

УДК 66.047

**Евгений Валентинович Гусев**

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент кафедры энергетике теплотехнологий и газоснабжения, Россия, Иваново, e-mail: gusev\_pcm@mail.ru

**Анатолий Иванович Сокольский**

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, профессор кафедры энергетике теплотехнологий и газоснабжения, Россия, Иваново, e-mail: tevp@tvp.ispu.ru

**Алена Андреевна Сергиенкова**

ООО «СиЭнПи», инженер, Россия, Ярославль, e-mail: k\_pcm@ivgpu.com

**Елена Александровна Шуина**

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, профессор кафедры прикладной математики, Россия, Иваново, e-mail: HM\_ISPU@mail.ru

## Массопроводность дисперсных и листовых материалов в условиях термодинамического равновесия

### Авторское резюме

**Состояние вопроса.** Интенсификация сушки влажных капиллярно-пористых тел и их структурно-деформационные преобразования во многом определяются внутренним механизмом переноса влаги в высушиваемом материале. Исследованию массопроводности различных тел посвящены работы А.В. Лыкова, С.П. Рудобашты, Б.С. Сажина, Э.Н. Очнева, Н.В. Чураева, которые подтверждают важность определения характеристик внутреннего переноса влаги в виде жидкости и пара для расчета интенсивности влагообмена между поверхностью влажного материала и теплоносителем и установления соотношения потоков влаги и тепла не только в процессе сушки, но и при хранении материалов. Для дисперсных и листовых капиллярно-пористых материалов, различных по составу и пористой структуре, определение интенсивности внутреннего переноса влаги в ходе их взаимодействия с окружающей средой является актуальным направлением исследования, определяющим способ сушки, режимные условия тепловой обработки и энергоэффективность.

**Материалы и методы.** В качестве объектов исследования использованы различные по форме, размерам, структуре и влажности дисперсные и листовые капиллярно-пористые материалы. Для определения параметров массопроводности влажного тела при взаимодействии его с теплоносителем применялся термодинамический метод, основанный на использовании экспериментальных изотерм десорбции и расчетных параметров, характеризующих пористую структуру материала.

**Результаты.** Приведена методика расчета коэффициентов массопроводности дисперсных и листовых материалов на основе экспериментальных данных, полученных в условиях термодинамического равновесия влажного тела и газа. Получены расчетные зависимости эффективных коэффициентов массопроводности от влагосодержания различных влажных материалов с учетом параметров воздуха.

**Выводы.** Полученные данные о закономерностях и характере изменения коэффициентов массопроводности позволили установить виды связи влаги с материалом с механизмами ее переноса для ряда дисперсных и листовых тел и могут быть использованы для кинетического расчета процесса сушки и определения условий их хранения, а также выявления условий для повышения энергетической эффективности сушилок с конвективным подводом.

**Ключевые слова:** массопроводность, десорбция, теплоноситель, процесс сушки, влагосодержание, капиллярно-пористое тело, кинетические закономерности, интенсивность массопереноса, энергоэффективность

**Evgenij Valentinovich Gusev**

Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences (PhD), Associate Professor of Thermal Technologies and Gas Supply Department, Russia, Ivanovo, e-mail: gusev\_pcm@mail.ru

**Anatolij Ivanovich Sokolsky**

Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering, (Post-doctoral degree), Professor of Thermal Technologies and Gas Supply Department, Russia, Ivanovo, e-mail: tevp@tvp.ispu.ru

**Alena Andreevna Sergienkova**

LLC «SiJenPi», Engineer, Russia, Yaroslavl, e-mail: k\_pcm@ivgpu.com

**Elena Aleksandrovna Shuina**

Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Technical Sciences, (Post-doctoral degree), Professor of Applied Mathematics Department, Russia, Ivanovo, e-mail: HM\_ISPU@mail.ru

## Mass conductivity of dispersed and sheet materials under thermodynamic equilibrium conditions

### Abstract

**Background.** The intensification of drying of wet capillary-porous bodies and their structural and deformation transformations is determined by the internal mechanism of moisture transfer in the material being dried. The scientific papers of A.V. Lykova, S.P. Rudobashty, B.S. Sazhina, E.N. Ochneva, N.V. Churaeva are devoted to the study of mass conductivity of various bodies. They confirm the importance to determine the characteristics of internal moisture transfer in the form of liquid and vapor to calculate the intensity of moisture exchange between the surface of a wet material and the coolant and to establish the ratio of moisture and heat flows not only during the drying process, but also during storage of materials. For dispersed and sheet capillary-porous materials of different composition and porous structure, determining the intensity of internal moisture transfer during their interaction with the environment is a relevant area of the research.

