

## ФАЗОВОЕ КОНЦЕНТРАЦИОННОЕ РАВНОВЕСИЕ СЕМЯН ПОДСОЛНЕЧНИКА

**С. П. Рудобашта, Г. А. Зуева, В. И. Кутейников**

*СТАНИСЛАВ ПАВЛОВИЧ РУДОБАШТА – д.т.н., профессор кафедры теплотехники, гидравлики и энергообеспечения предприятий Российского государственного аграрного университета – МСХА имени К.А. Тимирязева. E-mail: rudobashta@mail.ru.*

*ГАЛИНА АЛЬБЕРТОВНА ЗУЕВА – д.ф.-м.н., профессор кафедры высшей и прикладной математики Ивановского государственного химико-технологического университета. E-mail: zueva\_galina15@mail.ru.*

*ВЛАДИСЛАВ ИГОРЕВИЧ КУТЕЙНИКОВ – магистрант кафедры теплотехники, гидравлики и энергообеспечения предприятий Российского государственного аграрного университета - МСХА имени К.А. Тимирязева. E-mail: rk7p77@gmail.com.*

*127550, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49. Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева.*

*15300, Россия, Иваново, пр. Шереметевский, д. 7, Ивановский государственный химико-технологический университет (ИГХТУ).*

*Данные по фазовому концентрационному равновесию необходимы для выяснения направления протекания процесса (сушка или увлажнение материала), расчета кинетики процесса сушки и выбора условий хранения высушенного материала. В статье представлены экспериментальные изотермы десорбции влаги из семян подсолнечника сорта «МАС 95.ОЛ» и их составных частей: ядер и оболочек - при температурах 24, 36 и 48 °С. Исследования выполнены статическим методом с применением растворов насыщенных солей для создания тех или иных значений относительной влажности воздуха в эксикаторах. Показано, что оболочки семян обладают вдвое большей влагопоглощательной способностью, чем ядра, что объясняется различиями в их морфологическом составе и строении. Для удобства инженерных расчетов графические равновесные зависимости были аппроксимированы уравнениями. Обработкой полученных опытных данных получена взаимосвязь между равновесными влагосодержаниями ядер и оболочек, которая имеет линейный характер с изломом прямой в средней части равновесных влагосодержаний. Приведено граничное условие массообмена четвертого рода (условие массообменного сопряжения), которое должно формулироваться при построении математической модели сушки единичного семени, рассматривающей семя как двухслойное тело.*

**Ключевые слова:** семена подсолнечника, изотерма десорбции влаги, кинетический расчет.

## PHASE CONCENTRATION EQUILIBRIUM OF SEEDS THE SUNFLOWER

S.P. Rudobashta<sup>1</sup>, G.A. Zueva<sup>2</sup>, V.I. Kuteinikov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>49, Timiryazevskaya st., Moscow, Russian Federation, 127550. Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy.

<sup>2</sup>7, Sheremetievskiy Avenue, Ivanovo, 153000, Russia. Ivanovo State University of Chemistry and Technology.

*Data on the phase concentration equilibrium are necessary to find out the direction of the process (drying or wetting of the material), calculate the kinetics of the drying process, and select storage conditions for the dried material. The paper presents the experimental isotherms of desorption of moisture from sunflower seeds of variety MAS 95.OL and from their components: kernels and shells – at temperatures of 24, 36 and 48 °C. The studies were carried out by the static method using saturated salt solutions to create certain values of relative humidity in desiccators. It has been shown that seed shells have twice as much absorption capacity as kernels, due to differences in their morphological composition and structure. For the convenience of engineering calculations, the graphical equilibrium dependences were approximated by equations. By processing the obtained experimental data, a relationship is obtained between the equilibrium moisture contents of the nuclei and shells, which is linear in nature with a kink in the middle part of the equilibrium moisture contents. The boundary condition of mass transfer of the fourth kind (the condition of mass transfer conjugation) is given, which should be formulated when formulating the mathematical problem of drying a single seed that considers the seed as a two-layer body.*

