

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-5-461-477>

УДК 66.047.7

## **Исследование тепло- и массообмена в процессе конвективной термообработки и сушки теплоизоляционных материалов и приближенное уравнение кривой сушки**

**А. И. Ольшанский<sup>1)</sup>, А. Н. Голубев<sup>1)</sup>**

<sup>1)</sup>Витебский государственный технологический университет  
(Витебск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2023  
Belarusian National Technical University, 2023

**Реферат.** Представлены результаты исследования термической обработки в процессах сушки тонких теплоизоляционных материалов на основе наиболее общих закономерностей конвективной сушки влажных тел с установлением уравнения кривой сушки. Установлены численные величины тепло- и массообменных чисел Био для периода падающей скорости сушки. На основе изучения и анализа многих источников приближенно определены диапазоны изменения критериев Лыкова, Поснова, критерия фазового превращения для процессов термической обработки керамики, асбеста, войлока, пластин глины. Показано, что при значениях чисел Био меньше единицы, критериев Лыкова 0,05–0,13, Поснова 0,03–0,08 для режимов сушки с температурой 90–120 °С задача сушки как тепло- и массообменного процесса является внешней и внутренний перенос не влияет на условия взаимодействия поверхности материала с окружающей средой. Показано, что сушка тонких материалов протекает при числе Био меньше единицы и в условиях внешней задачи критерии подобия не влияют на конвективную сушку. Интенсивность испарения влаги с поверхности тела определяется величиной коэффициента теплоотдачи в числе Био и режимными параметрами процесса. Установлено, что процессы сушки материалов относятся к малоинтенсивным процессам. На основе элементов теории теплового регулярного режима установлены темп нагревания влажного тела и темп убыли влагосодержания. Рассмотрена задача построения кривых сушки без проведения экспериментов для определения длительности сушки теплоизоляционных материалов на основе приближенных уравнений, что представляет интерес для практики сушки. Построенные кривые сушки дают несовпадение с действительной кривой с погрешностью 4–5 %.

**Ключевые слова:** влагосодержание, температура, скорость сушки, коэффициенты теплоотдачи, массоотдачи, критерий Био, коэффициент сушки, темп нагревания тела

**Для цитирования:** Ольшанский, А. И. Исследование тепло- и массообмена в процессе конвективной термообработки и сушки теплоизоляционных материалов и приближенное уравнение кривой сушки / А. И. Ольшанский, А. Н. Голубев // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2023. Т. 66, № 5. С. 461–477. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-5-461-477>

---

### **Адрес для переписки**

Голубев Алексей Николаевич  
Витебский государственный  
технологический университет  
просп. Московский, 72,  
210038, г. Витебск, Республика Беларусь  
Тел.: +375 29 112-79-25  
tm@vstu.by

### **Address for correspondence**

Golubev Aleksei N.  
Vitebsk State  
Technological University  
72, Moskovsky Ave.,  
210038, Vitebsk, Republic of Belarus  
Tel.: +375 29 112-79-25  
tm@vstu.by

---

## Investigation of Heat and Mass Transfer in the Process of Convective Heat Treatment and Drying of Thermal Insulation Materials and Approximate Equation of the Drying Curve

A. I. Ol'shanskii<sup>1)</sup>, A. N. Golubev<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Vitebsk State Technological University (Vitebsk, Republic of Belarus)

**Abstract.** The results of the study of heat treatment in the drying processes of thin thermal insulation materials based on the most general laws of convective drying of wet bodies with the establishment of the equation of the drying curve are presented. The numerical values of heat and mass transfer Biot numbers for the period of decreasing drying rate are established, too. Based on the study and analysis of numerous sources, the ranges of changes in the Lykov, Posnov, and phase transformation criteria for the processes of heat treatment of ceramics, asbestos, felt, and clay plates have been approximately determined. It is demonstrated that for values of Biot numbers less than one, for Lykov criteria value of 0.05–0.13 and for Posnov criteria value of 0.03–0.08 for drying modes with a temperature of 90–120 °C, the task of drying, as a heat and mass transfer process, is external, and internal transfer does not affect the conditions of interaction of the material surface with the environment. It is also shown that the drying of thin materials takes place when the Biot number is less than one and, under the conditions of an external problem, the similarity criteria do not affect convective drying. The intensity of moisture evaporation from the body surface is determined by the value of the heat transfer coefficient in the Biot number and the regime parameters of the process. It has been established that the processes of drying materials are low-intensity processes. Based on the elements of the theory of thermal regular regime, the rate of heating of a wet body and the rate of decrease in moisture content are determined. The problem of constructing drying curves without conducting experiments to determine the duration of drying of thermal insulation materials based on approximate equations is considered; this problem is of interest for the practice of drying. The constructed drying curves do not coincide with the actual curve with an error of 4–5 %.

**Keywords:** moisture content, temperature, drying rate, heat transfer coefficients, mass transfer coefficients, Biot criterion, drying coefficient, body heating rate

**For citation:** Ol'shanskii A. I., Golubev A. N. (2023) Investigation of Heat and Mass Transfer in the Process of Convective Heat Treatment and Drying of Thermal Insulation Materials and Approximate Equation of the Drying Curve. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 66 (5), 461–477. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-5-461-477> (in Russian)

### Введение

Основной задачей кинетики сушки является определение продолжительности термической обработки в процессах сушки влажных материалов [1–5]. Под кинетикой сушки понимают изменение среднего влагосодержания и средней температуры с течением времени [1–5]. Зависимости  $\bar{u} = f(\tau)$  и  $\bar{t} = f(\tau)$  в практике сушки принято называть кривыми сушки и температурными кривыми [1–4]. Знание кинетических зависимостей позволяет определить время тепловой обработки влажных материалов, расход теплоты на сушку, плотность тепловых потоков, интенсивность испарения влаги, температуру материала в процессе и основные размеры и тип сушильного аппарата [1, 2].

