

**МАССОПРОВОДНОСТЬ ПРИ СУШКЕ ЯДЕР И ОБОЛОЧЕК СЕМЯН ПОДСОЛНЕЧНИКА****С.П. Рудобашта, Г.А. Зуева, В.М. Дмитриев, В.Н. Кочетков**

Станислав Павлович Рудобашта, Вадим Николаевич Кочетков

Кафедра теплотехники, гидравлики и энергообеспечения предприятий, Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева, ул. Тимирязевская, 49, Москва, Российская Федерация, 127550

E-mail: rudobashta@mail.ru, ko4etk0ff@yandex.ru

Галина Альбертовна Зуева \*

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

E-mail: zueva\_galina15@mail.ru \*

Вячеслав Михайлович Дмитриев

Кафедра безопасности и правопорядка, Тамбовский государственный технический университет, ул. Советская, 106, Тамбов, Российская Федерация, 392000

E-mail: dmitriev\_tstu@mail.ru

*Экспериментально исследованы массопроводные (диффузионные) свойства семян подсолнечника сорта «МАС 95 ОЛ». Из экспериментальных кривых сушки, полученных во внутридиффузионном кинетическом режиме при двух температурах сушильного агента (воздуха), зональным методом были рассчитаны коэффициенты массопроводности (диффузии влаги), которые представлены в виде зависимостей от влагосодержания соответственно ядра и оболочки. Показано, что коэффициенты массопроводности ядер и оболочек зависят от влагосодержания материала и существенно разнятся как по величине, так и по характеру концентрационных зависимостей. Коэффициент массопроводности у ядер на разных участках влагосодержаний в 15-25 раз больше, чем у оболочек, это объясняется различиями в структуре этих материалов. В области влагосодержаний менее 0,5 кг/(кг сух. м-ла) обе зависимости имеют одинаковый характер вогнутых возрастающих с влагосодержанием функций, это является следствием одинакового доминирующего в этой области влагосодержаний механизма массопереноса, каковым является осмотический массоперенос. У ядер семян область влагосодержаний более 0,5 кг/(кг сух. м-ла) отсутствует, а у оболочек семян она есть и доминирует в ней диффузия пара. Данные по коэффициенту массопроводности для оболочек семян были сопоставлены с коэффициентом массопроводности другого капиллярнопористого коллоидного материала со схожей структурой – древесины. Характер концентрационных зависимостей у обоих материалов одинаков, что объясняется схожестью морфологического строения древесины и оболочек семян, имеющих древесное строение. Коэффициент массопроводности ядра семени был сопоставлен с коэффициентами массопроводности других капиллярно-пористых коллоидных материалов растительного и животного происхождения. Сопоставление показало, что они имеют один порядок коэффициента массопроводности:  $10^{-9}$  м<sup>2</sup>/с. Это объясняется одинаковым строением данных материалов, имеющих клеточную структуру, и, вероятно, одинаковыми механизмами массопереноса при соответствующих влагосодержаниях. Полученные данные по коэффициентам массопроводности ядра и оболочки семени подсолнечника могут быть использованы для кинетического расчета процесса конвективной сушки этого материала на основе решения дифференциальных уравнений внутреннего тепло- и массопереноса А.В. Лыкова с представлением семени как двухслойного тела.*

**Ключевые слова:** массопроводность, диффузия, сушка, ядро семян, оболочка**Для цитирования:**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**For citation:**Rudobashta S.P., Zueva G.A., Dmitriev V.M., Kochetkov V.N. Mass conductivity for drying nuclei and seed sunflower shells. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2021. V. 64. N 5. P. 80–87

## MASS CONDUCTIVITY FOR DRYING NUCLEI AND SEED SUNFLOWER SHELLS

S.P. Rudobashta, G.A. Zueva, V.M. Dmitriev, V.N. Kochetkov

Stanislav P. Rudobashta, Vadim N. Kochetkov

Department of Heat Engineering, Hydraulics and Enterprises Energy Supply, Russian State Agrarian University – MAA named after K. A. Timiryazev, Timiryazevskaya st., 49, Moscow, 127550, Russia

E-mail: rudobashta@mail.ru, ko4etk0ff@yandex.ru

Galina A. Zueva \*

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

E-mail: zueva\_galina15@mail.ru \*

Vyacheslav M. Dmitriev

Department of Security and Nomocracy, Tambov State Technical University, Sovetskaya st., 106, Tambov, 392000, Russia

