

связи с нулевыми начальными условиями по концентрации воды в газовой фазе, что делает невозможным конденсацию паров компонентов в начале реактора.

Таким образом, полученные результаты позволяют решить следующие задачи:

- проверка адекватности разработанной модели;
- выявление основных качественных параметров проведения процесса;
- выбор каналов управления и их структурная и параметрическая идентификация.

ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Липин А.А.** Тепло- и массообмен в процессах дополиамидирования и сушки полиамида-6. Дис. ... к.т.н. ИГХТУ. 2012. 146 с.;
Lipin A.A. Heat- and mass transfer in processes of pre-polyamidization and drying of polyamide-6. Dissertation for candidate degree on technical sciences. Ivanovo. ISUCT. 2012. 146 p. (in Russian).
2. **Липин А.А., Базаров Ю.М., Липин А.Г., Кириллов Д.В., Мизеровский Л.Н.** // Изв. вузов. Химия и хим. технология. 2011. Т. 54. Вып. 3. С. 86-88;
Lipin A.A., Bazarov Yu.M., Lipin A.G., Kirillov D.V., Mizerovskiy L.N. // Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol. 2011. V. 54. N 3. P. 86-88 (in Russian).
3. **Базаров Ю.М., Мизеровский Л.Н., Павлов М.Г.** // Перспективные полимерные композиционные материалы. Применение. Экология: Доклады междунар. конф. «Композит-2001». Саратов. 3-5 июля 2001. Саратов: Изд-во СГТУ. 2001. С. 9-10;
Bazarov Yu.M., Mizerovskiy L.N., Pavlov M.G. // Promising polymer composite materials. Application. Ecology. Presentations of Int. Conf. "Kompozit-2001". Saratov. 2001. Saratov: SGTU. 2001. P. 9-10 (in Russian).
4. **Павлов М.Г., Силантьев А.А., Базаров Ю.М.** // Техника и технология экологически чистых производств: 4-Международ. симпозиум молодых ученых, аспирантов и студентов. Москва. 2000. Тезисы докладов. М.: Изд-во МГУИЭ. 2000. С. 96-97;
Pavlov M.G., Silant'ev A.A., Bazarov Yu.M. //Techniks and technology of ecologically clean productions : 4th Int. Symp. of young scientists, post-graduates, and students. Moskva. 2000. Proceedings. M.: MGUIE. 2000. P. 96-97 (in Russian).

Кафедра технической кибернетики и автоматики

УДК 66.047

С.П. Рудобашта*, Г.А. Зуева, Н.А. Зуев***

ГИГРОСКОПИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СЕМЯН

(*Московский государственный агроинженерный университет им. В.П. Горячкина,

**Ивановский государственный химико-технологический университет)

e-mail: rudobashta@mail.ru; zueva_galina15@mail.ru

Приведены и проанализированы результаты экспериментальных исследований гигроскопических свойств типичных коллоидных капиллярно-пористых материалов – семян горчицы белой и лука репчатого. Дано сопоставление гигроскопических свойств этих материалов с гигроскопическими свойствами других коллоидных капиллярно-пористых материалов растительного происхождения – зерновых культур.

Ключевые слова: равновесие, сушка, семена, изотерма десорбции, коллоидные капиллярно-пористые материалы, горчица белая, лук репчатый

Согласно [1] к коллоидным капиллярно-пористым материалам относятся капиллярно-пористые материалы с проницаемыми для распределяемого вещества стенками пор. Таковыми являются все материалы растительного и животного происхождения (в частности семена), имеющие клеточное строение. Для кинетического расчета процесса сушки материалов, в том числе семян, а также для выбора условий их хранения нужны данные по их равновесному влагосодержанию [1, 2].