### Основная часть

Для определения длительности сушки надо знать зависимость между скоростью сушки  $d\bar{u} / d\tau$  и влагосодержанием материала  $\bar{u}$ . Такая зави-

симось устанавливается решением дифференциального уравнения влагопереноса для конвективной сушки пластины при постоянных коэффициентах влагопереноса [1, 2, 6–8]. Решение аналитического уравнения влагопереноса имеет вид [2, 8]

$$\left| \frac{\partial \bar{u}}{\partial \tau} \right| = a_m \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial x^2}.$$

Граничное условие на поверхности пластины

$$-a_m \left| \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} \right|_{x=R} = \bar{\alpha}_m (\bar{u}_{x=R} - u_p).$$

Здесь  $R$  – половина толщины пластины;  $\bar{\alpha}_m$  – коэффициент массообмена (кг/(ч·°М));  $a_m$  – коэффициент диффузии влаги (м<sup>2</sup>/ч),

$$\bar{\alpha}_m = \frac{\lambda_m}{c_m \rho},$$

$\lambda_m$  – коэффициент массопроводности (кг/(м·ч·°М));  $c_m$  – то же удельной массемкости (кг/(кг·°М));  $\rho$  – плотность влажного тела (кг/м<sup>3</sup>);  $\bar{u}$  и  $u_p$  – текущее и равновесное влагосодержание материала; °М – водяной градус.

Решение дифференциального уравнения при заданных краевых условиях при постоянных коэффициентах  $\bar{\alpha}_m$  и  $a_m$  было решено Льюисом и А. В. Лыковым [2, 8].

Решение Льюиса имеет вид

$$-\frac{\partial \bar{u}}{\partial \tau} \approx \frac{a_m}{R^2} \left[ \frac{1}{\frac{1}{2} + \frac{1}{\text{Bi}_m}} \right] (\bar{u} - u_p).$$

Решение А. В. Лыкова

$$-\frac{\partial \bar{u}}{\partial \tau} \approx \frac{a_m}{R^2} \left[ \frac{1}{\frac{4}{\pi^2} + \frac{1}{\text{Bi}_m}} \right] (\bar{u} - u_p),$$

где  $\text{Bi}_m = \frac{\bar{\alpha}_m R}{\lambda_m}$  – массообменный критерий Био.

Решения различаются только в коэффициентах (вместо  $1/2$  стоит  $4/\pi^2$ ).

Обозначим

$$\frac{a_m}{R^2} \left[ \frac{1}{\frac{4}{\pi^2} + \frac{1}{\text{Bi}_m}} \right] = K,$$

получим уравнение кривой скорости сушки

$$-\frac{\partial \bar{u}}{\partial \tau} = K(\bar{u} - u_p),$$

где  $K$  – коэффициент сушки.

Система уравнений взаимосвязанного тепло- и массопереноса А. В. Лыкова применяется для описания процессов сушки самых различных материалов [2, 6–8]. В реальных условиях сушки коэффициенты влагопереноса являются величинами переменными, при этом зависимости от влажности и температуры материала находятся в очень сложной форме, что делает невозможным использование полученного решения для определения продолжительности сушки [2, 5]. Невозможность использования точного аналитического расчета кривой скорости сушки для определения времени сушки вызвало необходимость создания упрощенных экспериментальных приближенных методов расчета кривой скорости сушки с минимальным числом постоянных, определяемых из опыта [1–4, 8, 9]. Закономерности процесса сушки влажного тела определяются одновременным протеканием переноса теплоты и массы как внутри тела, так и теплообменом между поверхностью испарения материала при взаимодействии с окружающей средой [1, 2, 4]. Рассматривая процесс сушки как тепло- и массообменный процесс, выделяют следующие задачи [2, 4].

При больших значениях чисел Био (когда тепло- и массообменные числа  $Bi$  и  $Bi_m$  больше 50) условия массообмена в большей степени определяются внутренними свойствами материала, энергией связи влаги с материалом и режимом сушки [1–5] (*внутренняя задача*). Диффузионное сопротивление переносу влаги внутри влажного тела значительно превышает сопротивление при удалении влаги с поверхности материала в окружающую среду.

При значениях тепло- и массообменных чисел  $0,5 < Bi_m < 50$  сушка протекает в условиях, характерных для *смешанной задачи*, когда сопротивление переносу влаги внутри и внешнее сопротивление при удалении влаги с поверхности примерно одинаковы [4].

При значениях чисел  $Bi_m < 0,5$  скорость сушки не зависит от внутреннего сопротивления переносу, а определяется внешними условиями тепло-массообмена (*внешняя задача*) [2, 4, 8].

Для выяснения количественных факторов, характеризующих задачу переноса теплоты и влаги в материале, и при взаимодействии поверхности испарения материала с окружающей средой необходимо рассмотреть влияние основных критериев подобия тепло- и массопереноса на процесс конвективной сушки влажных материалов [6, 7].

Решение системы дифференциальных уравнений тепло- и массопереноса в общем виде дает зависимость процесса сушки от большой группы тепло- и массообменных критериев подобия [6, 8, 10–12]. Для безразмерных температур и влагосодержаний можно упрощенно выделить главные

$$\bar{T}^*(\bar{U}^*) \text{ и } \bar{U}^*(\bar{T}^*) = f(\text{Bi}, \text{Bi}_m, \text{Fo}, \text{Fo}_m, \text{Lu}, \text{Ko}, \text{Pn}, \varepsilon),$$

где  $\text{Bi}, \text{Bi}_m, \text{Fo}, \text{Fo}_m$  – тепло- и массообменные критерии Био и Фурье;  $\text{Lu}, \text{Ko}, \text{Pn}$  – критерии Лыкова, Коссовича, Поснова;  $\varepsilon$  – критерий фазового превращения.

Однако не все критерии в одинаковой мере влияют на характер протекания процесса сушки [6, 10–12]. Сушка тонких материалов толщиной  $\delta \approx 5–12$  мм (асбеста, войлока, керамики, пластин глины) при температурах  $t_c = 90–120$  °С, скоростях движения воздуха  $v \approx 3–10$  м/с протекает по схеме мягкого режима сушки, когда наблюдаются периоды постоянной скорости сушки и температуры материала на уровне температуры мокрого термометра  $t_{m,т}$  [13, 14]. На рис. 1–4 представлены кривые сушки и температурные кривые в процессах сушки керамики, войлока, асбеста и глины.