E-mail: dmitriev\_tstu@mail.ru

*The mass-conduction (diffusion) properties of sunflower seeds of the "MAS 95 OL" variety were experimentally investigated. From the experimental drying curves obtained in the intradiffusion kinetic mode at two temperatures of the drying agent (air), the coefficients of mass conductivity (moisture diffusion) were calculated by the zonal method, which are presented as dependences on the moisture content of the core and shell, respectively. It is shown that the coefficients of mass conductivity of nuclei and shells depend on the moisture content of the material and differ significantly both in magnitude and in the nature of the concentration dependences. The coefficient of mass conductivity of nuclei in different areas of moisture content is 15-25 times higher than that of shells, this is explained by differences in the structure of these materials. In the area of moisture content less than 0.5 kg / (kg of dry material), both dependences have the same character of concave functions increasing with moisture content, this is a consequence of the same mechanism of mass transfer dominating in this area of moisture content, which is osmotic mass transfer. In seed kernels, the area of moisture content of more than 0.5 kg / (kg of dry material) is absent, but in seed shells it is present and vapor diffusion dominates in it. The data on the coefficient of mass conductivity for seed shells were compared with the coefficient of mass conductivity of another capillary-porous colloidal material with a similar structure - wood. The nature of the concentration dependences for both materials is the same, which is explained by the similarity of the morphological structure of wood and seed shells, which have a tree-like structure. The coefficient of mass conductivity of the seed kernel was compared with the coefficients of mass conductivity of other capillary-porous colloidal materials of plant and animal origin. Comparison showed that they have the same order of mass conductivity coefficient:  $10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ . This is explained by the identical structure of these materials, which have a cellular structure, and, probably, by the same mechanisms of mass transfer at the corresponding moisture content. The obtained data on the coefficients of mass conductivity of the kernel and shell of sunflower seed can be used for the kinetic calculation of the process of convective drying of this material based on the solution of the differential equations of internal heat and mass transfer A. V. Lykov with the representation of the seed as a two-layer body.*

**Key words:** mass conductivity, diffusion, drying, seed core, shell

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время для кинетического расчета процессов конвективной сушки применяются различные методы, которые в [1] были распределены на три группы: эмпирические, полуэмпирические и теоретические. Теоретические методы осно-

ваны на решениях дифференциальных уравнений внутреннего теплопереноса и используют данные по теплофизическим характеристикам, являющимся справочными величинами. Их роль неуклонно возрастает, для их применения необходимы данные по коэффициенту теплопроводности (диффузии влаги).

Для определения коэффициента массопроводности предложены различные методы [2], из которых предпочтительным является зональный метод, поскольку он позволяет найти концентрационную зависимость коэффициента массопроводности. Метод базируется на решении линейного дифференциального уравнения массопроводности, полученного для случая постоянных параметров внешней среды. Это решение имеет вид бесконечного экспоненциального ряда, в котором в регулярном режиме массообмена остается один первый член ряда. Ввиду зависимости коэффициента массопроводности от влагосодержания материала в соответствии с зональным методом весь диапазон изменения влагосодержания материала разбивают на ряд концентрационных зон и находят значения коэффициента массопроводности в каждой из них. Расчетная формула для коэффициента массопроводности при этом имеет вид [2]

$$k_i = \frac{R^2}{\tau_i \mu_{k=1,i}^2} \ln \frac{B_{k=1,i} \gamma_i}{E_i} \quad (1)$$

где  $i$  – номер концентрационной зоны;  $B_{k=1,i}$  – предэкспоненциальный множитель в решении задачи при  $i = 1$ , в котором принято равномерное начальное распределение влагосодержания в теле;  $\mu_{k=1,i}$  – первый положительный корень характеристического уравнения решения задачи массопроводности.

Параметр  $\gamma_i$  учитывает изменение начальной концентрации при переходе от зоны « $i - 1$ » к  $i$  – той зоне при  $i > 1$ , в [2] приведены формулы для его расчета в зависимости от формы тела. При  $i = 1$  параметр  $\gamma_i = 1$ . Многочисленные расчеты, однако, показывают [2], что без заметной погрешности в расчетах коэффициента массопроводности по формуле (2) при  $i > 1$  можно принять  $B_{k=1,i} \gamma_i = 1$ .

Представленный выше зональный метод был выбран для определения концентрационных зависимостей коэффициента массопроводности в данной работе. Ее целью являлось получение экспериментальных данных по коэффициенту массопроводности отдельно для ядра и оболочки семени. Их наличие позволяет использовать теоретический метод расчета кинетики сушки семян подсолнечника – на основе решений дифференциальных уравнений тепло- и массопроводности, рассматривая семя как двухслойное тело. Отметим, что в литературе отсутствуют такого рода данные для двухслойных тел, хотя они достаточно распространены в производстве: семена таких культур, как подсолнечник, тыква и др., двухслойные таблетки в химико-фармацевтической промышленности,

капсулированные минеральные удобрения и др. Перечисленные материалы имеют достаточно правильную геометрическую форму, что позволяет применять теоретические (математические) методы описания кинетики их сушки.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Экспериментальные исследования проводили на лабораторной установке, специально созданной для определения коэффициента массопроводности из кривых сушки, полученных в условиях, исключая внешнее диффузионное сопротивление. Она состояла из термостатированного шкафа, внутри которого находился рабочий канал с подвешенными к весам образцами ядер или оболочек семян подсолнечника, помещенными между витками пружинной подвески, центробежный вентилятор, создающий рециркуляционный поток воздуха в пределах его скоростей 0,5-5 м/с, электрический калорифер для нагрева воздуха до определенной температуры (в пределах 30-200 °С), терморегулятор, торсионные весы марки PRLT фирмы Techniport для взвешивания образцов с погрешностью 1 мг. Скорость воздуха, обдувающего высушиваемые образцы, измеряли термоанемометром с погрешностью  $\pm 0,05$  м/с, температуру – термопарой марки ХК со вторичным прибором 2 ТРМОА (погрешность – 0,2 °С). Внутри термостата были помещены кюветы с адсорбентом (цеолитом) для осушения рециркуляционного воздуха – с целью поддержания его постоянной низкой влажности в камере, близкой к нулевой.

