

С.П. Рудобашта, Г.А. Зуева, Н.А. Зуев

Станислав Павлович Рудобашта (✉), Николай Александрович Зуев

Кафедра теплотехники, гидравлики и энергообеспечения предприятий, Российский государственный аграрный университет – Московская сельскохозяйственная академия им. К.А. Тимирязева, ул. Тимирязевская, 49, Москва, Российская Федерация, 127550

E-mail: rudobashta@mail.ru (✉), joinpath@bk.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 (✉)

ВЛИЯНИЕ ТЕРМОДИФФУЗИИ НА КИНЕТИКУ ОСЦИЛЛИРУЮЩЕЙ ИНФРАКРАСНОЙ СУШКИ

Из полученной изотермы десорбции влаги для семян лука репчатого рассчитан относительный коэффициент термодиффузии δ . Это позволило оценить вклад термодиффузии по отношению к потоку массопроводности в рассмотренном варианте осциллирующей ИК сушки, который оказался равным 5%. Следовательно, в инженерном расчете кинетики данного варианта ИК сушки термодиффузию можно не учитывать.

Ключевые слова: инфракрасная сушка, термодиффузия, массопроводность

S.P. Rudobashta, G.A. Zueva, N.A. Zuev

Stanislav P. Rudobashta (✉), Nikolaiy A. Zuev

Department of Heat Engineering, Hydraulics and Plants Energy Supply, Russian State Agrarian University, Timiryazevskaya str., 49, Moscow, Russia, 1277550

E-mail: rudobashta@mail.ru (✉), joinpath@bk.ru

Galina A. Zueva (✉)

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

E-mail: zueva_galina15@mail.ru (✉)

INFLUENCE OF THERMAL DIFFUSION ON KINETICS OF OSCILLATING IR DRYING

The relative thermal diffusion coefficient δ , was calculated from the obtained moisture sorption isotherm for the seeds of onions. It allowed estimating the contribution of thermal diffusion with respect to the flow of mass conductivity in the considered version of the oscillating IR drying, and it turned out to be 5%. Hence, the thermal diffusion can be ignored for engineering calculations of the kinetics of the oscillating IR drying.

Key words: infrared drying, seeds, sorption isotherm, thermal diffusion, mass conductivity

Осциллирующий температурный режим при инфракрасной сушке (ИК сушке) применяется при высушивании термолабильных материалов. При сушке в этом режиме в высушиваемом материале формируется отрицательный температурный градиент, который вызывает поток влаги, обусловленный термодиффузией. Складываясь с потоком массопроводности, он интенсифицирует процесс сушки. В общем случае внутренний массоперенос в материале при сушке может происходить под действием трех движущих сил [1]: градиента влагосодержания (массопроводность, или концентрационная диффузия влаги), градиента температуры (термодиффузия) и градиента общего давления (фильтрационный массоперенос)). Последний проявляется только при высоких температурах (примерно при температурах материала ~100 °С), при более низких температурах им можно пренебречь и записать кинетическое уравнение в виде:

$$\vec{i} = -k\rho_0(\text{grad } u + \delta_t \text{grad } t). \quad (1)$$

Целесообразно оценить вклад термодиффузии в кинетику процесса при осциллирующей инфракрасной сушке, когда в материале формируется довольно значительный температурный градиент. Расчет выполним для такого коллоидного капиллярно-пористого материала, каким являются семена лука. Семена лука были выбраны в качестве объекта исследования еще и потому, что с ними в [2] проводилась осциллирующая ИК сушка, которая выявила тот факт, что в этом процессе происходит стимуляция семян, проявляющаяся в увеличении их всхожести и энергии прорастания, что имеет большое практическое значение.