Закономерности изменения равновесной

влажности в зависимости от влажности воздуха и температуры необходимы для вскрытия механизма массопереноса при сушке семян, который обусловлен физико-химическими свойствами зерновых культур. Знание равновесного влагосодержания u_p важно также для определения движущей силы процесса сушки, которая, согласно зависимости для скорости сушки (1), определяется разностью значений влагосодержания ($u-u_p$):

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

K – коэффициент сушки, c^{-1} ; u , u_p – фактическое и равновесное влагосодержание семян, (кг влаги)/(кг сух. м-ла).

Гигроскопические и массопроводные свойства являются одними из основных свойств материалов, которые необходимо учитывать при сушке. Массопроводность, определяющая внутренний массоперенос в процессах экстрагирования и сушки, применительно к непористым материалам в последнее время рассматривалась в [3], а применительно к семенам при сушке – в [4-6]. В отличие от этих работ, данная статья посвящена изучению гигроскопических свойств семян.

Равновесное влагосодержание семян зависит не только от вида культуры, но и от ее сорта. Банк данных по равновесному влагосодержанию семян непрерывно пополняется. В публикуемых работах приводятся новые сведения по равновесию для тех или иных сортов семян, полученные данные для удобства кинетического расчета описываются соответствующими уравнениями, выражающими зависимость равновесного влагосодержания от относительной влажности воздуха и температуры. В последнее время опубликованы новые данные по гигротермическому равновесию зерна – пшеницы яровой сорта «Люба» [7], пшеницы «Московская 39» и этой же пшеницы, обработанной озонированным воздухом, ржи «Восход 2», ячменя «Михайловский» [8].

В данной работе приведены результаты опытного исследования равновесного влагосодержания семян горчицы белой сорта «ВНИИМК-162» и лука репчатого сорта «Штутгартер ризен». Исследования проводили статическим методом: путем помещения семян в атмосферу воздуха определенной относительной влажности при заданной температуре 37 °С и выдерживания их в этой среде длительное время (в течение месяца). Температура 37 °С была выбрана в силу того, что именно

такова средняя температура семян, высушиваемых перспективным осциллирующим инфракрасным методом (ИК-методом), который позволяет не только высушивать семена, но и стимулирует семена: повышает их энергию прорастания и всхожесть [9, 10].

Для получения зависимости $u_p=f(\varphi)_t$ необходимо получить ряд взаимосвязанных значений φ и u_p , для чего использовались сосуды с насыщенными растворами солей, создающих определенную относительную влажность воздуха φ [11] (табл. 1, 2).

По данным табл. 1 построен график функции $u_p=f(\varphi)_t$ при $t = 37$ °С, приведенный на рис. 1. Как показывает рассмотрение графика, изотерма десорбции для семян горчицы имеет обычный для коллоидных капиллярно-пористых материалов, в частности, для семян других культур, вид [7, 8].

Была получена также опытная изотерма десорбции влаги для семян лука репчатого сорта «Штутгартер ризен» – описанным выше статическим методом с использованием тех же растворов солей. Досушивание семян до сухого веса осуществляли согласно ГОСТ -12041-82 при температуре 130 °С. Результаты этого исследования представлены в табл. 2 и на рис. 2.

Из рис. 2 видно, что изотерма десорбции для лука репчатого сорта «Штутгартер ризен» имеет также S-образный вид, типичный для различных семян [7,8].

Полученные опытные данные по равновесному влагосодержанию лука репчатого сорта «Штутгартер ризен» были описаны уравнением Гендерсона [12]

$$u_p = \left[-\frac{a}{T} \ln(1 - \varphi) \right]^b. \quad (2)$$

Были получены следующие значения констант этого уравнения: $a=0,33 \cdot 106$, $b=0,37$. Полу-

Таблица 1

Результаты экспериментального исследования равновесного влагосодержания при десорбции влаги из семян горчицы белой при $t = 37$ °С

Table 1. The results of experimental study of equilibrium moisture content at the moisture desorption from seeds of white mustard at 37 °C