Исследовали ядра и оболочки семян подсолнечника сорта «МАС 95 ОЛ».

Порядок эксперимента был следующим. Выводили установку на заданный температурный режим, затем в нее быстро помещали подвеску с образцами, взвешивали ее, включали секундомер и начинали опыт, в ходе которого через определенные промежутки времени измеряли вес подвески с образцами (вентилятор во время взвешивания выключали). По окончании опыта образцы извлекали из рабочей камеры и определяли их сухую массу весовым методом по ГОСТ10856 - 96. «Метод определения влажности» (дата актуализации 21.04.2018 г.). Кривые сушки получали с трехкратной повторностью на новых образцах при двух температурах сушильного агента: 40 °С и 50 °С, при скорости воздуха 5 м/с, при которой внешнее диффузионное сопротивление отсутствует (о его отсутствии судили по тому факту, что изменение скорости сушильного агента вдвое не влияло на кривую сушки).

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные кривые сушки приведены на рис. 1 и 2. Было установлено, что при скорости воздуха 5 м/с сушка полностью контролируется внутренней диффузией, т.к. дальнейшее увеличение скорости воздуха не влияло на скорость сушки. Из опытных кривых сушки по уравнению (1) зональным методом были рассчитаны зависимости коэффициента массопроводности от влагосодержания материала – при каждом температурном режиме:  $k = f(u)$ .

Необходимые для этих расчетов данные по геометрическим размерам образцов получали пикнометрическим методом – с помощью мерных цилиндров. Таким же способом определяли объем ядер семян. При анализе опытных данных семена в целом и их ядра уподобляли сферам эквивалентного объема и рассчитывали их диаметры (мм) по уравнению

$$d_s = \sqrt[3]{\frac{6V}{\pi}}, \quad (2)$$

где  $V$  – объем одного образца, мм<sup>3</sup>.

По формуле (2) были вычислены эквивалентные диаметры семян в целом и их ядер, которые оказались равными:  $d_{эс} = 5,94$  мм,  $d_{эя} = 4,56$  мм. Толщину оболочек измеряли штангенциркулем, получив следующее среднее значение толщины:  $l = 0,42$  мм, разница же значений  $(d_{эс} - d_{эя})/2 = 0,69$  мм. Это указывает на то, что оболочки семян плотно не прилегают к своим ядрам, между ними есть воздушный зазор толщиной примерно 0,27 мм. Это надо учитывать при расчете кинетики сушки семян подсолнечника по теоретической модели как для двухслойного тела на основе решений дифференциального уравнения массопроводности. Была исследована также плотность абсолютно сухих ядер и оболочек, которые оказались соответственно равными:  $\rho_{я} = 1248$  кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_{об} = 2828$  кг/м<sup>3</sup>.

Из полученных кривых сушки зональным методом были найдены функции  $k = f(u)_i$ . Весь интервал изменения влагосодержания ядер и оболочек в опытах (рис. 1 и 2) разбивали на несколько ( $m$ ) концентрационных зон, в каждой из которых коэффициент массопроводности  $k_i$  принимали постоянным. Для этих зон из кривой сушки определяли значение  $\tau_i$  (время изменения влагосодержания на интервале  $(\bar{u}_{н.i} - \bar{u}_{к.i})$ ) и далее рассчитывали коэффициент  $k_i$  – по формуле (1), уподобляя ядро – сфере, а оболочку – пластине. При внутридиффузионном кинетическом режиме коэффициент  $\mu_{п-1,i}$  для ядра (сферы) равен  $\mu_{я} = \pi$ , для пластины (обо-

лочки)  $\mu_{об} = \pi/2$ ; предэкспоненциальный множитель для сферы и для пластины в силу вышеизложенного брали равным 1. Полученные на основе этих расчетов зависимости  $k = f(u)_i$  приведены на рис. 3 и 4.

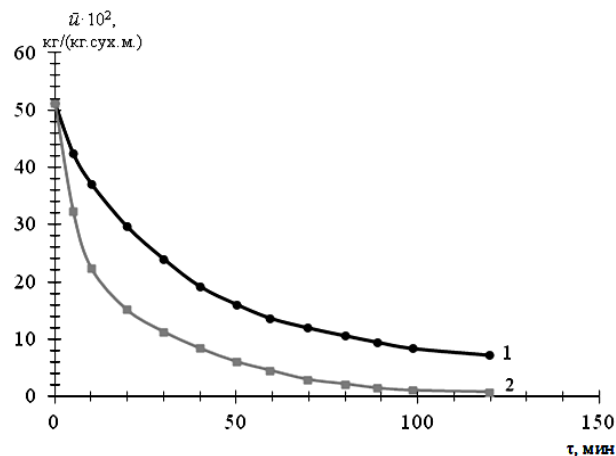


Рис. 1. Кривые сушки ядра семени подсолнечника сорта MAS 95 ОЛ (температура: 1- 40 °С; 2 – 50 °С)