Ранее роль термодиффузии изучалась при конвективной сушке капиллярно-пористого материала (при сушке зерен активированного угля АР-3) [3]. Было установлено, что в исследованном случае вклад термодиффузии в общий поток влаги в материале возрастает с повышением температуры сушильного агента, но при температурах до 110 °С не велик (~6%). Отметим, что к капиллярно-пористым материалам по классической классификации А.В. Лыкова относятся хрупкие гели, которые при удалении влаги почти не сжимаются и становятся хрупкими, а к коллоидным капиллярно-пористым материалам – материалы, стенки которых эластичны и могут поглощать влагу. Типичными их представителями являются материалы растительного происхождения. По классификации [4], которая является дальнейшим развитием классификации [3], капиллярно-пористые материалы определены как материалы с непроницаемыми для влаги стенками пор – в отличие от

коллоидных капиллярно-пористых материалов, стенки пор которых проницаемы для влаги. Определяющие механизмы переноса влаги в материалах разного класса различны [3, 4]. Это обуславливает разный вклад термодиффузии в материалах разного класса в процессе сушки и показывает целесообразность проведения данного исследования.

Относительный коэффициент термодиффузии δ_t можно оценить по величине термоградиентного коэффициента δ с использованием понятий удельной изотермической массоемкости c'_m и химического потенциала μ , по зависимости [1]

$$D_t \approx D = c'_m \left(\frac{\partial M}{\partial T} \right)_u, \quad (2)$$

где $c'_m = (\partial u_p / \partial M)_T$ – удельная изотермическая массоемкость, моль /Дж; $\left(\frac{\partial M}{\partial T} \right)_u$ – температурный коэффициент химического потенциала, Дж/(моль К).

Химический потенциал μ связанной влаги в гигроскопической области определяется уравнением [1]

$$\mu = R^* T \ln \phi. \quad (3)$$

Найдем удельную изотермическую массоемкость c'_m семян лука в функции от их влагосодержания, используя опытные данные по изотермам десорбции, приведенные в [5], которые в этой работе были описаны уравнением Гендерсона [6]

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

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

Поскольку $c'_m = (\partial u_p / \partial M)_T$ [1], то запишем, имея в виду (4),

$$c'_m = (\partial u_p / \partial M)_T = b \left(\frac{a}{T} \right)^b \frac{1}{R^* T} \left(\frac{u_p}{a/T} \right)^{b-1} \frac{1 - \exp\left(-\frac{u_p}{a/T}\right)^{\frac{1}{b}}}{\exp\left(-\frac{u_p}{a/T}\right)^{\frac{1}{b}}} \quad (5)$$

Далее найдем производную $\left(\frac{\partial M}{\partial T} \right)_u$. Для этого, прологарифмировав уравнение (4), выразим из него μ и найдем производную $\left(\frac{\partial M}{\partial T} \right)_u$:

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial M}{\partial T} \right)_u &= R^* \ln(1 - \exp\left(-\frac{u_p}{a/T}\right)) + \\ &+ \frac{R^* T}{1 - \exp\left(-\frac{u_p}{a/T}\right)} \exp\left(-\frac{u_p}{a/T}\right) \left(-\frac{u_p}{a}\right) \end{aligned} \quad (6)$$

Окончательно, перемножив (5) и (6) согласно (2), получим выражение для коэффициента δ как функцию u_p . На рис. 1 приведены значения удельной изотермической массоемкости c'_m как функции влагосодержания семян лука репчатого, вычисленные по уравнению (5) с использованием системы MathCAD при различных температурах. Как видно из графика, в рассматриваемом случае удельная изотермическая массоемкость возрастает с увеличением влагосодержания материала и не зависит от его температуры.

По уравнению (6) с использованием данных по десорбционному равновесию семян лука был рассчитан также температурный коэффициент химического потенциала $(\frac{\partial M}{\partial T})_u$, значения которого приведены на рис. 2 при различных температурах. Как видно из рисунка, функция $(\frac{\partial M}{\partial T})_u = f(u)$ в рассматриваемом диапазоне температур также инвариантна по отношению к температуре.

Далее по уравнению (2) рассчитали относительный коэффициент термодиффузии δ_t как функцию влагосодержания материала u . Результаты этого расчета приведены на рис. 3 для различных температур в интервале температур 37 ... 60 °С.