**Key words:** sunflower seeds, isotherm of moisture desorption, kinetic calculation.

### Введение

Знание гигроскопических свойств материала необходимо для определения направления протекания массообменного процесса (сушка или влагопоглощение влаги из газовой среды), расчета кинетики процесса и выбора условий хранения высушенного материала [1–3]. Кинетический расчет процесса сушки нужен для определения времени пребывания материала в аппарате, необходимого для изменения влагосодержания материала от начального значения до конечного, заданного по условию. В последние годы интенсивно развиваются теоретические (математические) методы кинетического расчета процесса сушки, основанные на решениях дифференциальных уравнений внутреннего теплопереноса [4]. Расчет по этим уравнениям требует знания гигроскопических свойств материала. Семена масличных культур (подсолнечник, тыква и др.) представляют собой двухслойные тела, состоящие из ядра и оболочки, резко отличающиеся по своим свойствам. Поэтому применение теоретических методов их кинетического расчета требует определения гигроскопических свойств составных частей этих материалов. Имеющиеся же в литературе данные содер-

жат сведения по равновесному влагосодержанию семян в целом [5].

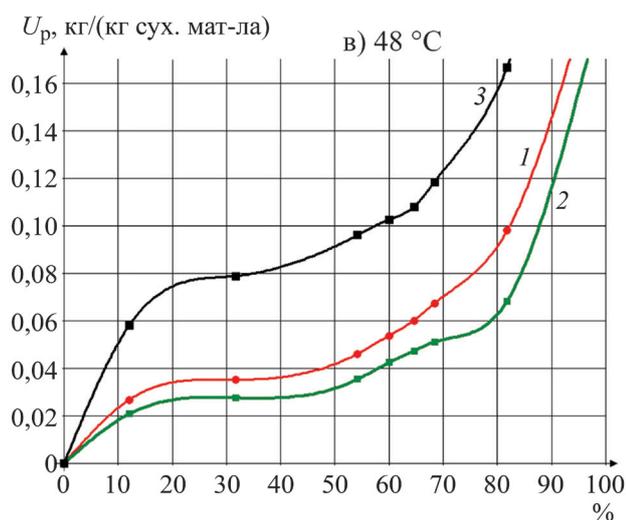
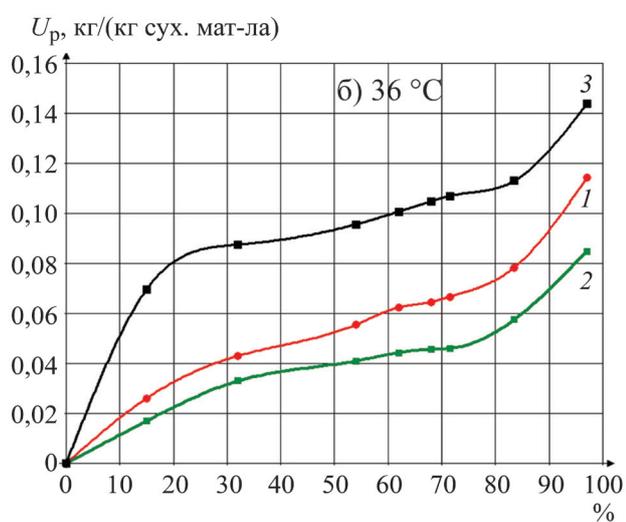
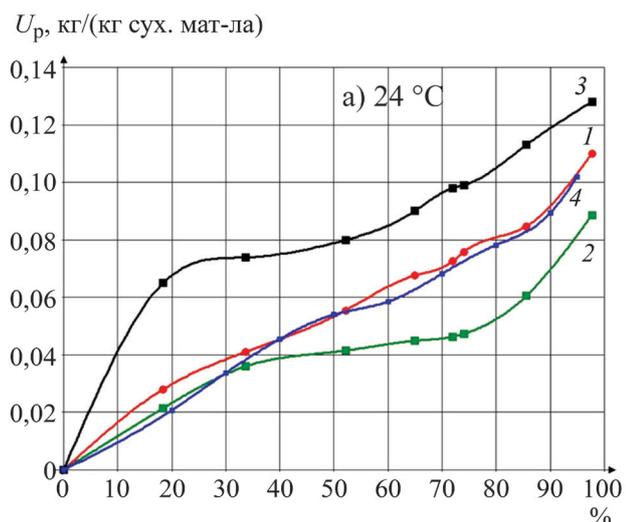
Целью данной работы было экспериментальное изучение гигроскопических свойств ядра и оболочки семян подсолнечника.