Fig. 1. Drying curves for kernel of sunflower seeds of variety MAS 95 OL (temperature: 1- 40 °С; 2 – 50 °С)

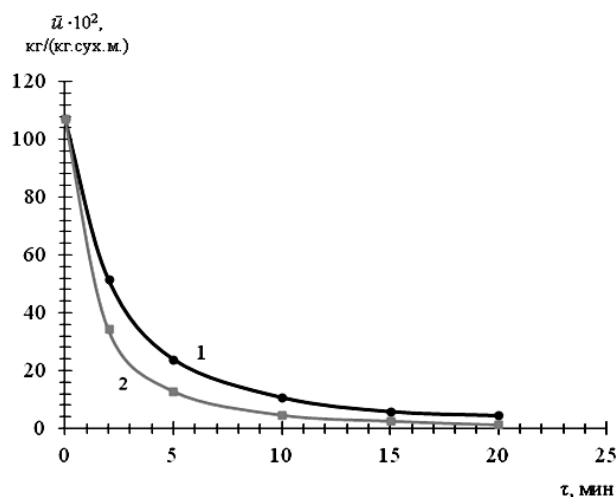


Рис. 2. Кривые сушки оболочки семени подсолнечника сорта MAS 95 ОЛ (температура: 1- 40 °С; 2 – 50 °С)

Fig. 2. Drying curves for shell of sunflower seeds of variety MAS 95 OL (temperature: 1- 40 °С; 2 – 50 °С)

Их рассмотрение позволяет сделать следующие выводы: 1) коэффициент массопроводности ядер и оболочек зависит от влагосодержания материала; 2) зависимости  $k = f(u)_i$  ядер и оболочек существенно разнятся как по величине, так и по характеру концентрационных зависимостей; 3) коэффициент массопроводности у ядер на разных участках влагосодержаний материала в 15-25 раз больше, чем у оболочек; 4) в области влагосодержаний  $u < 0,5$  обе зависимости имеют одинаковый характер возрастающих функций.

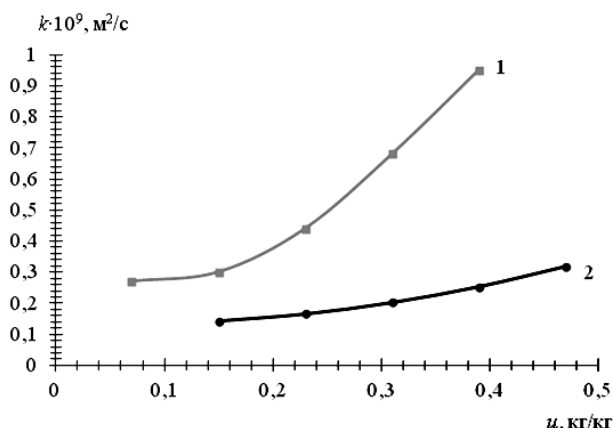


Рис. 3. Зависимость  $k = f(u)t$  для ядра семени подсолнечника MAC 95 ОЛ (температура: 1- 50 °С; 2 – 40 °С)  
 Fig. 3. Dependence  $k = f(u)t$  for the sunflower seed kernel MAC 95 OL (temperature: 1- 50 °С; 2 – 40 °С)

Внутренний массоперенос при сушке происходит как в жидкой, так и в паровой фазе, под действием ряда механизмов, основными из которых (без учета термодиффузии и молярного массопереноса) в общем случае являются: поверхностная, кнудсеновская и свободная диффузия пара, перенос жидкой влаги под действием градиента расклинивающего давления пленки, осмотический массоперенос, капиллярная массопроводность (тонкие капилляры высасывают влагу из широких капилляров и транспортируют ее к поверхности) [2, 3]. Вклад отдельных составляющих в общий массоперенос на различных участках влагосодержаний материала непрерывно меняется. Это, собственно, и приводит к концентрационной зависимости коэффициента массопроводности.

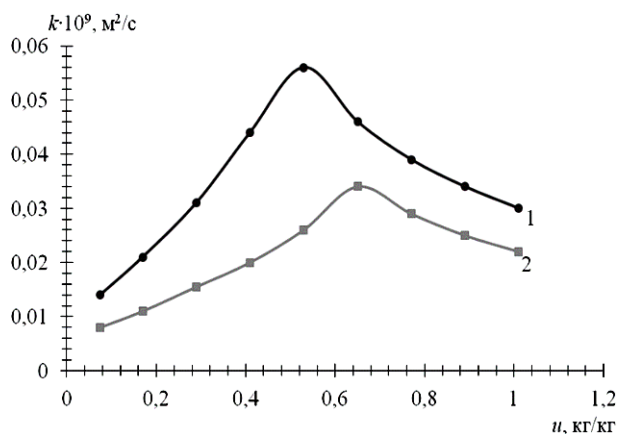


Рис. 4. Зависимость  $k = f(u)t$  для оболочки семени подсолнечника MAC 95 ОЛ (температура: 1- 50 °С; 2 – 40 °С)  
 Fig. 4. Dependence  $k = f(u)t$  for the sunflower seed shell MAC 95 OL (temperature: 1- 50 °С; 2 – 40 °С)