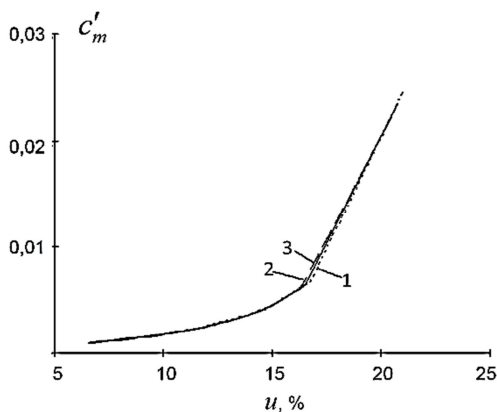


Рис. 1. Расчетная зависимость $c'_m = f(u)$ при: 1 – $t = 37$ °С, 2 – $t = 50$ °С, 3 – $t = 60$ °С
Fig. 1. Calculated dependence of $c'_m = f(u)$ at: 1 – $t = 37$ °С, 2 – $t = 50$ °С, 3 – $t = 60$ °С

Из рис. 3 видно что, несмотря на то, что функция $(\frac{\partial M}{\partial T})_u = f(u)$ проходит через максимум (рис. 2), в силу значительного роста удельной изотермической массоемкости в области высоких влагосодержаний этот ее рост нивелирует спад температурного коэффициента химического потенциала $(\frac{\partial M}{\partial T})_u$ с увеличением u в области высоких влагосодержаний, и зависимости $\delta_t = f(u)_t$ являются монотонно возрастающими.

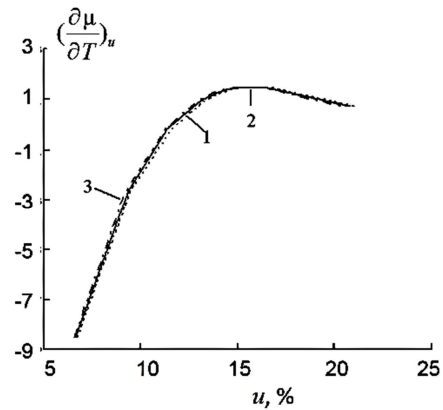


Рис. 2. Расчетная зависимость $(\frac{\partial M}{\partial T})_u = f(u)$ при: 1 – $t = 37$ °С, 2 – $t = 50$ °С, 3 – $t = 60$ °С
Fig. 2. Calculated dependence of $(\frac{\partial M}{\partial T})_u = f(u)$ at: 1 – $t = 37$ °С, 2 – $t = 50$ °С, 3 – $t = 60$ °С

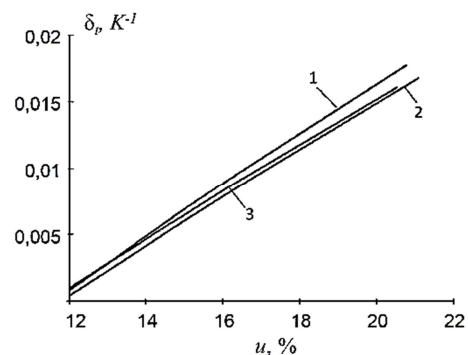


Рис. 3. Расчетная зависимость $\delta_t = c'_m (\frac{\partial M}{\partial T})_u = f(u)$ при: 1 – $t = 37$ °С, 2 – $t = 50$ °С, 3 – $t = 60$ °С
Fig. 3. Calculated dependence of $\delta_t = c'_m (\frac{\partial M}{\partial T})_u = f(u)$ at: 1 – $t = 37$ °С, 2 – $t = 50$ °С, 3 – $t = 60$ °С

Расчеты показывают, что, несмотря на сложный характер зависимостей параметров c'_m и $(\frac{\partial M}{\partial T})_u$ от температуры, в соответствии с уравнениями (5) и (6), эти зависимости в конечном итоге в рассматриваемом случае носят формальный характер, и указанные параметры практически не зависят от температуры. Это проявляется и на конечном результате: изотермы $\delta_t = f(u)_t$ в расчетном температурном интервале почти совпадают. Это отличает найденные в данной работе функции $\delta_t = f(u)_t$ от таковых, полученных в [3], в которых они расслаиваются, причем с увеличением температуры относительный коэффициент термодиффузии в [3] уменьшался. Отмеченное отличие функций $\delta_t = f(u)_t$ объясняется тем, что, как отмечено выше, исследованные материалы в [3] и в данной работе относятся к разным классам: в [3] расчеты выполнялись для активированного угля марки AP-3 (капиллярно-пористый материал), а в данной работе –

для коллоидного капиллярно-пористого материала. Различие в классах материалов проявляется в разных формах связи удаляемой влаги с материалом и в форме изотермы десорбции, которая непосредственно влияет на характер зависимости $\delta = f(u)_t$.