Экспериментальные исследования конвективной сушки тонких материалов при режимах сушки  $t_c = 90–120$  °С и  $v = 3–10$  м/с показали, что для керамической плитки температурный перепад внутри тела составлял  $\Delta t = 4–5$  °С, листового асбеста  $\Delta t = 3–4$  °С, войлока  $\Delta t = 5–6$  °С, пластин глины ( $\delta = 12$  мм)  $\Delta t = 1–2$  °С [14]. При конвективной сушке возникают градиенты влагосодержания и температуры, которые направлены противоположно [1, 2]. Градиент влагосодержания направлен от поверхности материала внутрь, а градиент температуры – изнутри материала к поверхности, и поверхностные слои имеют более высокую температуру, чем в центре. Следовательно, при конвективной сушке термовлагопроводность препятствует общему переносу влаги к поверхности [1, 2].

Термовлагопроводность материала определяется критерием Поснова [6, 7]. Критерий Поснова

$$\text{Pn} = \frac{\delta_T \Delta t}{\Delta u}$$

обычно определяют как перепад влагосодержания тела, вызванный разностью температур,  $\delta_T$  – термоградиентный коэффициент, характеризующий перенос пара и жидкости.

Для оценки влияния отдельных критериев подобия на конвективную сушку изучены источники [7, 10, 12, 15–22]. Значительное влияние на тепло- и массоперенос оказывают критерии поверхностного тепло- и массопереноса  $\text{Bi}$  и  $\text{Bi}_m$ . При малых значениях этих критериев скорости изменения температур и влагосодержаний незначительны, а градиенты температуры и влагосодержания малы (внешняя задача). Число  $\text{Bi}_m$  слабо влияет на внутренний перенос. В реальных условиях сушки критерии  $\text{Bi}$  и  $\text{Bi}_m$  зависят друг от друга. С изменением  $\text{Bi}$  меняется  $\text{Bi}_m$ , при этом их численные значения имеют приблизительно один порядок [6, 11, 25, 26].

Критерий внутреннего потенциала массопереноса  $\text{Pn}$  влияет только на массоперенос [6, 11, 17, 22]. Для силикатных, красных, белых каолиновых глин, которые в промышленности идут на производство керамических, фаянсовых, фарфоровых изделий, критерий  $\text{Pn}$  изменяется в пределах  $\text{Pn} \approx 0,08–0,14$ , причем максимальные значения  $\text{Pn}$  наблюдаются в об-

ласти влагосодержаний  $\bar{u} \approx 0,05-0,1$ . В процессе сушки керамики изменение критерия Поснова происходит только за счет изменения  $\Delta t = t_{\text{п}} - t_{\text{ц}}$  ( $\text{Pn} \approx 0,08-0,1$ ) [11, 15].

Большое влияние на массоперенос оказывает комплексный критерий Федорова  $\text{Fe} = \varepsilon \text{Ko Pn}$ . Однако, поскольку сушка тонких материалов протекает при очень малых значениях критерия  $\text{Pn}$  и значениях критерия фазового превращения  $\varepsilon \rightarrow 0$  (влага переносится к поверхности материала в виде жидкости), величиной критерия Федорова можно пренебречь [11–14]. При сушке тонких материалов критерий  $\varepsilon$  мало зависит от режимных параметров.

Существенное влияние на тепло- и массоперенос оказывает критерий Лыкова  $\text{Lu}$ . При малых значениях  $\text{Lu}$  перенос температуры происходит значительно быстрее, чем влагосодержания [6], и критерий  $\text{Lu}$  оказывает основное влияние на теплоперенос. Анализ использованных источников позволяет дать приближенно предельные изменения критерия  $\text{Lu}$ . Для войлока  $\text{Lu} \approx 0,01-0,06$ , для красной глины  $\text{Lu} \approx 0,04-0,13$ , для белой глины  $\text{Lu} \approx 0,05-0,23$ , для керамической плитки (силикатные глины)  $\text{Lu} \approx (0,11-0,17) \cdot 10^{-2}$  [15] при  $\bar{u} \approx 0,05-0,16$  и температурах  $t_c = 30-57$  °C [15].

Из всей группы критериев подобия в основу по классификации процесса конвективной сушки положены характеристические числа  $\text{Bi}$ ,  $\text{Bi}_m$ ,  $\text{Fo}$ ,  $\text{Fo}_m$  и число  $\text{Lu}$ , которые являются количественными факторами, характеризующими задачу переноса теплоты и влаги [4, 6, 11, 22]. По значению критерия  $\text{Lu}$  все материалы разбиты на три типа: I)  $\text{Lu} = 0,1-0,5$ ; II)  $\text{Lu} = 0,02-0,12$ ; III)  $\text{Lu} = 0,005-0,200$  [4]. Недостаток классификации материалов по  $\text{Bi}$ ,  $\text{Bi}_m$  и  $\text{Lu}$  заключается в том, что определяющие параметры (коэффициенты диффузии теплоты  $a$  и массы  $a_m$ , теплоотдачи  $\bar{\alpha}$  и массоотдачи  $\bar{\alpha}_m$ ) зависят не только от температуры, влагосодержания, вида материала, но и от конкретного метода и режима сушки [4]. Для определения критериев  $\text{Bi}$ ,  $\text{Bi}_m$ ,  $\bar{\alpha}$  и  $\bar{\alpha}_m$  использовались формулы для тепло- и массообменного критериев Нуссельта [1–5].