Полученные данные по коэффициенту массопроводности для оболочки были сопоставлены с

коэффициентом массопроводности другого коллоидного капиллярно-пористого материала со схожей структурой – древесины (рис. 5, данные из [3]). Сравнение показывает, что характер зависимости  $k = f(u)_t$  у обоих материалов одинаков, что объясняется схожестью морфологического строения древесины и оболочек семян (последние имеют древесное строение). Согласно А.В. Лыкову, сложный характер зависимости коэффициента массопроводности (коэффициента диффузии влаги) коллоидных капиллярно-пористых материалов типа древесины от влагосодержания объясняется изменением с влагосодержанием доминирующего механизма внутреннего массопереноса в процессе сушки [3]. В области малых влагосодержаний – до точки максимума на кривых  $k = f(u)$  у коллоидных капиллярно-пористых материалов типа древесины доминирующим массопереносом по А.В. Лыкову [3] является осмотический перенос влаги, а при больших влагосодержаниях (на ниспадающей правой ветви зависимости  $k = f(u)$  после точки максимума) – диффузия пара [3]. При весьма больших влагосодержаниях материала имеет место капиллярная массопроводность. Этот участок зависимости  $k = f(u)$  наблюдается у древесины при  $u > 1$  (рис.5), у оболочек семян области  $u > 1$  просто нет (рис. 4).

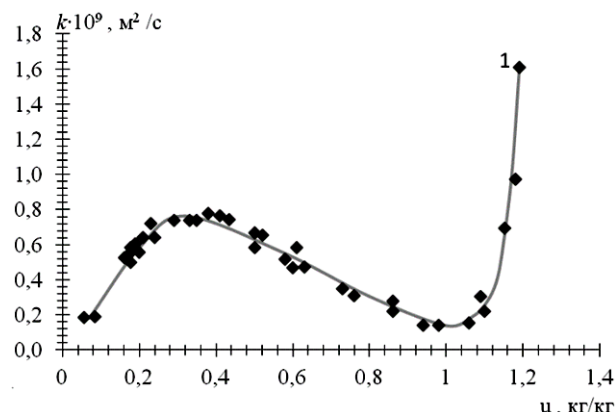


Рис. 5. Зависимость  $k = f(u)$  для древесины (сосна) при  $t = 30$  °С [3]  
 Fig. 5. Dependence  $k = f(u)$  for wood (pine) at  $t = 30$  °С [3]

О. Кришер выделяет два главных механизма внутреннего массопереноса у коллоидных капиллярно-пористых материалов типа древесины: в области больших влагосодержаний – капиллярный поток влаги, а в области более низких – диффузию пара, причем составляющую коэффициента массопроводности, ответственную за перенос пара, считает постоянной [4].

В [2], однако, показано, что, поскольку диффузия пара в порах материала пропорциональна

градиенту концентрации пара ( $\text{grad } C_{\text{пар}}$ ), а при описании внутреннего массопереноса в порах материала перенос влаги при сушке описывается через градиент влагосодержания ( $\text{grad } u$ ), то при переходе в описании потока пара от ( $\text{grad } C_{\text{пар}}$ ) к ( $\text{grad } u$ ), который осуществляется через функцию фазового концентрационного равновесия в порах материала  $C_{\text{пар}} = f(u)$ , возникает производная  $\frac{\partial C_{\text{пар}}}{\partial u}$  от этой

функции, вид которой влияет на конфигурацию паросоставляющей зависимости коэффициента массопроводности  $k_{\text{пар}} = f(u)$ , которая, в свою очередь, влияет на общий характер функции  $k = f(u)$  в области низких и средних влагосодержаний. Горизонтальный характер зависимости  $k_{\text{пар}} = f(u)$  может наблюдаться только у линейной производной  $\frac{\partial C_{\text{пар}}}{\partial u}$ . Это необходимо иметь в виду при анализе функций  $k = f(u)$ .

Коэффициент массопроводности ядра был сопоставлен с коэффициентами массопроводности семян различных зерновых и овощных культур (таблица). Все сравниваемые данные показывают зависимость коэффициента массопроводности от влагосодержания материала, причем вид этих зависимостей аналогичен зависимости, приведенной на рис. 3 для ядра семени подсолнечника. Это позволяет считать, что во всех случаях «работают» одни и те же механизмы внутреннего массопереноса. Как видно из таблицы, все семена имеют порядок коэффициента массопроводности  $10^{-9} \text{ м}^2/\text{с}$ , обращает на себя также внимание относительно небольшое различие в значениях этого коэффициента независимо от рода культуры и физико-химического строения семени. Это объясняется одинаковым строением этих материалов, имеющих клеточную структуру, и, вероятно, одинаковым механизмом массопереноса при рассматриваемых влагосодержаниях.

Значения коэффициента массопроводности при сушке ядер семян подсолнечника были сопоставлены также с данными по коэффициенту массопроводности (диффузии влаги) других капиллярно-пористых коллоидных материалов растительного и животного происхождения, полученных в последние годы [10-22], а именно: фисташек [10], бамии [11], белой шелковицы [12], зеленого перца [13], редиса [14], пропаренных долек картофеля [15], сырого и сваренного куриного мяса [16], кишок крупного рогатого скота для корма домашних животных [17], зеленого горошка [18], кубиков очищенных спелых помидоров [19].