### Материалы и методы

В качестве объекта исследования были выбраны культивируемые в настоящее время в России семена подсолнечника сорта «МАС 95.ОЛ». В опытах определяли изотермы десорбции семян – статическим методом при температурах 24, 36 и 48 °C, создавая с помощью насыщенных растворов различных солей определенные значения относительной влажности воздуха над семенами. Образцы с семенами выдерживали в эксикаторах при заданной температуре в течение месяца – до достижения равновесного состояния. Значения относительной влажности воздуха над тем или иным раствором соли определяли по данным [6].

### Экспериментальные данные и их анализ

Полученные экспериментальные изотермы десорбции приведены на рис. 1.



**Рис.1. Изотермы десорбции  $u_p = f(\varphi)$ , семян подсолнечника сорта «МАС 95.ОЛ»**

1 – семена в целом, 2 – ядра, 3 – оболочки семян, 4 (рис. 1а) – изотерма десорбции по данным [7] для всего семени при  $t = 20\text{ °C}$  (сорт семян неизвестен)

Как видно из рисунка, изотермы десорбции имеют характерный для растительных коллоидных капиллярно-пористых материалов S-образный вид. В средней области графиков имеет место слабый угол подъема линии равновесного влагосодержания  $u_p = f(\varphi)$ . Оболочки семян обладают вдвое большей влагопоглотительной способностью, чем ядра, что объясняется различиями в их морфологическом составе и строении.

### Обработка изотерм десорбции

При формулировке кинетической задачи математическим методом для семени подсолнечника как двухслойного тела необходимо задать граничное условие массообмена второго рода на стыке слоев (условие массообменного сопряжения [8]). Для этой цели были найдены соотношения равновесных влагосодержаний ядра и оболочки на основе полученных изотерм десорбции  $u_p = f(\varphi)$ , приведенные на рис. 2. Для их получения сравнивали значения  $u_p$  для ядра ( $u_{p,я}$ ) и оболочки ( $u_{p,об}$ ) при одинаковых значениях  $\varphi$ . Их рассмотрение показывает, что полученные зависимости линейны и что в средней области они претерпевают излом при некотором значении  $u^*$  (точка 1 на графиках), который обусловлен сменой различных форм связи влаги с материалом. Для удобства инженерных расчетов полученные зависимости были аппроксимированы уравнениями, приведенными в таблице 1.

Зависимости  $u_{p,об} = f(u_{p,я})$  позволяют при решении задачи массопродности задать граничное условие массообмена четвертого рода на стыке слоев. Уподобим семя подсолнечника эквивалентной сфере диаметром  $d_{эк}$  и поместим начало координат в центр сферы. Экспериментально для исследованных семян подсолнечника пикнометрическим методом было найдено:  $R_1 = 4,56\text{ мм}$ ,  $R = 5,94\text{ мм}$ , где  $R_1 \equiv R_я$ ,  $R = d_{эк}/2$ . Тогда для сферической задачи с центральной симметрией можно записать

$$k_1 \rho_{0,1} \frac{\partial u_1}{\partial r} \Big|_{R_1} = k_2 \rho_{0,2} \frac{\partial u_2}{\partial r} \Big|_{R_1}, \quad \tau > 0, r = R_1, \quad (1)$$

$$u_2 = A_{p,1-2} u_1, \quad \tau > 0, r = R_1, \quad (2)$$

где  $\rho_{0,1} = 1248\text{ кг/м}^3$ ,  $\rho_{0,2} = 2827,7\text{ кг/м}^3$ .