Тепло- и массообменные коэффициенты теплоотдачи  $\bar{\alpha}$  и массоотдачи  $\bar{\alpha}_m$  определяются по формулам [2, 4, 6, 8]

$$\text{Nu} = C \text{Re}^{0,5} \left( \frac{T_c}{T_{\text{м.т}}} \right)^2 \left( \frac{\bar{u}}{\bar{u}_{\text{кр}}} \right)^n; \quad (1)$$

$$\text{Nu}_m = A \text{Re}^{0,6} \text{Pr}_m^{0,33} \text{Gu}^{0,135} \left( \frac{T_{\text{п}}}{T_c} \right)^2, \quad (2)$$

где числа Нуссельта  $\text{Nu} = \frac{\bar{\alpha} l}{\lambda_{\text{воз}}}$ ,  $\text{Nu}_m = \frac{\bar{\alpha}_m l}{\lambda_m}$ ;  $\bar{\alpha}$  – коэффициент теплоотдачи от поверхности испарения материала в окружающую среду;  $\text{Re}$  – число

Рейнольдса;  $l$  – длина образца материала по набеганию потока;  $\lambda_{\text{воз}}$  – коэффициент теплопроводности воздуха;  $T_c$ ,  $T_{\text{м.т}}$  – абсолютные температуры среды и мокрого термометра;  $\text{Gu} = \frac{T_c - T_{\text{м.т}}}{T_c}$  – критерий Гухмана;

$\text{Pr}_m = \frac{\nu_{\text{воз}}}{D}$  – массообменный критерий Прандтля [2, 4, 23];  $\nu_{\text{воз}}$  – коэффициент кинематической вязкости воздуха, м<sup>2</sup>/ч.

При  $t = 0$  °С коэффициент диффузии  $D_0 = 0,0754$  м<sup>2</sup>/ч [23]. Пересчет коэффициента диффузии  $D_0$  на любую температуру проводится по формуле [23]

$$D = D_0 \left( \frac{T_c}{273} \right)^{1,89}, \text{ м}^2/\text{ч}.$$

В случае испарения водяных паров с поверхности материала формула имеет вид [23]

$$D = 0,0754 \left( \frac{T_c}{273} \right)^{1,89}, \text{ м}^2/\text{ч}.$$

Коэффициент кинематической вязкости воздуха  $\nu_{\text{воз}}$  принимается по средней температуре между поверхностью материала  $t_{\text{п}}$  и средой  $t_c$ . Массообменный критерий Прандтля равен

$$\text{Pr}_m^{0,33} = \left( \frac{\nu_{\text{воз}}}{D} \right)^{0,33} = \left( \frac{0,06}{0,20} \right)^{0,33} = 0,66.$$

Коэффициенты  $C$  и  $A$  в уравнениях (1) и (2) принимают значения: для керамики  $C = 0,75$ , для асбеста  $C = 0,7$ , для войлока  $C = 0,435$ , для пластин глины  $C = 0,45$  [1, 24], постоянная  $A = 0,49$  [23, 24]. Поправки  $\left( \bar{u} / \bar{u}_{\text{кр}} \right)^n$  и  $\left( T_{\text{п}} / T_c \right)^2$  в (1) и (2) учитывают уменьшение коэффициентов  $\bar{\alpha}$  и  $\bar{\alpha}_m$  в периоде падающей скорости сушки. Для керамики, асбеста и войлока коэффициент  $n = 0,5$ , для глины  $n = 0,9$  [1, 14, 24]. Значения коэффициентов тепло- и массоотдачи вычислялись по соотношениям:

$$\bar{\alpha} = \frac{\text{Nu} \lambda_{\text{воз}}}{l}; \quad \bar{\alpha}_m = \frac{\text{Nu}_m \lambda_m}{l}. \quad (3)$$

По вычисленным значениям коэффициентов  $\bar{\alpha}$  и  $\bar{\alpha}_m$  определяются числа  $\text{Bi}$  и  $\text{Bi}_m$ :

$$\text{Bi} = \frac{\bar{\alpha} R}{\lambda_{\text{вл}}}; \quad \text{Bi}_m = \frac{\bar{\alpha}_m R}{\lambda_m}. \quad (4)$$

В табл. 1 приведены результаты расчетов коэффициентов  $\bar{\alpha}$ ,  $\bar{\alpha}_m$ ,  $Bi$ ,  $Bi_m$ , чисел  $Lu$  и  $Pn$  для процесса сушки керамической плитки.

Величины чисел  $Bi$ ,  $Bi_m$ ,  $Lu$  и  $Pn$  (табл. 1) указывают на то, что процессы сушки тонких теплоизоляционных материалов протекают в условиях внешнего тепло- и массопереноса, когда скорость сушки очень слабо зависит от внутреннего массопереноса [2, 8, 11, 13, 25]. Следовательно, диапазон изменения величин основных критериев подобия показывает, что в условиях внешней задачи в процессах конвективной сушки они практически не оказывают влияния на характер протекания процесса. Интенсивность испарения влаги с поверхности влажного тела определяется величиной коэффициента теплоотдачи  $\bar{\alpha}$  в теплообменном критерии  $Bi$  и параметрами процесса сушки.

К материалам, удаление влаги из которых происходит в условиях внешней задачи, относятся капиллярно-пористые материалы, сушка которых в периоде падающей скорости протекает с наличием периода постоянной скорости сушки и периода постоянной температуры на уровне температуры мокрого термометра  $t_{м.т.}$ . Такая внешняя задача относится к малоинтенсивным процессам сушки [1–3].

Таблица 1

**Значения критериев подобия и коэффициентов тепло- и массообмена в процессе конвективной термообработки и сушки керамической плитки**  
**Values of similarity criteria and heat and mass transfer coefficients in the process of convective heat treatment and drying of ceramic tiles**

Керамическая плитка: $120 \times 80 \times 5$ мм; $\rho = 1860$ кг/м <sup>3</sup> . Режим тепловой обработки: $t_c = 120$ °С; $v = 5$ м/с; $\varphi = 5$ %; $t_{м.т.} = 49$ °С; $\bar{u}_0 = 0,2$ ; $\bar{u}_{кр} = 0,1$ ; $N = 0,022$ мин <sup>-1</sup> ; $\lambda_0 = 0,8$ Вт/(м·°С); $\lambda_{вл} \approx \lambda_0 + 0,075 \bar{t} \bar{u} \exp(-2\bar{u})$ ; $\lambda_m = 0,235$ кг/(м·ч·°М); $m_u \approx 8,7N \exp(-2\bar{u}_0)$ ; $m_t = 0,115 \exp(-2\bar{u}_{кр})$								
$\bar{u}$	$\bar{\alpha}$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·°С)	$\lambda_{вл}$ , Вт/(м·°С)	$Bi$	$\bar{\alpha}_m$ , кг/(ч·°М)	$\lambda_m$ , кг/(м·ч·°М)	$Bi_m$	$Lu$	$Pn$
0,08	47,5	1,06	0,120	26,4	0,235	0,28	0,03	0,05
0,06	39,6	1,02	0,097	20,2	0,220	0,21	0,05	0,07
0,04	30,5	0,98	0,078	16,4	0,198	0,20	0,11	0,09
0,02	22,4	0,89	0,064	14,5	0,185	0,19	0,13	0,06