В этих работах определяли изменение коэффициента диффузии  $D_e$  (терминология авторов) только от температуры сушильного агента. Значения  $D_e$  находили методом параметрической идентификации (т.е. методом подбора такого постоянного значения коэффициента диффузии, которое позволяет наилучшим образом воспроизвести кривую сушки).

Таблица

**Коэффициент массопроводности семян различных культур**

**Table. Mass conductivity coefficient of seeds of various crops**

Культура	Семена	$k_{\text{мин}} \cdot 10^9, \text{ м}^2/\text{с}$ , при температуре	
		40 °С	50 °С
Подсолнечник	Ядро семени подсолнечника сорта «МАС 95 ОЛ» (эта работа)	0,13	0,29
Овощные культуры	Лук сорта «Штутгартер ризен» [7]	0,50	0,75
	Горчица белая [7]	0,67	0,75
	Петрушка сорта «Кучерявец» [7]	0,18	0,26
	Перец сладкий сорта «Соната» [7]	0,25	0,36
	Огурец сорта «Водолей» [8]	0,05	0,078
Зерновые	Пшеница Московская 39 [5]	0,20	0,32
	Рожь Восход 2 [7]	0,26	0,37
	Ячмень Михайловский [7]	0,29	0,38
	Рапс [6]	0,32	0,50
	Овес Горизонт [7]	0,10	0,17
	Кукуруза сорт «Пионер ПР 7709 ФАО 160» [9]	0,11	0,13

Отметим также работу по массопроводности плотного не продуваемого слоя высушиваемых семян лука репчатого сорта «Штутгартер ризен» [20]. Коэффициент массопроводности слоя семян, обдуваемого вдоль открытой поверхности, в интервале температур 40-60 °С также имеет порядок  $10^{-9} \text{ м}^2/\text{с}$ . При сушке плотного не продуваемого слоя семян перенос влаги в слое происходит не только по твердой фазе (от семени к семени через места их контакта), но и путем диффузии пара в межсеменном пространстве.

Анализ цитируемых данных показывает, что коэффициенты диффузии (массопроводности) при сушке различных капиллярно-пористых коллоид-

ных материалов растительного и животного происхождения имеют порядок  $10^{-10}$ - $10^{-9}$  м<sup>2</sup>/с. Это сопоставимо по порядку величины с коэффициентом массопроводности при сушке ядра семени подсолнечника и зерновых культур, что объясняется однотипностью структуры твердой фазы, имеющей клеточное строение. В то же время, для обеспечения требуемой точности инженерных расчетов кинетики сушки необходимо использовать данные по коэффициенту массопроводности каждого конкретного материала и учитывать изменение этого коэффициента как с температурой, так и с влажностью высушиваемого материала. Отметим, что зависимость  $k = f(u)$  может быть найдена использованным в данной работе зональным методом из экспериментальной кривой кинетики, впервые описанным в [21].

#### ВЫВОДЫ

Исследована и проанализирована массопроводность при сушке ядер и оболочек семян подсолнечника.

Показано, что коэффициент массопроводности у ядер на разных участках влажностных материалов в 15-25 раз больше, чем у оболочек.

По характеру концентрационных зависимостей и величине коэффициент массопроводности ядер семени подсолнечника аналогичен такому у семян различных культур, а коэффициент массопроводности оболочки семени подсолнечника аналогичен коэффициенту массопроводности древесины.

Сопоставление коэффициента массопроводности ядра семени подсолнечника с данными по коэффициенту массопроводности (диффузии) других капиллярно-пористых коллоидных материалов растительного и животного происхождения

показывает, что по порядку величины они сопоставимы, однако для инженерных расчетов кинетики сушки нужно использовать данные по каждому конкретному материалу и учитывать зависимость этого коэффициента от влажностного содержания материала и температуры.

Полученные данные по коэффициентам массопроводности ядер и оболочек могут быть использованы при кинетическом расчете кинетики сушки семян подсолнечника теоретическим методом при рассмотрении семени как двухслойного тела.

#### ОБОЗНАЧЕНИЯ

$A_p$  – коэффициент распределения функции равновесия, (кг/(кг сух. м))/(кг/м<sup>3</sup>);

$d_э$  – диаметр эквивалентный, м;

$De \equiv k$  – коэффициент диффузии влаги, м<sup>2</sup>/с;

$k$  – коэффициент массопроводности, м<sup>2</sup>/с;

$R$  – характерный размер тела (радиус сферы или половина толщины пластины) в опытах по массопроводности, м;

$t, T$  – температура, °С и К, соответственно;

$u, \bar{u}$  – локальное и среднее по объему тела влажностное содержание соответственно, кг/(кг сух. м-ла);

$u_p^* = (A_{p,пов} / A_p) u_p$  – модифицированное равновесное влажностное содержание, кг/(кг сух. м-ла);

$\tau$  – время, с;

$\bar{E} = \frac{\bar{u}(\tau) - u_p^*}{u_n - u_p^*}$  – среднее относительное

влажностное содержание тела;