Соль	CH ₃ COOK	MgCl ₂	Mg(NO ₃) ₂	NaNO ₂	KJ	NaNO ₃	NaCl	KCl	K ₂ SO ₄
φ , %	14,2	32,1	48,5	61,8	67,9	71,2	75,0	83,5	96,5
u_p , %	6,2	7,1	6,6	9,0	12,1	12,4	12,7	17,2	28,4

Таблица 2

Результаты экспериментального исследования равновесного влагосодержания семян лука репчатого сорта «Штутгартер ризен» при $t = 37$ °С

Table 2. The results of experimental study of equilibrium moisture content at the moisture desorption from seeds of bulb onion at 37 °C

Соль	CH ₃ COOK	MgCl ₂	Mg(NO ₃) ₂	NaNO ₂	KJ	NaNO ₃	NaCl	KCl	K ₂ SO ₄
φ , %	14,2	32,1	48,5	61,8	67,9	71,2	75,0	83,5	96,5
u_p , %	7,8	8,0	13,4	10,1	12,9	12,3	13,7	17,5	25,4

ченные значения этих коэффициентов по порядку величин согласуются с их значениями для семян других культур [7,8] (табл. 3). Уравнение (2) может быть использовано для практических расчетов.

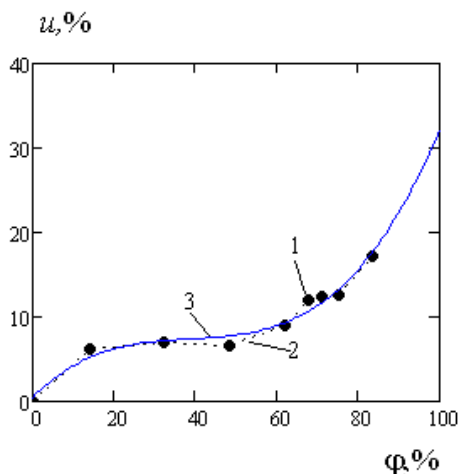


Рис 1. Изотерма десорбции семян горчицы белой сорта «ВНИИМК-162» при $t = 37\text{ }^{\circ}\text{C}$. 1-эксперимент; 2-графическая аппроксимация опытных точек; 3 - аппроксимирующая линия, сглаживающая ошибки измерений

Fig. 1. The adsorption isotherm of white mustard seeds of VNIIMK-162 kind at $37\text{ }^{\circ}\text{C}$. 1-experiment; 2 – graphic approximation of experimental points; 3 – approximating line smoothing errors of measurement

С использованием значений полученных коэффициентов уравнение (2) принимает вид

$$u_p = \left[-\frac{0,33 \cdot 10^6}{T} \ln(1 - \varphi) \right]^{0,37}, \quad (3)$$

где u_p – равновесное влагосодержание семян, %; T – термодинамическая температура, К; φ – относительная влажность воздуха (доли).

Уравнение (3) описывает равновесные данные при различных температурах. На рис. 3 опытные данные по равновесному влагосодержанию семян лука репчатого сорта «Штутгартер ризен» сопоставлены со значениями, рассчитанными по уравнению (3). Как видно, опытные и расчетные значения удовлетворительно согласу-

ются. Дополнительно к этому была проведена также аппроксимация опытных данных полиномом третьей степени

$$u_p = a_0 + a_1\varphi + a_2\varphi^2 + a_3\varphi^3, \quad (4)$$

где $a_0=0,17802$; $a_1=0,65191$; $a_2=-0,01392$; $a_3=-0,000102$. Среднеквадратичное отклонение составляет 1,24.