Следовательно, из всей группы критериев подобия, полученных из решения дифференциальных уравнений тепло- и массообмена, в случае внешней задачи можно записать для безразмерных температур и влагосодержаний [8]:

$$\bar{T}^* = \frac{t_c - \bar{t}}{t_c - t_0} = f(-Bi, Fo); \quad (5)$$

$$\bar{U}^* = \frac{\bar{u} - u_p}{\bar{u}_0 - u_p} = f(-\text{Bi}_m, \text{Fo}_m). \quad (6)$$

Из решения полной системы дифференциальных уравнений массо- и теплопереноса для частного случая при отсутствии в материале термовлагопроводности (критерий  $\text{Pn} = 0$ ), а критерий  $\varepsilon = 0$  (влага в материале перемещается в виде жидкости) А. В. Лыковым было получено решение:

$$\bar{T}^* = \frac{t_c - \bar{t}}{t_c - t_0} = \exp(-\text{Bi} \text{Fo}); \quad (7)$$

$$\bar{U}^* = \frac{\bar{u} - u_p}{\bar{u}_0 - u_p} = \exp(-\text{Bi}_m \text{Fo}_m). \quad (8)$$

В первом периоде сушки температура  $t_0 = t_{\text{м.т}}$ . Комплексы критериев [8, 26–28, 31]:

$$\text{Bi} \text{Fo} = m_t \tau_{\text{II}}; \quad \text{Bi}_m \text{Fo}_m = m_u \tau. \quad (9)$$

Темп нагревания твердого тела  $m_t$  и темп убыли влагосодержания  $m_u$  определяются экспериментально построением графических зависимостей  $\ln(t_c - \bar{t}) = f(\tau)$  и  $\ln(\bar{u}_0 - \bar{u}) = f(\tau)$  путем измерения температуры и влагосодержания в каких-либо точках тела для двух последовательных моментов времени регулярного режима [8, 26–28, 31]. Обработкой многих таких зависимостей для процессов сушки керамики, асбеста, войлока, глины, кожи, тканей при различных режимах сушки получены уравнения для  $m_t$  и  $m_u$  [14, 26–28]:

$$m_t \approx 0,115 \exp(-2\bar{u}_{\text{кр}}); \quad (10)$$

$$m_u \approx 8,7 N \exp(-2\bar{u}_0). \quad (11)$$

Для (7) и (8) с учетом (9) запишем в виде [26–28]:

$$\bar{T}^* = \frac{t_c - \bar{t}}{t_c - t_{\text{м.т}}} = \exp(-m_t \tau_{\text{II}}); \quad (12)$$

$$\bar{U}^* = \frac{\bar{u} - u_p}{\bar{u}_0 - u_p} = \exp(-m_u \tau). \quad (13)$$

Из (12) и (13) определяются среднеинтегральная температура материала и длительность сушки [26–29]:

$$\bar{t} = t_c - (t_c - t_{\text{м.т}}) \exp(-m_t \tau_{\text{II}}); \quad (14)$$

$$\tau = -\frac{1}{m_u} \ln \frac{\bar{u} - u_p}{\bar{u}_0 - u_p}. \quad (15)$$

Время сушки в период падающей скорости

$$\tau_{II} = -\frac{1}{m_u} \ln \frac{\bar{u} - u_p}{\bar{u}_{кр} - u_p}. \quad (16)$$

Для практики сушки большой интерес представляет возможность вычисления продолжительности сушки для любого заданного режима по уравнениям, использование которых не требует проведения эксперимента. Все существующие опытные уравнения для определения длительности сушки содержат, как правило, от четырех до двух постоянных, определяемых из эксперимента [1–5].

Для построения кривой сушки и определения времени сушки, не производя эксперимента, необходимо иметь уравнения, связывающие ряд значений влагосодержания материала со значениями времени сушки, но которые не содержали бы постоянных, требующих проведения дополнительных опытов [8]. При наличии такой кривой сушки и скорости сушки определяется длительность процесса сушки до любого заданного значения влагосодержания без проведения эксперимента. Для построения такой кривой сушки воспользуемся тремя уравнениями, содержащими только одну величину, которую необходимо знать из опыта, – скорость сушки в периоде постоянной скорости  $N$ .

Уравнение (15), полученное на основе теории регулярного теплового режима [6, 10, 27, 28, 30], содержит параметр  $N$  в (11). Уравнение А. В. Лыкова для конвективной сушки [8]

$$\tau = \frac{\bar{u}_0 - \bar{u}_{кр}}{N} - \frac{\bar{u}_0}{1,8N} \ln \frac{\bar{u} - u_p}{\bar{u}_{кр} - u_p}, \quad (17)$$

где  $\bar{u}_{кр}$  – условное критическое влагосодержание материала, определяемое соотношением  $\bar{u}_{кр} - u_p = 1,8/\bar{u}_0$ .