### Заключение

1. Получены экспериментальные данные по изотермам десорбции для ядер, оболочек и семян подсолнечника в целом (сорта «МАС 95.ОЛ») при температурах 24, 36 и 48 °C, которые могут

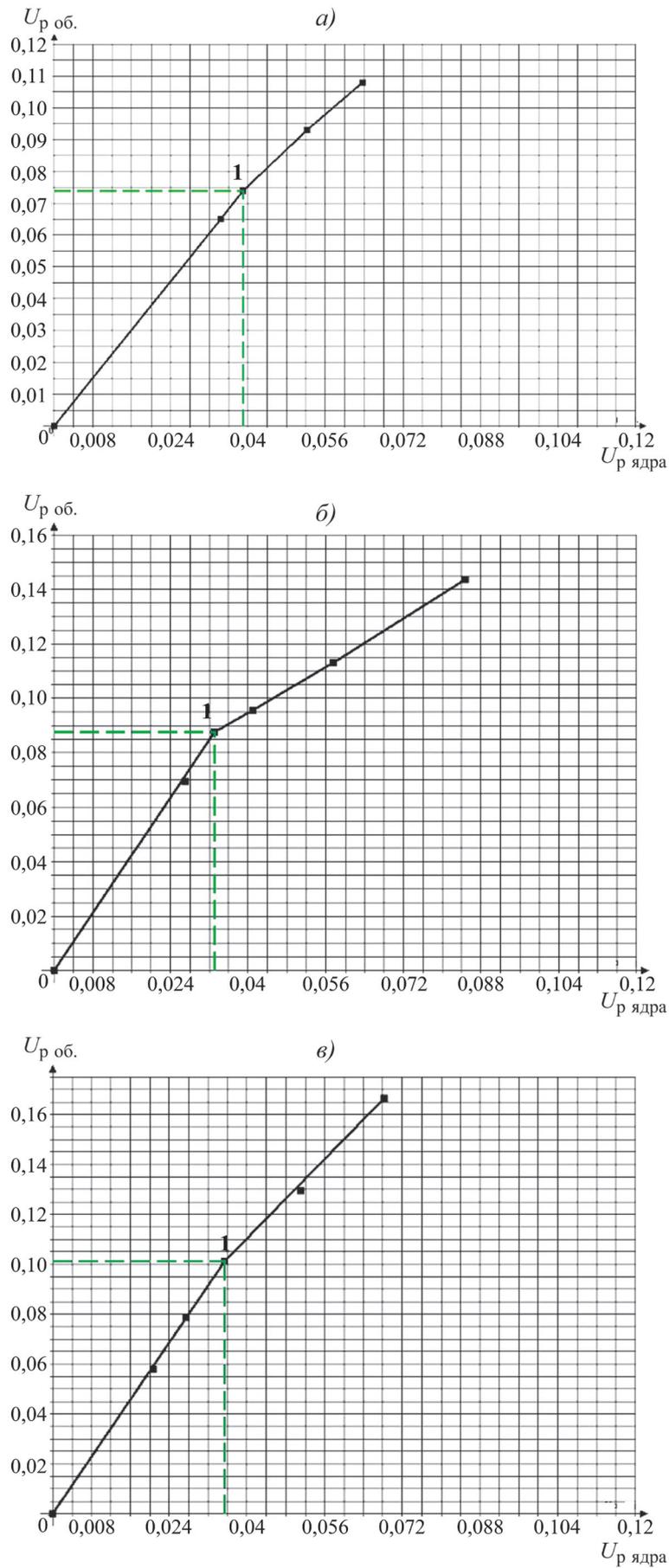


Рис. 2. Графики зависимостей  $u_{p \text{ об.}} = f(u)_{p \text{ я}}$   
 а) 24 °C, б) 36 °C, в) 48 °C