Индексы: н – начальный; кап – капиллярный; об – оболочка семени; пар – пар; п – поверхность тела; пл – пластина; р – равновесный; с – семя; я – ядро семени;  $i$  – номер концентрационной зоны.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Рудобашта С.П. Математическое моделирование процесса конвективной сушки дисперсных материалов. *Изв. РАН. Энергетика*. 2000. № 4. С. 98-108.
2. Рудобашта С.П. Массоперенос в системах с твердой фазой. М.: Химия. 1980. 248 с.
3. Лыков А.В. Теория сушки. М.: Энергия. 1968. 422 с.
4. Krischer O. Die wissenschaftlichen Grundlagen der Trocknungstechnik. Berlin-Göttingen-Heidelberg: Springer-Verlag. 1963. 491 p. DOI: 10.1007/978-3-662-26011-1.
5. Забавин И.С., Рудобашта С.П., Дмитриев В.М. Исследование диффузионных свойств зерна. *Хранение и переработка сельхозсырья*. 2010. № 8. С. 24 – 28.
6. Рудобашта С.П., Моряков А.В., Дмитриев В.М. Массопроводность семян рапса при сушке. *Хранение и переработка сельхозсырья*. 2012. № 8. С.42 – 46.

#### REFERENCES

1. Rudobashta S.P. Mathematical modeling of the process of convective drying of dispersed materials. *Izv. RAN. Energetika*. 2000. N 4. P. 98-108 (in Russian).
2. Rudobashta S.P. Mass Transfer in Solid Phase Systems. M.: Khimiya. 1980. 248 p. (in Russian).
3. Luikov A.V. Theory of Drying. M.: Energiya. 1968. 472 p. (in Russian).
4. Krischer O. Die wissenschaftlichen Grundlagen der Trocknungstechnik. Berlin-Göttingen-Heidelberg: Springer-Verlag. 1963. 491 p. DOI: 10.1007/978-3-662-26011-1.
5. Zabavin I.S., Rudobashta S.P., Dmitriev V.M. Study of the diffusion properties of grain. *Khrenenie Pererabotka Sel'khozsyrya*. 2010. N 8. P. 24 - 28 (in Russian).
6. Rudobashta S.P., Moryakov A.V., Dmitriev V.M. Mass conductivity of rape seeds during drying. *Khrenenie Pererabotka Sel'khozsyrya*. 2012. N 8. P. 42 - 46 (in Russian).