Уравнение Н. С. Михеевой [32], полученное на основе большого числа опытных исследований по конвективной сушке различных капиллярно-пористых влажных материалов:

$$\tau = \frac{1,8}{N} \left[ (\bar{u}_0 - u_p) - 0,56\bar{u}_0 \right] \ln \frac{\bar{u}_0}{\bar{u} - u_p}. \quad (18)$$

Необходимый параметр  $N$  в первом приближении можно определить по методу Докучаева – Смирнова [33] следующим способом: от начального влагосодержания  $\bar{u}_0$  выбирается произвольное значение  $\bar{u}_1$ , близкое к начальному  $\bar{u}_0$ , соответствующее времени сушки  $\tau_1$ , и находится направ-

ление прямой, которое определяет величину  $N \approx \text{tg} \frac{\Delta \bar{u}}{\Delta \tau}$ . На рис. 1 и 4 показано определение  $N$  по методу Докучаева – Смирнова. Кривые сушки, построенные без проведения опытов по формулам (15), (17) и (18) с определением величины  $N$  по методу Докучаева – Смирнова, дают несовпадение с действительной кривой (I) с погрешностью 4–5 % (рис. 1–4).

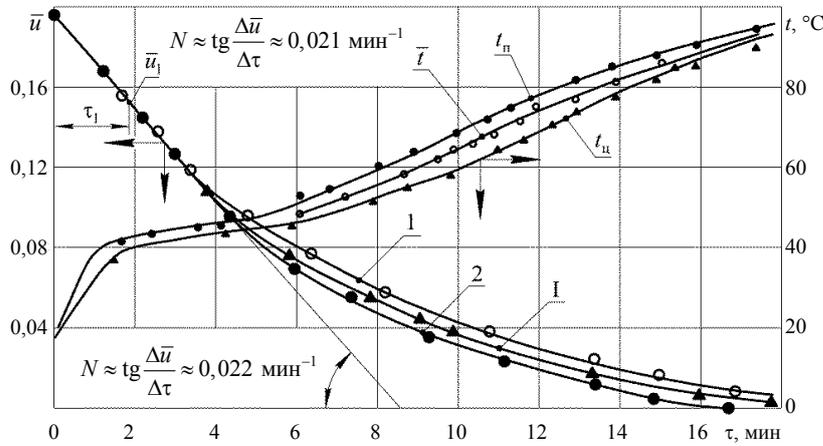


Рис. 1. Опытная кривая сушки (I) и экспериментальные температурные кривые для температур в центре и на поверхности материала в процессе тепловой обработки и сушки керамической плитки; режим сушки:  $t_c = 120\text{ }^\circ\text{C}$ ;  $v = 5\text{ м/с}$ ;  $\varphi = 5\%$ ; 1 – кривая сушки по формуле (17); 2 – то же по (18), температурная кривая  $\bar{t} = f(\tau)$  по (14)

Fig. 1. Experimental drying curve (I) and experimental temperature curves for temperatures in the center and on the surface of the material during heat treatment and drying of ceramic tiles; drying mode:  $t_c = 120\text{ }^\circ\text{C}$ ;  $v = 5\text{ м/с}$ ;  $\varphi = 5\%$ ; 1 – drying curve according to equation (17); 2 – drying curve according to equation (18), temperature curve  $\bar{t} = f(\tau)$  according to equation (14)

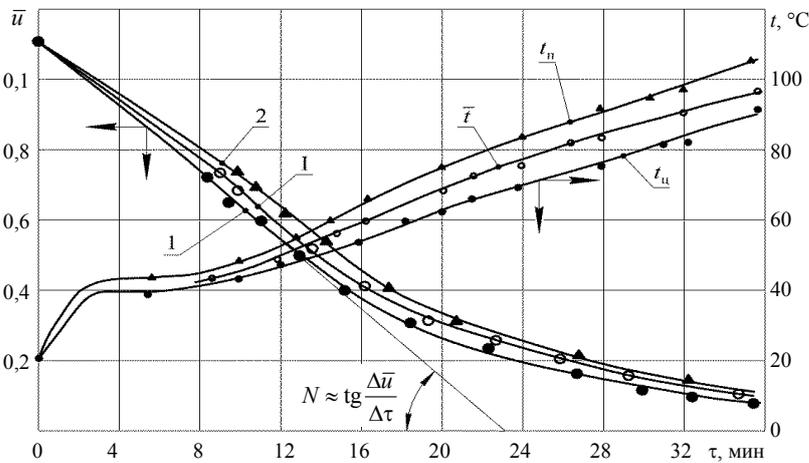


Рис. 2. Опытная кривая сушки (I) и экспериментальные температурные кривые для температур в центре и на поверхности материала в процессе сушки войлочной пластины; режим сушки:  $t_c = 120\text{ }^\circ\text{C}$ ;  $v = 3\text{ м/с}$ ;  $\varphi = 5\%$ ; 1 – кривая сушки по формуле (17); 2 – то же по (18); экспериментальная температурная кривая  $\bar{t} = f(\tau)$  по (14)

Fig. 2. Experimental drying curve (I) and experimental temperature curves for temperatures in the center and on the surface of the material during the drying of the felt plate; drying mode:  $t_c = 120\text{ }^\circ\text{C}$ ;  $v = 3\text{ м/с}$ ;  $\varphi = 5\%$ ; 1 – drying curve according to equation (17); 2 – drying curve according to equation (18); experimental temperature curve  $\bar{t} = f(\tau)$  according to equation (14)

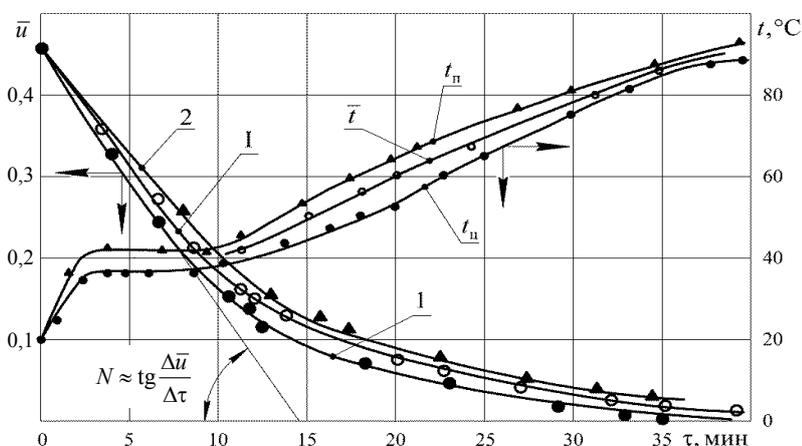


Рис. 3. Экспериментальная кривая сушки (I) и опытные температурные кривые для температур в центре и на поверхности материала в процессе термической обработки и сушки асбестовой пластины; режим сушки  $t_c = 120\text{ }^\circ\text{C}$ ;  $v = 5\text{ м/с}$ ;  $\varphi = 5\%$ ; 1 – кривая сушки по формуле (17); 2 – то же по (18); экспериментальная кривая  $\bar{t} = f(\tau)$  по (14)