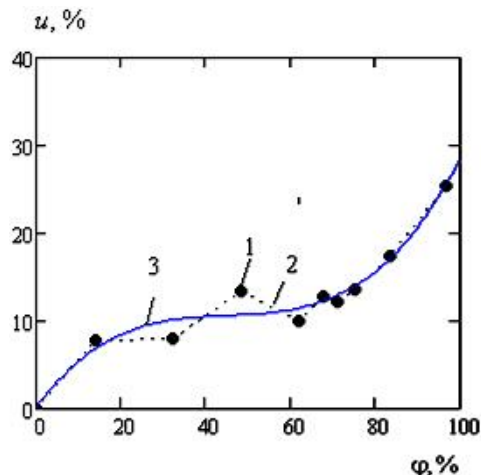


Рис. 2. Изотерма десорбции семян лука репчатого сорта «Штутгартер ризен» при $t = 37\text{ }^{\circ}\text{C}$. 1-эксперимент; 2-графическая аппроксимация опытных точек; 3 - аппроксимирующая линия, сглаживающая ошибки измерений

Fig. 2. The adsorption isotherm of bulb onion seeds of Shtutgarten Risen kind at $37\text{ }^{\circ}\text{C}$. 1-experiment; 2 – graphic approximation of experimental points; 3 – approximating line smoothing errors of measurement

Результаты аппроксимации лучше согласуются с опытными данными, полученными при $t=37\text{ }^{\circ}\text{C}$ (рис. 3), однако, преимуществом уравнения (3) является возможность перенесения опытных данных, полученных при одной температуре, на другие температуры.

Полученные данные по равновесному влагосодержанию семян могут быть использованы для кинетического расчета и выбора условий их сушки.

Таблица 3

Значения коэффициентов a и b в уравнении Гендерсона
Table 3. Values of a and b coefficients in Henderson's equation

№ п/п	Тип семян	Значения коэффициентов уравнения (2)		Источник	Средняя относительная Погрешность аппроксимации уравнением (2), %
		$a \cdot 10^{-6}$	b		
1	лук репчатый сорта «Штутгартер ризен»	0.33	0.37	данные авторов	$\pm 3,2$
2	яровая пшеница «Люба»	0,489	0,375	[7]	$\pm 3,8$
3	пшеница «Мироновская 39»			[8]	$\pm 3,0$
4	рожь «Восход 2»				$\pm 4,1$
5	ячмень «Михайловский»				$\pm 5,5$
6	яровая пшеница «Люба», озонированная	0,167	0,429		$\pm 5,0$

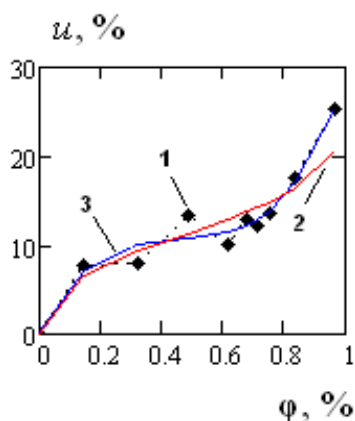


Рис. 3. Изотерма десорбции влаги для семян лука репчатого сорта «Штутгартер ризен» при $t = 37\text{ }^{\circ}\text{C}$: 1 – экспериментальные значения; 2 – расчетная кривая по уравнению Гендерсона; 3 – аппроксимация полиномом третьего порядка
Fig. 3. The adsorption isotherm of bulb onion seeds of Shtutgarten Risen kind at $37\text{ }^{\circ}\text{C}$. 1-experiment; 2 – calculated curve on Henderson's equation; 3 – approximation with a polynomial of third order

ВЫВОДЫ

Получены опытные зависимости по равновесному влагосодержанию семян горчицы белой сорта «ВНИИМК-162» и лука репчатого сорта «Штутгартер ризен» от относительной влажности воздуха при $t = 37\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Опытные функции $u_p = f(\varphi)_{t=37^{\circ}\text{C}}$ для семян лука репчатого сорта «Штутгартер ризен» для целей кинетического расчета аппроксимированы полиномом третьей степени и уравнением Гендерсона. Первый из них лучше соответствует опытными данным, а второе позволяет обоснованно переносить опытные данные на иные температурные условия.

Опытные константы уравнения (2) по порядку величин согласуются с их значениями для семян других культур.