It determines the drying method, thermal treatment conditions and energy efficiency.

**Materials and methods.** Dispersed and sheet capillary-porous materials of various shapes, sizes, structures, and humidity have been used as the objects of the study. To determine the mass conductivity parameters of a wet body during its interaction with a coolant, a thermodynamic method is used. It is based on the use of experimental desorption isotherms and calculated parameters characterizing the porous structure of the material.

**Results.** The authors have applied the method to calculate the mass conductivity coefficients of dispersed and sheet materials based on experimental data obtained under conditions of thermodynamic equilibrium of a wet body and gas. Calculated curves of the dependence of effective mass conductivity coefficients and the moisture content of the dried material are obtained considering environmental parameters.

**Conclusions.** The data obtained on the patterns and the changes in mass conductivity coefficients makes it possible to establish the types of relationships between moisture and the material with the mechanisms of its transfer for a number of dispersed and sheet bodies. The data obtained can be used for the kinetic calculation of the drying process and to determine the conditions of their storage, as well as to identify the conditions for increasing the energy efficiency of dryers with convective supply.

**Key words:** mass conductivity, desorption, coolant, drying, moisture content, capillary-porous body, kinetics, intensity of mass transfer, energy efficiency

DOI: 10.17588/2072-2672.2023.6.038-042

**Введение.** В современных условиях для выбора способа и режимных параметров сушки влажных капиллярно-пористых материалов, аппаратно-технологического оформления термической обработки с учетом эффективности энергосбережения необходимо иметь данные об интенсивности удаления влаги из внутрипорового пространства высушиваемого изделия [1–3].

Продолжительность сушки влажных материалов и их структурно-механические преобразования зависят не только от режимных термовлажностных и гидродинамических условий тепловой обработки, но и от механизма и скорости переноса капиллярно-связанной влаги внутри тела.

Основным параметром, характеризующим интенсивность перемещения влаги в капиллярно-пористом высушиваемом теле, является эффективный коэффициент массопроводности  $K_{эф}$ , отражающий совмещенный перенос влаги в виде жидкости и пара.

Информация о коэффициентах массопроводности (диффузии водяного пара  $K_n$  и капиллярной конденсации  $K_k$ ) позволяет определить формы связи влаги с материалом и области ее преимущественного внутреннего диффузионного перемещения в виде жидкости или пара [4, 5].

Характер и интенсивность массопереноса внутри капиллярно-пористого тела определяют по результатам исследования кинетиче-

ских закономерностей обезвоживания влажного материала в различных термодинамических условиях [6–11].

Ниже определяются эффективные коэффициенты переноса влаги внутри капиллярно-пористых дисперсных и листовых материалов на основе экспериментальных кривых десорбции в различных условиях термодинамического равновесия.

**Методы исследования.** Термодинамический (адсорбционный) метод определения эффективного коэффициента массопроводности основывается на обработке экспериментальных кривых десорбций, характеризующих зависимость между равновесным влагосодержанием тела  $U_p$  и относительной влажностью воздуха  $\varphi$ . Данная зависимость определяется при температуре воздуха 20–22 °С статическим весовым методом [12]. При этом образцы исследуемых материалов с различным влагосодержанием выдерживались в эксикаторах над насыщенными растворами серной кислоты определенной концентрации, отражающей соответствующее значение относительной влажности воздуха над поверхностью тела. В течение продолжительного времени в эксикаторах устанавливалось соответствующее равенство температур и парциальных давлений водяного пара в материале и в воздухе, т. е. устанавливались различные термодинамические равновесные состояния.

Характер изменения кривых десорбции дает возможность оценить геометрические размеры реальных пор в теле, особенности строения материала как объекта сушки с учетом видов связи влаги с материалом, влияние пористой структуры на протекание внутренней диффузии влаги. Также следует отметить, что методика по экспериментальному снятию кривых десорбции достаточно близка к условиям сушки.