Оценим величину составляющей $\vec{i}_T = -k c_0 d_t \text{grad} t$ в уравнении (1), которая описывает плотность потока влаги, перемещающейся в материале вследствие термодиффузии. Выразим общую плотность потока влаги, удаляемой из высушиваемого материала, из решения дифференциального уравнения массопроводности в виде уравнения [4]

$$i(\tau) = -\frac{d\bar{u}}{d\tau} R \rho_0 = \left[\frac{\rho_0 k}{R} \sum_{k=1}^{\infty} B_k \beta_k^2 \exp(-\beta_k^2 Fo_m) \right] (\bar{u}_n - u_p^*), \quad (7)$$

где β_k – корни характеристического уравнения ($\beta_k > 0$), определяемые для пластины выражениями

$$\text{ctg} \beta_k = \frac{\mu_k}{Bi_m}$$

$$B_k = \frac{2 Bi_m^2}{v_k^2 (Bi_m^2 + v_k^2 + Bi_m)}$$

Найдем долю i_T от i , используя соотношение (7)

$$\begin{aligned} \Delta = \frac{i_T}{i} &= \frac{-k c_0 d_t \frac{\partial t}{\partial x} \Big|_{x=R}}{-\frac{d\bar{u}}{d\tau} R c_0} = \\ &= \frac{-k c_0 d_t \frac{\partial t}{\partial x} \Big|_{x=R}}{\left[\frac{c_0 k}{R} \sum_{k=1}^{\infty} B_k v_k^2 \exp(-v_k^2 Fo_m) \right] (\bar{u}_n - u_p^*)} = \\ &= \frac{-R d_t \frac{\partial t}{\partial x} \Big|_{x=R}}{\left[\sum_{k=1}^{\infty} B_k v_k^2 \exp(-v_k^2 Fo_m) \right] (\bar{u}_n - u_p^*)}. \quad (8) \end{aligned}$$

Как отмечено в начале статьи, при осциллирующей ИК сушке возникают значительные температурные градиенты, поэтому представлялось целесообразным рассмотреть роль термодиффузии при сушке коллоидного капиллярно-пористого материала именно в этом процессе. Расчеты были выполнены для такого коллоидного капиллярно-пористого материала, как семена лука репчатого, осциллирующая сушка которого проводилась в [2]. В [2] было показано, что осциллирующую ИК сушку семян надо проводить при осцилляции температуры семян в интервале от $t_{\min} = 34$ °С до $t_{\max} = 40$ °С, поскольку именно этот режим вызывает наибольший эффект стимуляции. В [7] была развита математическая модель, позволяющая рассчитать динамику нагрева материала и возникающие температурные градиенты при ос-

циллирующей ИК сушке, которая и была использована в расчетах. По уравнению (8) была рассчитана величина Δ для процесса осциллирующей ИК сушки слоя семян лука репчатого, исследованного в [2]. В опытах: $q = 1810$ Вт/м², открытая поверхность слоя обдувалась атмосферным воздухом температурой 20 °С при скорости 1,5 м/с. Длина слоя семян в направлении потока воздуха составляла 0,12 м. Этим условиям, как показано в [7], соответствуют: $\alpha = 13,8$ Вт/(м² К), $\beta_c = 0,015$ м/с. Осцилляция температуры слоя в интервале от $t_{\min} = 34$ °С до $t_{\max} = 40$ °С обеспечивалось в опытах с помощью системы автоматического регулирования. Длительность цикла «нагрев-остывание» при этом составляла $\tau_{\text{ц}} = 60$ с, а продолжительность стадии нагрева в нем $\tau_{\text{нар}} = 15$ с. В расчетах приняли: $R = 5 \cdot 10^{-3}$ м, $u_n = 0,21$ кг/(кг сух. м-ла); $u_k = 0,15$ кг/(кг сух. м-ла), $A_p = 7,63$ кг/(кг сух. м-ла)/(кг/м³) [2], $\mu^* = 921$ м⁻¹ [8], $\rho_0 = 1120$ кг/м³, $t_n = 18$ °С, $u_p = 0,0824$ кг/(кг сух. м-ла) [8]. Для этих условий было рассчитано число Bi_m :

$$Bi_m = \frac{v_c R}{A_p c_0 k} = \frac{0,015 \cdot 5 \cdot 10^{-3}}{7,63 \cdot 1120 \cdot 4,5 \cdot 10^{-11}} = 195. \quad (9)$$