7. **Рудобашта С.П., Зуева Г.А., Дмитриев В.М., Зуев Н.А.** Массопроводность при сушке коллоидных капиллярно-пористых материалов. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2014. Т. 57. Вып. 1. С. 103-107.
8. **Rudobashta S., Zueva G.** Drying of seeds through oscillating infrared heating. *Dry. Technol.* 2016. V. 34. N 5. P. 505-515. DOI: 10.1080/07373937.2015.1060997.
9. **Rudobashta S.P., Zueva G.A., Muravleva E.A., Dmitriev V.M.** Mass Conductivity of Capillary-Porous Colloidal Materials Subjected to Convective Drying. *J. Eng. Phys. Thermophys.* 2018. V. 91. N 4. P. 845-853. DOI: 10.1007/s10891-018-1808-x.
10. **Tavakolipour H., Kalbasi A. Ashtari, Basiri A.** Effect of drying parameters on quality index of Damghan pistachio and determination of effective diffusion indexes at modified conditions of this process. *J. Food Sci. Technol.* 2008. 5th period. N 4. P. 47-56.
11. **Sobukola O.** Effect of Pre-Treatment on the Drying Characteristics and Kinetics of Okra (*Abelmoschus esculentus* L. Moench) Slices. *Internat. J. Food Eng.* 2009. V. 5(2). P. 20-26. DOI: 10.2202/1556-3758.1191.
12. **Doymaz I.** Drying kinetics of white mulberry. *J. Food Eng.* 2004. V. 61. P. 341-346. DOI: 10.1016/S0260-8774(03)00138-9.
13. **Faustino J.M.F., Barroca M.J., Guine R.P.F.** Study of the drying kinetics of green bell pepper and chemical characterization. *Trans IchemE.* 2007. V. 58. P. 163-170. DOI: 10.1205/fbp07009.
14. **Khanzadeh F., Tavakolipour H., Rahmani F.** Convection drying kinetics of asian white radish raphanus sativus l. slices. 17th International Drying Symposium (IDS 2010). Magdeburg, Germany. October 3-6, 2010. Poster P 037. P. 552-558. (electronic edition).
15. **Aghamasihi M., Khazaei J., Akmal A.A.S.** A new way to produce dietary potato chips: drying the potato steamed crisps in hot air. XIII Polish Drying Symposium Szczecin – Kołobrzeg. September 5 – 6. 2013. N 246. (electronic edition).
16. **Hii Ching Lik, Cobham E. Itam.** Convective air drying of raw and cooked chicken meat. XIII Polish Drying Symposium Szczecin – Kołobrzeg. September 5 – 6, 2013. N 44. (electronic edition).
17. **Alves-Filho O., Senadeera W., Eikevik T.** Influence of drying conditions on the moisture diffusion during single stage and two stage fluidized bed drying of bovine intestine for pet food. 6-th Nordic Drying Conference. June 5-7. 2013. Copenhagen, Denmark (electronic edition).
18. **Mukhatov K., Alves-Filho O.** Study of the effect of drying conditions in atmospheric heat pump drying of green peas. 6-th Nordic Drying Conference. June 5-7. 2013. Copenhagen, Denmark (electronic edition).
19. **Martinez-Vera C., Vizzarra-Mendoza M.** Fluidized bed drying simulation considering solid Shrinkage. 6-th Nordic Drying Conference. June 5-7. 2013. Copenhagen, Denmark (electronic edition).
20. **Рудобашта С.П., Зуева Г.А., Дмитриев В.М.** Исследование массопроводных свойств слоя семян. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2017. Т. 60. Вып. 7. С. 72-77. DOI: 10.6060/tect.2017607.5556.
21. **Очнев Э.Н., Рудобашта С.П., Плановский А.Н., Дмитриев В.М.** Зональный метод определения зависимости коэффициента массопроводности от концентрации. *Теор. основы хим. технол.* 1975. Т. IX. № 4. С. 491-495.
7. **Rudobashta S.P., Zueva G.A., Dmitriev V.M., Zuev N.A.** Mass conductivity during drying of colloidal capillary-porous materials. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2014. V. 57. N 1. P. 103-107 (in Russian).
8. **Rudobashta S., Zueva G.** Drying of seeds through oscillating infrared heating. *Dry. Technol.* 2016. V. 34. N 5. P. 505-515. DOI: 10.1080/07373937.2015.1060997.
9. **Rudobashta S.P., Zueva G.A., Muravleva E.A., Dmitriev V.M.** Mass Conductivity of Capillary-Porous Colloidal Materials Subjected to Convective Drying. *J. Eng. Phys. Thermophys.* 2018. V. 91. N 4. P. 845-853. DOI: 10.1007/s10891-018-1808-x.
10. **Tavakolipour H., Kalbasi A. Ashtari, Basiri A.** Effect of drying parameters on quality index of Damghan pistachio and determination of effective diffusion indexes at modified conditions of this process. *J. Food Sci. Technol.* 2008. 5th period. N 4. P. 47-56.
11. **Sobukola O.** Effect of Pre-Treatment on the Drying Characteristics and Kinetics of Okra (*Abelmoschus esculentus* L. Moench) Slices. *Internat. J. Food Eng.* 2009. V. 5(2). P. 20-26. DOI: 10.2202/1556-3758.1191.
12. **Doymaz I.** Drying kinetics of white mulberry. *J. Food Eng.* 2004. V. 61. P. 341-346. DOI: 10.1016/S0260-8774(03)00138-9.
13. **Faustino J.M.F., Barroca M.J., Guine R.P.F.** Study of the drying kinetics of green bell pepper and chemical characterization. *Trans IchemE.* 2007. V. 58. P. 163-170. DOI: 10.1205/fbp07009.
14. **Khanzadeh F., Tavakolipour H., Rahmani F.** Convection drying kinetics of asian white radish raphanus sativus l. slices. 17th International Drying Symposium (IDS 2010). Magdeburg, Germany. October 3-6, 2010. Poster P 037. P. 552-558. (electronic edition).
15. **Aghamasihi M., Khazaei J., Akmal A.A.S.** A new way to produce dietary potato chips: drying the potato steamed crisps in hot air. XIII Polish Drying Symposium Szczecin – Kołobrzeg. September 5 – 6. 2013. N 246. (electronic edition).
16. **Hii Ching Lik, Cobham E. Itam.** Convective air drying of raw and cooked chicken meat. XIII Polish Drying Symposium Szczecin – Kołobrzeg. September 5 – 6, 2013. N 44. (electronic edition).
17. **Alves-Filho O., Senadeera W., Eikevik T.** Influence of drying conditions on the moisture diffusion during single stage and two stage fluidized bed drying of bovine intestine for pet food. 6-th Nordic Drying Conference. June 5-7. 2013. Copenhagen, Denmark (electronic edition).
18. **Mukhatov K., Alves-Filho O.** Study of the effect of drying conditions in atmospheric heat pump drying of green peas. 6-th Nordic Drying Conference. June 5-7. 2013. Copenhagen, Denmark (electronic edition).
19. **Martinez-Vera C., Vizzarra-Mendoza M.** Fluidized bed drying simulation considering solid Shrinkage. 6-th Nordic Drying Conference. June 5-7. 2013. Copenhagen, Denmark (electronic edition).
20. **Rudobashta S.P., Zueva G.A., Dmitriev V.M.** Study of mass conductivity properties of seeds layer. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2017. V. 60. N 7. P. 72-77. DOI: 10.6060/tect.2017607.5556.
21. **Ochnev E.N., Rudobashta S.P., Planovsky A.N., Dmitriev V.M.** Zonal method for determining the dependence of the mass conductivity coefficient on concentration. *Teor. Osnovy Khim. Tekhnol.* 1975. V. IX. N 4. P. 491-495 (in Russian).

Поступила в редакцию (Received) 16.11.2020  
 Принята к опубликованию (Accepted) 18.02.2021