Величина эффективного коэффициента массопроводности  $K_{эф}$  в процессе обезвоживания капиллярно-пористого материала является аддитивной функцией потоков водяного пара и конденсата, т. е. является суммой коэффициентов диффузии пара  $K_n$  и капиллярной конденсации  $K_ж$ :

$$K_{эф} = K_n + K_ж. \quad (1)$$

Зависимости  $K_n = f(\bar{U})$  и  $K_ж = f(\bar{U})$  от среднего влагосодержания тела определяются следующими выражениями:

$$K_n = \frac{\rho_ж \vartheta_m D_n (1 - \omega) p_{нас \varphi}}{\rho_o C_m (RT)^2}; \quad (2)$$

$$K_ж = \frac{\rho_ж}{8 \eta_ж \vartheta_m \rho_o C_m} \int_{r_{min}}^{r_{max}} F(r) r^2 dr, \quad (3)$$

где  $p_{нас \varphi}$  – давление пара, которое однозначно определяется из изотерм десорбции;  $(1 - \omega)$  –

доля свободных от жидкости пор;  $\omega = \int_{r_{min}}^{r_{max}} F(r) dr$  –

относительная доля пор, занятых жидкостью;

$F(r) dr = \frac{d\varepsilon}{dr} dr$  – плотность распределения объема пор по размерам на интервале  $dr$ ;  $\rho_ж$ ,  $\eta_ж$  –

плотность и кинематическая вязкость жидкости;

$\rho_o$  – плотность сухого материала;  $C_m = \frac{\partial \bar{U}}{\partial \mu}$  –

удельная массоемкость пористого тела;

$\mu = \frac{-2\sigma \cdot \vartheta_m}{r} = -R \cdot T \ln \varphi$  – химический потенциал молекул в фазе жидкости и пара;  $\vartheta_m = M_ж / \rho_ж$  –

молярный объем жидкости;  $M_ж$  – молекулярная масса жидкости;  $\sigma$  – поверхностное натяжение жидкости;  $r$  – эффективный радиус пор;  $R$  – универсальная газовая постоянная;  $T$  – температура парогазовой смеси.

Коэффициент поверхностной диффузии водяного пара определяется по выражению

$$D_n = \frac{0,217 \cdot 10^{-4}}{P_T} \left( \frac{T}{273} \right)^{1,88}, \quad (4)$$

где  $P_T$  – давление парогазовой смеси в порах во время опыта, атм.

Используя соотношения:

$$\frac{\partial \mu}{\partial \varphi} = \frac{RT}{\varphi}; \quad (5)$$

$$r = -\frac{2\sigma \vartheta_m}{\mu}, \quad (6)$$

и выражения (2) и (3), можно рассчитать коэффициенты массопроводности непосредственно из изотерм десорбции  $\bar{U}_p = f(\varphi)_t$ , минуя промежуточное определение функции распределения пор по размерам, по следующим уравнениям:

$$K_n = \frac{M_n D_n (1 - \omega) p_{нас}}{\rho_o RT \frac{d\bar{U}}{d\varphi}}; \quad (7)$$

$$K_ж = \frac{\sigma^2 M_n}{2 \eta_ж \rho_o RT} \frac{\int_{\varphi_{min}}^{\varphi_{max}} \frac{d\bar{U}}{d\varphi} (\ln \varphi)^2 d\varphi}{\frac{d\bar{U}}{d\varphi}}. \quad (8)$$

**Результаты исследования.** На рис. 1 представлены кривые десорбции различных дисперсных материалов при температуре влажного воздуха 20 °С, а на рис. 2 рассчитанные на их основе зависимости эффективного коэффициента массопроводности  $K_{эф} = K_n + K_ж = f(\bar{U})$  от влагосодержания частиц материала.