Таким образом, в рассматриваемом случае реализуется внутридиффузионный кинетический режим, для которого [6]:

$$\beta_k = (2k-1) \frac{\pi}{2}; \quad B_k = 2 / \beta_k^2.$$

Далее по графику на рис. 3 выбрали среднее значение термоградиентного коэффициента на рассматриваемом интервале влагосодержаний материала: $\delta = 0,01$ 1/К. Производная $\frac{\partial t}{\partial x} \Big|_{x=R}$ в ходе осциллирующей ИК сушки непрерывно меняется, при оценке эффекта термодиффузии брали ее среднее значение на временном интервале $\tau_1 = 300$ с, (5 осцилляций температуры)

$$\frac{\partial t}{\partial x} \Big|_{x=R, \text{cp}} = \frac{1}{\Phi} \int_0^{\Phi} \frac{\partial t}{\partial x} \Big|_{x=R} d\Phi, \quad (10)$$

где $\frac{\partial t}{\partial x} \Big|_{x=R} = \frac{\partial W(x, \Phi)}{\partial x} \Big|_{x=R} \frac{(t_n - t_c)}{R}, \quad (11)$

$$t(x, \tau) \Big|_{\tau=0} = t_n; \quad (12)$$

$$W(x, \tau) = \frac{[t(x, \tau) - t_c] + (r^* / \alpha) i(\tau)}{t_n - t_c}. \quad (13)$$

Производную $\frac{\partial W(x, \Phi)}{\partial x} \Big|_{x=R}$ рассчитывали из

аналитического решения задачи нестационарной теплопроводности [7], описывающей осциллирующий электромагнитный (в данном случае инфракрасный) нагрев пластины (или плотного неподвижного слоя) с учетом испарения из нее вла-

ги и конвективного теплообмена ее поверхности с внешней газовой средой (из-за недостатка места решение задачи здесь не приводится). Было получено: $\frac{\partial t}{\partial x}|_{x=R_{cp}} = -1,387 \cdot 10^3 \text{ К/м}$. Подстановка найденных величин $\delta = \delta_t$ и $\frac{\partial t}{\partial x}|_{x=R_{cp}}$ в уравнение (9) и расчет по нему величины Δ дал ее значение: $\Delta = 4,68\%$. Найденное значение Δ свидетельствует о том, что термодиффузия заметна при осциллирующей ИК сушке, однако ее вклад в кинетику сушки невелик и поэтому в кинетическом расчете осциллирующей ИК сушки рассмотренного процесса ее можно не учитывать.

ВЫВОДЫ

Из полученных изотерм десорбции влаги для семян лука репчатого, описанных термодинамическим уравнением Гендерсона, рассчитаны удельная изотермическая массоемкость, температурный коэффициент химического потенциала и далее – относительный коэффициент термодиффузии δ_t . Это позволило оценить вклад термодиффузии в общий поток ваги, удаляемой из материала при осциллирующей ИК сушке, который оказался равным ~5%. Следовательно, в инженерном расчете кинетики осциллирующей ИК сушки семян, проводимой при отмеченных в статье условиях, термодиффузию можно не учитывать.

