Holzforschung und Holztechnik der Universität München. *Holz Roh Werkst.* 1960; 18 (7): 269-272. <https://doi.org/10.1007/BF02627216> (In German).
8. Henderson S.M. A basic concept of equilibrium moisture content. *Agricultural Engineering*, 1952; 33 (1): 29-32.
9. Tikhomirov N.P., Dorokhina E.Yu. Ekonometrika: Uchebnik [Econometrics: Study manual]. Moscow, Russian Academy of Economics, 2002. 640 p. (In Rus.)

Contribution

S.P. Rudobashta, G.A. Zueva, I.A. Grabov performed theoretical studies, and based on the results obtained, conducted the experiment and wrote the manuscript. S.P. Rudobashta, G.A. Zueva, I.A. Grabov have equal author's rights and bear equal responsibility for plagiarism.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this paper.

The paper was received 16.09.2021

Approved after reviewing 10.10.2021

Accepted for publication 14.10.2021