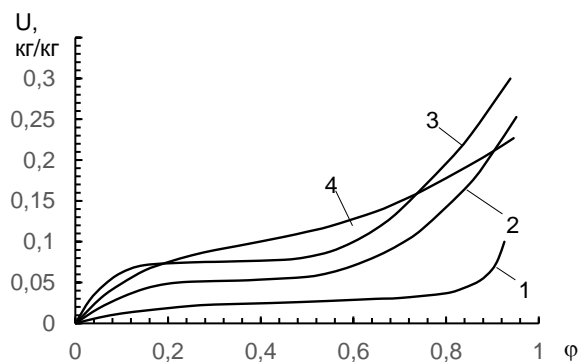


Рис. 1. Кривые десорбции различных дисперсных материалов: 1 – зола гидроудаления; 2 – тальковая руда; 3 – тонкодисперсный кремнезем; 4 – кукурузный крахмал

Анализ полученных зависимостей (рис. 2) показывает, что внутренний пародиффузионный механизм переноса влаги для рассмотренных материалов соизмерим только в области адсорбционно-связанной влаги в интервале низких влагосодержаний ( $U = 0,02 - 0,08$ ). При более высоких значениях влагосодержания наблюдается перенос осмотически-связанной и капиллярно-связанной влаги во внутривещном пространстве материала к его поверхности в основном в виде жидкости (воды).

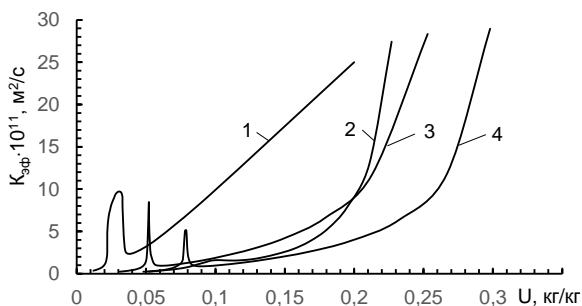


Рис. 2. Зависимости эффективного коэффициента массопроводности от влагосодержания различных дисперсных материалов: 1 – зола гидроудаления; 2 – тальковая руда; 3 – тонкодисперсный кремнезем; 4 – кукурузный крахмал

Полученные данные показывают, что у каждого из рассмотренных влажных дисперсных материалов имеются свои граничные влагосодержания, при которых резко начинается повышение внутридиффузионного сопротивления перемещению влаги и снижение энергетической эффективности тепловой обработки [12].

Зависимости  $K_{эф} = f(\bar{U})$  для различных дисперсных материалов имеют различный характер, который позволяет оценить возможности интенсификации обезвоживания, т. е. выбор термогидродинамических условий и типа конвективной сушилки.

На рис. 3 представлены кривые десорбции листовой целлюлозной фибры картонно-фибрового производства при различных температурах воздуха.

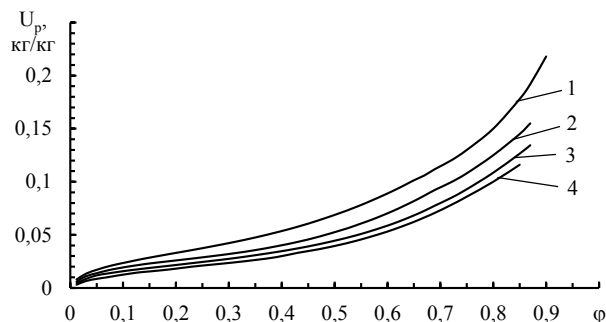


Рис. 3. Кривые десорбции листовой фибры при различных температурах воздуха: 1 – 22 °С; 2 – 60 °С; 3 – 90 °С; 4 – 110 °С

Кривые десорбции при повышенных температурах воздуха рассчитывались методом Пасса на основе изотермы десорбции, суть которого заключается в следующем [12]. На экспериментально снятой изотерме десорбции при температуре 22 °С отмечают ряд точек и соответствующие им равновесные влагосодержания  $\bar{U}_{p1}, \bar{U}_{p2}, \bar{U}_{p3}, \dots, \bar{U}_{pn}$  и  $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \dots, \varphi_n$ . По температуре, при которой построена опытная изотерма десорбции, и значениям  $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \dots, \varphi_n$  находят температуру точки росы для всех зна-

чений  $\bar{U}_{p1}, \bar{U}_{p2}, \bar{U}_{p3}, \dots, \bar{U}_{pn}$ , т. е.  $t_{p1}, t_{p2}, t_{p3}, \dots, t_{pn}$ . Затем определяют разность  $\Delta t$  между температурой воздуха  $t_c$  и температурой точки росы  $t_{pi}$  для всех выбранных значений влагосодержания  $\bar{U}_{p1}, \bar{U}_{p2}, \bar{U}_{p3}, \dots, \bar{U}_{pn}$ . Каждому значению  $\bar{U}_{pi}$  соответствует значение  $\Delta t$ , не зависящее от температуры. Далее по температуре воздуха и рассчитанным значениям  $t'_{p1}, t'_{p2}, t'_{p3}, \dots, t'_{pn}$  по психометрической таблице определяют новые значения относительной влажности воздуха  $\varphi'_1, \varphi'_2, \varphi'_3, \dots, \varphi'_n$ , соответствующие выбранным значениям влагосодержания  $\bar{U}_{p1}, \bar{U}_{p2}, \bar{U}_{p3}, \dots, \bar{U}_{pn}$ .