ОБОЗНАЧЕНИЯ

$A_p = u_p/C_c$ – коэффициент распределения, (кг/(кг сухого материала))/(кг/м³);
 a – коэффициент температуропроводности материала, м²/с;

$c'_m = (\partial u_p / \partial m)_T$ – удельная изотермическая массоемкость, моль /Дж;

i – интенсивность сушки пластины, кг/(м² с);

i_M – плотность потока влаги за счет массопроводности, кг/(м² с);

i_T – плотность потока влаги за счет термодиффузии, кг/(м² с);

k – коэффициент массопроводности, м²/с;

q – плотность лучистого потока, Вт/м²;

R – половина толщины пластины, м;

$R^* = 8,314 \text{ Дж/(моль}\cdot\text{К)}$ – универсальная газовая постоянная;

r^* – теплота парообразования, Дж/кг;

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

u, u_p – фактическое и равновесное влагосодержание, кг/(кг сухого материала);

\bar{u} – среднее по объему тела влагосодержание, кг/(кг сухого материала);

x – декартова координата, м;

α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м² К);

β_c – коэффициент массоотдачи, отнесенный к разности концентраций C_c , м/с;

δ_t – относительный коэффициент термодиффузии, К⁻¹;

μ – химический потенциал связанной влаги, Дж/моль;

μ^* – коэффициент экстинкции, м⁻¹;

ρ_0 – плотность абсолютно сухого материала, кг/м³;

τ – время, с;

φ – относительная влажность воздуха;

$Bi_m = (\beta_c R)/(k\rho_0 A_p)$ – число Био массообменное модифицированное;

$Fo = a\tau/R^2$ – число Фурье тепловое;

$\xi = x/R$ – относительная координата.

Индексы: k – конечный; n – начальный; $наг$ – нагрев;

c – сушильный агент; cp – среднее; $ц$ – цикл; p – равновесный; m – массообменный.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Льков А.В.** Теория сушки. М.: Энергия. 1968. 472 с.
2. **Рудобашта С.П., Зуева Г.А., Зуев Н.А.** // Промышл. теплотехника. 2013. Т. 35. № 7. С. 218 – 222.
3. **Рудобашта С.П., Плановский А.Н., Злобин А.Г.** // Теоретич. основы хим. технологии. 1979. Т. 13. № 3. С. 442 – 444.
4. **Рудобашта С.П.** Массоперенос в системах с твердой фазой. М.: Химия. 1980. 248 с.
5. **Рудобашта С.П., Зуева Г.А., Зуев Н.А.** // Изв. вузов. Химия и хим. технология. 2015. Т. 58. Вып. 1. С. 68 – 71.
6. **Henderson S.M.** // Agricultural Engineering. 1952. V. 33. N 1. P. 29 – 32.
7. **Рудобашта С.П., Каргашов Э.М., Зуев Н.А.** // Теоретич. основы хим. технологии. 2011. Т. 45. № 6. С. 641- 647
8. **Rudobashta S., Zueva G., Zuev N.** // Drying Technology: An International Journal. 2014. V. 32. N 11. 2014. P. 1352-1359.
9. **Рудобашта С.П., Зуева Г.А., Дмитриев В.М., Зуев Н.А.** // Изв. вузов. Химия и хим. технол. 2014. Т. 57. Вып.1. С. 103-107.

REFERENCES

1. **Lykov A.V.** Theory of Drying. M.: Energiya. 1968. 472 p. (in Russian).
2. **Rudobashta S.P., Zueva G.A., Zuev N.A.** // Industrial Heat Engeneering. 2013. V. 58. N 7. P. 218 – 222.
3. **Rudobashta S.P., Planovskiy A.N., Zlobin A.G.** // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. 1979. V. 13. N 3. P. 442 – 444 (in Russian).
4. **Rudobashta S.P.** Mass Transfer in Systems with a Solid Phase. M.: Khimiya. 1980. 248 p. (in Russian).
5. **Rudobashta S.P., Zueva G.A., Zuev N.A.** // Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved., Khim. Khim. Tekhnol. 2015. V. 58. N 1. P. 68– 71 (in Russian).
6. **Henderson S.M.** // Agricultural Engin. 1952. V. 33. N 1. P. 29 – 32.
7. **Rudobashta, S.P., Kartashov A.M., Zuev N.A.** // Teoret. Osnovy Khim. Tekhnol. 2011. V. 45. N 6. P. 641- 647 (in Russian).
8. **Rudobashta S., Zueva G., Zuev N.** // Drying Technology: An International Journal. 2014. V. 32. N 11. P. 1352-1359.
9. **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).