Fig. 3. Experimental drying curve (I) and experimental temperature curves for temperatures in the center and on the surface of the material during heat treatment and drying of the asbestos plate; drying mode  $t_c = 120\text{ }^\circ\text{C}$ ;  $v = 5\text{ м/с}$ ;  $\varphi = 5\%$ ; 1 – drying curve according to equation (17);

2 – drying curve according to equation (18); experimental curve  $\bar{t} = f(\tau)$  according to equation (14)

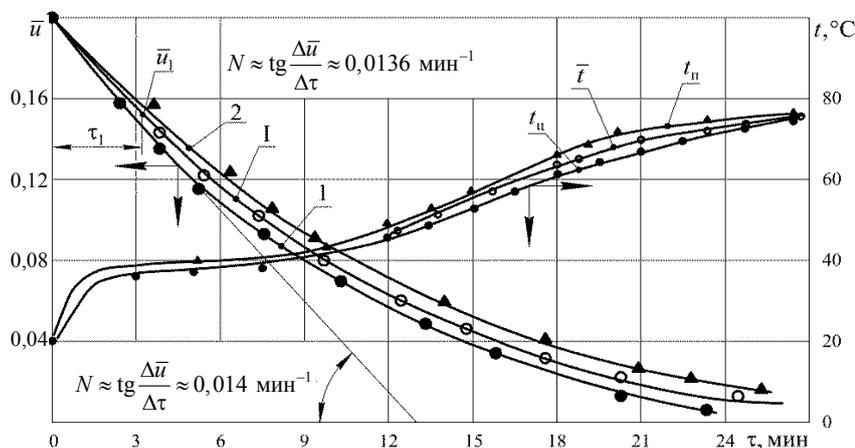


Рис. 4. Опытная кривая сушки (I) и экспериментальные кривые для температур в центре и на поверхности материала для процесса сушки пластин глины; режим сушки  $t_c = 90\text{ }^\circ\text{C}$ ;  $v = 10\text{ м/с}$ ;  $\varphi = 6\%$ ; 1 – кривая сушки по формуле (17); 2 – то же по (18); расчетная температурная кривая  $\bar{t} = f(\tau)$  по (14)

Fig. 4. Experimental drying curve (I) and experimental curves for temperatures in the center and on the surface of the material for the process of drying clay plates; drying mode  $t_c = 90\text{ }^\circ\text{C}$ ;  $v = 10\text{ м/с}$ ;  $\varphi = 6\%$ ; 1 – drying curve according to equation (17); 2 – drying curve according to equation (18); calculated temperature curve  $\bar{t} = f(\tau)$  according to equation (14)

Результаты построения кривых сушки по (15), (17) и (18) и сопоставление с экспериментальными значениями для сушки шерстяного войлока и листового асбеста даны в табл. 2, кривых сушки для керамической плитки и пластины из красной глины по (17) и (18) – в табл. 3.

В табл. 2 и 3 приведены также расчеты температуры по уравнению (14) и сопоставление значений с экспериментом.

Таблица 2

**Расчет кривой сушки по уравнениям (15), (17), (18) и температуры по (14) и сопоставление значений с экспериментом в процессах сушки шерстяного войлока и листового асбеста**

**Calculation of the drying curve according to equations (15), (17), (18) and of temperature according to equation (14) and comparison of values with experiment in the processes of drying wool felt and sheet asbestos**

Шерстяной войлок: $130 \times 100 \times 8$ мм; $\rho = 180$ кг/м <sup>3</sup> ; $\bar{u}_0 = 1,14$ ; $\bar{u}_{кр} \approx 0,73$ .								
Режим сушки: $t_c = 120$ °С; $v = 3$ м/с; $\phi = 5$ %; $t_{м.т.} = 40$ °С; $N = 0,051$ мин <sup>-1</sup> ;								
$m_{\bar{u}} \approx 0,06$ мин <sup>-1</sup> ; $m_t = 0,027$ мин <sup>-1</sup> .								
$\bar{u}$	0,75	0,70	0,60	0,50	0,40	0,30	0,20	0,10
$\tau$ , мин (15)	8,1	9,2	10,0	13,3	15,9	19,2	24,2	28,8
$\tau$ , мин (17)	9,4	10,0	11,8	14,2	16,7	21,3	25,6	–
$\tau$ , мин (18)	7,6	8,8	11,4	14,0	16,2	21,2	25,8	–
$\tau$ , мин (экс.)	8,5	9,5	10,5	13,5	16,0	19,5	23,5	30
$\bar{t}$ , °С (экс.)	40	46	50	54	58	64	72	84
$\bar{t}$ , °С (14)	–	45	48	52	56	62,5	71	82
Листовой асбест: $120 \times 80 \times 6$ мм; $\rho = 770$ кг/м <sup>3</sup> ; $\bar{u}_0 = 0,46$ ; $\bar{u}_{кр} = 0,21$ ;								
$N = 0,0295$ мин <sup>-1</sup> .								
Режим сушки: $t_c = 120$ °С; $v = 5$ м/с; $\phi = 5$ %; $t_{м.т.} = 42$ °С; $m_{\bar{u}} \approx 0,08$ мин <sup>-1</sup> ;								
$m_t = 0,065$ мин <sup>-1</sup> .								
$\bar{u}$	0,25	0,20	0,16	0,14	0,12	0,08	0,04	0,02
$\tau$ , мин (15)	7,7	9,4	11,6	12,8	14,4	18,2	24,8	30,6
$\tau$ , мин (17)	7,6	10,4	12,5	14,0	15,4	20,4	26,2	32,3
$\tau$ , мин (18)	7,6	10,8	12,4	14,2	15,7	19,8	25,8	32,5
$\tau$ , мин (экс.)	7,5	10,0	11,5	13,0	15,0	19,0	24,5	31,0
$\bar{t}$ , °С (экс.)	42	42	48	57	62	72	86	95
$\bar{t}$ , °С (14)	–	–	50,5	59,0	63,5	74,0	88,0	96,0