На рис. 4 приведены зависимости эффективных коэффициентов массопроводности листовой фибры от ее влагосодержания при различных температурах воздуха, рассчитанные на основе кривых десорбции (рис. 3).

Кривые  $K_{эф} = f(\bar{U})$ , приведенные на рис. 4, отражают закономерности совмещенного переноса влаги в виде жидкости и пара во внутривористой структуре листовой фибры при ее обезвоживании в областях адсорбционно-связанной и осмотически-связанной влаги.

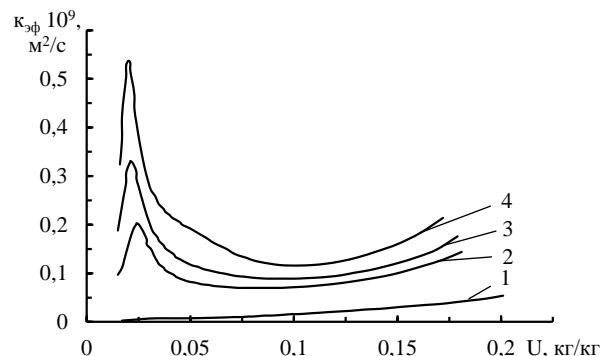


Рис. 4. Зависимости эффективного коэффициента массопроводности от влагосодержания листовой фибры при различных температурах воздуха: 1 – 22 °С; 2 – 60 °С; 3 – 90 °С; 4 – 110 °С

Анализ приведенных зависимостей (рис. 4) показывает, что повышение температуры сушильного агента способствует увеличению эффективного коэффициента массопроводности за счет роста доли пара в порах тела и интенсивности пародиффузионного переноса влаги к поверхности высушиваемого материала. Полученные зависимости  $K_{эф} = f(\bar{U})$  для листовой фибры позволили установить граничный интервал влагосодержаний 0,05–0,08, ниже которого проводить обезвоживание энергозатратно из-за резкого повышения внутридиффузионного сопротивления перемещению влаги.

**Выводы.** Анализ полученных результатов исследования позволяет сделать ряд выводов.

1. Установленные зависимости эффективного коэффициента массопроводности от влагосодержания ряда дисперсных и листовых материалов при различных условиях термодинамического равновесия с теплоносителем востребованы при создании условий их сушки и хранения.

2. Полученные расчетные зависимости по эффективным коэффициентам массопроводности в виде  $K_{эф} = f(U)$  позволяют произвести качественную и количественную оценку влияния механизмов переноса влаги в исследуемых коллоидных капиллярно-пористых телах в процессе их обезвоживания на интенсивность внутреннего массопереноса с учетом повышения параметров рабочей среды и материала.

3. Представленные экспериментальные и расчетные данные для приведенных материалов могут быть использованы при организации процесса их сушки при конвективном подводе тепла, т. е. при определении требуемого конечного влагосодержания, интенсивности и продолжительности тепловой обработки в области капиллярно-связанной влаги исходя из кинетических закономерностей обезвоживания, а также при установлении типа сушилки.