Уравнения, аппроксимирующие зависимости  $u_{p,об} = f(u_{p,я})$ 

Температура $t$ , °С	Область $u < u_{p,я}^*$	Область $u > u_{p,я}^*$	$u_{p,я}^*$ , кг/(кг сух м-ла)
24	$u_{p,об} = 1,897 u_{p,я}$	$u_{p,об} = 1,360 u_{p,я} + 0,195$	0,039
36	$u_{p,об} = 2,636 u_{p,я}$	$u_{p,об} = 1,096 u_{p,я} + 0,237$	0,033
48	$u_{p,об} = 2,857 u_{p,я}$	$u_{p,об} = 1,970 u_{p,я} + 0,299$	0,035

быть использованы для кинетического расчета процесса сушки и выбора условий хранения этого материала.

2. Для целей кинетического расчета процесса сушки математическим методом получены и аппроксимированы линейными уравнениями соотношения равновесных влагосодержаний ядра и оболочки семян.

#### Обозначения

$A_p = u_p / C_c$  – коэффициент распределения функции концентрационного фазового равновесия, (кг/(кг сух. м-ла))/(кг/м<sup>3</sup>);

$A_{p,1-2} = u_{p,об} / u_{p,я}$  – коэффициент распределения между ядром и оболочкой, безразмерен;

$k$  – коэффициент массопроводности (диффузии влаги), м<sup>2</sup>/с;

$R = d_{эк} / 2$  – радиус эквивалентного сферического тела, м;

$t$  – температура, °С;

$u$  – локальное влагосодержание материала, (кг влаги)/(кг сух. м-ла);

$\varphi$  – относительная влажность воздуха %;

$\rho_0$  – плотность абсолютно сухого материала, кг/м<sup>3</sup>;

Индексы: р – равновесный; об – оболочка; я – ядро;

1 ≡ об – внутренний слой (ядро);

2 ≡ об – внешний слой (оболочка).

#### Литература

1. Лыков А.В. Теория сушки. 2-е изд. М.: «Энергия». 1960. 465 с.
2. Рудобаица С.П. Теплотехника. 2-е изд. Доп. М.: «Перо». 2015. 672 с.
3. Гинзбург А.С., Савина И.М. Массовлагообменные характеристики пищевых продуктов. Справочник. М.: Легкая и пищевая промышленность. 1982. 280 с.
4. Рудобаица С.П. Кинетический расчет сушилок для продукции растениеводства // Сборник научных трудов Международного научно-технического семинара «Сушка, хранение и переработка продукции растениеводства», посвященного 175-летию со дня рождения К.А. Тимирязева (МНТС Тимирязев – 2018)», М.: РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, 22–23 мая 2018. С. 16–24.
5. Никитина Л.М. Таблицы равновесного удельного влагосодержания и энергии связи влаги с материалами. М.-Л.: Госэнергоиздат. 1963. 174 с.
6. Schneider, A. Neue Diagramme zur Bestimmung der relativen Luft-feuchtigkeit über gesättigten, wässrigen Salzlösungen und wässrigen Schwefelsäure – lösungen bei verschiedenen Temperaturen // Holz als Roh- und Werkstoff, 1960. Jahrg. 18. Heft 7. S. 269.
7. Гришин М.А. Установки для сушки пищевых продуктов. Справочник. М.: Агропромиздат. 1989. 215 с.
8. Рудобаица С.П. Массоперенос в системах с твердой фазой. М.: Химия. 1980. 248 с.