ЛИТЕРАТУРА

1. Рудобашта С.П. Массоперенос в системах с твердой фазой. М.: Химия. 1980. 248 с.;
Rudobashta S.P. Mass Transfer in Systems with a Solid Phase. M.: Khimiya. 1980. 248 p. (in Russian).
2. Лыков А.В. Теория сушки. Изд. 2-е, перер. и доп. М.: Энергия. 1968. 472 с.;

- Lykov A.V. Theory of Drying. M.: Energiya. 1968. 472 p. (in Russian).
3. Климов А.М., Рудобашта С.П., Тепляков Ю.А., Нечаев В.М., Михайлов Г.М. // Изв. вузов. Хим. и хим. технология. 2011. Т. 54. Вып. 5. С. 117-120;
Klimov A.M., Rudobashta S.P., Teplyakov Yu.A., Nechaev V.M., Mikhailov G.M. // Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol. 2011. V. 54. N 5. P. 117-120 (in Russian).
4. Забавин И.С., Рудобашта С.П., Дмитриев В.М. // Хранение и переработка сельхозсырья. 2010. № 8. С. 24-28;
Zabavin I.S., Rudobashta S.P., Dmitriev V.M. // Khranenie i Pererabotka Selkhozsiroya. 2010. N 8. P. 24-28 (in Russian).
5. Рудобашта С.П., Моряков А.В., Дмитриев В.М. // Хранение и переработка сельхозсырья. 2012. № 8. С. 42 – 46;
Rudobashta S.P., Moryakov A.V., Dmitriev V.M. // Khranenie i Pererabotka Selkhozsiroya. 2012. N 8. P. 42-46 (in Russian).
6. Рудобашта С.П., Зуева Г.А., Дмитриев В.М., Зуев Н.А. // Изв. вузов. Химия. и хим. технология. 2014. Т. 57. Вып. 1. С. 103-107;
Rudobashta S.P., Zueva G.A., Dmitriev V.M., Zuev N.A. // Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol. 2014. V. 57 N 1. P. 103-107 (in Russian).
7. Забавин И.С., Рудобашта С.П. // Труды междунар. науч.-технич. семинара «Актуальные проблемы сушки и термовлажностной обработки материалов». Воронеж. 2010. С. 330 - 336;
Zabavin I.S., Rudobashta S.P. // Proceedings of the international scientific and technical seminar "Actual problems of drying and thermomoiest processing of materials". Voronezh. 2010. P. 330 - 336 (in Russian).
8. Нуриев Н.Н., Рудобашта С.П. // Сб. науч. трудов МГАУ «Электрические аппараты и электротехнологии сельского хозяйства». М.: МГАУ. 2002. С. 88-93;
Nuriev N.N., Rudobashta S.P. // Proceedings of MSAU "Electric devices and electrotechnologies of agriculture". M.: MSAU. 2002. P. 88-93 (in Russian).
9. Зуев Н.А., Рудобашта С.П., Зуева Г.А., Зотова Е.Ю. // Хранение и переработка сельхозсырья. 2012. № 5. С. 27 – 29;
Zuev N.A., Rudobashta S.P., Zueva G.A., Zotova E.Yu. // Khranenie i Pererabotka Selkhozsiroya. 2012. N 5. P. 27 – 29 (in Russian).
10. Зуев Н.А., Рудобашта С.П., Зуева Г.А., Зотова Е.Ю. // Вестник МГАУ. М.: 2012. Вып.2. (53). С. 9 – 12;
Zuev N.A., Rudobashta S.P., Zueva G.A., Zotova E.Yu. // Vestnik MSAU. M.: 2012. N 2 (53). P. 9-12 (in Russian).
11. Schneider A. // Holz als Roh - und Werkstoff. 1960. Jahrg. 18. Heft 7. S. 269 - 272.
12. Henderson S.M. // Agricultural Engineering. 1952. V. 33. N 1. P. 29 - 32.

Кафедра теплотехники, гидравлики и энергообеспечения предприятий