#### Список литературы

1. **Сажин В.Б., Сажин, Б.С.** Научные основы стратегии выбора эффективного сушильного оборудования / под ред. Б.С. Сажина. – М.: Химия, 2013. – 554 с.
2. **Федосов С.В.** Тепломассоперенос в технологических процессах строительной индустрии. – Иваново, 2010. – 364 с.
3. **Рудобашта С.П.** Массоперенос в системах с твердой фазой. – М.: Химия, 1980. – 248 с.
4. **Лыков А.В.** Тепломассообмен: справочник. – М.: Энергия, 1971. – 560 с.
5. **Conductivity of Capillary-Porous Colloidal Materials Subjected to Convective Drying / S.P. Rudobashta, G.A. Zueva, E.A. Muravleva, V.M. Dmitriev // J. Eng. Phys. Thermophys.** – 2018. – Vol. 91, No. 4. – P. 845–853. DOI: 10.1007/s10891-018-1808-x.
6. **Массопроводность** при сушке ядер и оболочек семян подсолнечника / С.П. Рудобашта, Г.А. Зуева, В.М. Дмитриев, В.Н. Кочетков // Изв. вузов. Химия и химическая технология. – 2021. – Т. 64, Вып. 5. – С. 80–87.
7. **Закономерности** формирования массопроводных свойств керамических изделий на основе отходов промышленных котельных / Е.В. Гусев, А.И. Сокольский, А.А. Сергиенкова, Ю.А. Родякаева // Вестник ИГЭУ. – 2018. – Вып. 1. – С. 33–36.
8. **Рудобашта С.П., Зуева Г.А., Дмитриев В.М.** Исследование массопроводных свойств слоя семян // Изв. вузов. Химия и химическая технология. – 2017. – Т. 60, Вып. 7. – С. 72–77. DOI: 10.6060/tcct.2017607.5556.
9. **Массопроводность** при сушке коллоидных капиллярно-пористых материалов / С.П. Рудобашта, Г.А. Зуева, В.М. Дмитриев, Н.А. Зуев // Изв. вузов. Химия и химическая технология. – 2014. – Т. 57, Вып. 1. – С. 103–107.
10. **Рудобашта С.П., Моряков А.В., Дмитриев В.М.** Массопроводность семян рапса при сушке // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2012. – № 8. – С. 42–46.
11. **Натареев А.С., Созинов В.П.** Применение зонального метода для определения теплофизических характеристик пластических масс // Вестник ИГЭУ. – 2007. – Вып. 4. – С. 18–19.
12. **Сажин Б.С.** Основы техники сушки. – М.: Химия, 1984. – 320 с.

#### References

1. Sazhin, V.B., Sazhin, B.S. *Nauchnye osnovy strategii vybora effektivnogo sushil'nogo oborudovaniya* [Scientific principles of the strategy for choosing effective drying equipmen]. Moscow: Khimiya, 2013. 554 p.
2. Fedosov, S.V. *Teplomassoperenos v tekhnologicheskikh protsessakh stroitel'noy industrii* [Heat and mass transfer in technological processes of the construction industry]. Ivanovo, 2010. 364 p.
3. Rudobashta, S.P. *Massoperenos v sistemakh s tverdoy fazoy* [Mass transfer in systems with solid phase]. Moscow: Khimiya, 1980. 248 p.
4. Lykov, A.V. *Teplomassoobmen* [Heat and mass transfer]. Moscow: Energiya, 1971. 560 p.
5. Rudobashta, S.P., Zueva, G.A., Muravleva, E.A., Dmitriev, V.M. *J. Eng. Phys. Thermophys*, 2018, vol. 91, no. 4, pp. 845–853. DOI: 10.1007/s10891-018-1808-x.
6. Rudobashta, S.P., Zueva, G.A., Dmitriev, V.M., Kochetkov, V.N. *Izvestiya vuzov. Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya*, 2021, vol. 64, issue 5, pp. 80–87.
7. Gusev, E.V., Sokol'skiy, A.I., Sergienkova, A.A., Rodyakaeva, Yu.A. *Vestnik IGEU*, 2018, issue 1, pp. 33–36.
8. Rudobashta, S.P., Zueva, G.A., Dmitriev, V.M. *Izvestiya vuzov. Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya*, 2017, vol. 60, issue 7, pp. 72–77. DOI: 10.6060/tcct.2017607.5556.
9. Rudobashta, S.P., Zueva, G.A., Dmitriev, V.M., Zuev, N.A. *Izvestiya vuzov. Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya*, 2014, vol. 57, issue 1, pp. 103–107.
10. Rudobashta, S.P., Moryakov, A.V., Dmitriev, V.M. *Khranenie i pererabotka sel'khozsyrya*, 2012, no. 8, pp. 42–46.
11. Natarееv, A.S., Sozinov, V.P. *Vestnik IGEU*, 2007, issue 4, pp.18–19.
12. Sazhin, B.S. *Osnovy tekhniki sushki* [Basics of drying techniques]. Moscow: Khimiya, 1984. 320 p.