Таблица 3

**Расчет кривой сушки по уравнениям (17), (18) и температуры по (14) и сопоставление значений с экспериментом в процессах сушки керамической плитки и пластин глины**  
**Calculation of the drying curve according to equations (17), (18) and of temperature according to equation (14) and comparison of the values with the experiment in the processes of drying ceramic tiles and clay plates**

Керамическая плитка: $120 \times 80 \times 5$ мм; $\rho = 1860$ кг/м <sup>3</sup> ; $\bar{u}_0 = 0,2$ ; $\bar{u}_{кр} = 0,1$ . Режим сушки: $t_c = 120$ °С; $v = 5$ м/с; $\varphi = 5$ %; $t_{м.т.} = 49$ °С; $N = 0,022$ мин <sup>-1</sup> ; $m_{\bar{u}} \approx 0,13$ мин <sup>-1</sup> ; $m_t = 0,09$ мин <sup>-1</sup> .								
$\bar{u}$	0,16	0,12	0,10	0,08	0,06	0,04	0,02	0,01
$\tau$ , мин (17)	2,2	3,6	4,9	6,5	8,6	10,8	14,2	18,5
$\tau$ , мин (18)	1,8	3,5	5,0	6,6	8,7	11,4	15,3	20,5
$\tau$ , мин (экс.)	2,0	3,5	4,5	6,0	8,0	10,5	14,5	19,5
$\bar{t}$ , °С (экс.)	48	48	49	57	65	72	87	96
$\bar{t}$ , °С (14)	–	–	–	60	67	74,4	88	98
Пластина (красная глина): $120 \times 80 \times 10$ мм; $\rho = 1860$ кг/м <sup>3</sup> ; $\bar{u}_0 = 0,2$ ; $\bar{u}_{кр} = 0,12$ ; $N = 0,014$ мин <sup>-1</sup> . Режим сушки: $t_c = 90$ °С; $v = 10$ м/с; $\varphi = 6$ %; $t_{м.т.} = 39$ °С; $m_{\bar{u}} \approx 0,0816$ мин <sup>-1</sup> ; $m_t = 0,075$ мин <sup>-1</sup> .								
$\bar{u}$	0,16	0,12	0,10	0,08	0,06	0,04	0,02	0,01
$\tau$ , мин (17)	3,4	5,6	7,2	9,0	11,6	15,4	19,8	25,4
$\tau$ , мин (18)	2,75	5,9	8,2	10,6	14,0	17,6	22,6	–
$\tau$ , мин (экс.)	3,0	5,0	7,5	9,5	12,5	16,5	20,5	25,5
$\bar{t}$ , °С (экс.)	39	39	39	45	55	62	70	75
$\bar{t}$ , °С (14)	–	–	–	47,0	56,5	63,0	71,0	76,5

### ВЫВОДЫ

1. Исследованием конвективной сушки теплоизоляционных материалов с одновременным изучением закономерностей переноса теплоты и массы установлено, что процесс термообработки и сушки протекает в условиях внешней задачи, когда тепло- и массообменные числа Био меньше единицы и критерии подобия не влияют на конвективную сушку тонких материалов. Интенсивность теплообмена определяется величиной коэффициента теплоотдачи в числе Био и режимными параметрами процесса сушки.

2. Установлено, что процессы сушки материалов относятся к малоинтенсивным процессам. Дано построение кривых сушки без проведения экспериментов для определения длительности сушки на основе приближенных уравнений, что представляет интерес для практики сушки.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Лыков, А. В. Теория сушки / А. В. Лыков. М.: Энергия, 1968. 472 с.
2. Акулич, П. В. Расчеты сушильных и теплообменных установок / П. В. Акулич. Минск: Беларус. наука, 2010. 443 с.
3. Красников, В. В. Кондуктивная сушка / В. В. Красников. М.: Энергия, 1973. 288 с.
4. Сажин, Б. С. Научные основы техники сушки / Б. С. Сажин. М.: Наука, 1997. 447 с.
5. Рудобашта, С. П. Массоперенос в системах с твердой фазой / С. П. Рудобашта. М.: Химия, 1980. 248 с.
6. Лыков, А. В. Теория тепло- и массопереноса / А. В. Лыков, Ю. А. Михайлов. М. – Л.: Госэнергоиздат, 1963. 535 с.
7. Лыков, А. В. Теоретические основы строительной теплофизики / А. В. Лыков. Минск: Изд-во Академии наук БССР, 1961. 519 с.
8. Лыков, А. В. Тепло- и массообмен в процессах сушки / А. В. Лыков. М.: Госэнергоиздат, 1956. 464 с.
9. Куц, П. С. Некоторые закономерности тепловлагообмена и приближенные методы расчета кинематики процесса сушки влажных материалов / П. С. Куц, А. И. Ольшанский // Инженерно-физический журнал. 1977. Т. 32, № 5. С. 1007–1014.
10. Васильев, В. Н. Технология сушки. Основы тепло- и массопереноса / В. Н. Васильев, В. Е. Куцакова, С. В. Фролов. Санкт-Петербург: ГИОРД, 2013. 224 с.
11. Михайлов, Ю. А. Влияние критериев подобия на тепло- и массообмен при конвективной сушке / Ю. А. Михайлов // Известия Академии наук Латвийской ССР, 1957. № 6.
12. Ольшанский, А. И. Регулярный тепловой режим и влияние критериев подобия тепло-массообмена на процесс конвективной сушки пористой керамики / А. И. Ольшанский // Инженерно-физический журнал. 2016. Т. 89, № 1. С. 37–48.
13. Рабинович, Г. Д. Новый метод расчета конвективной сушки тонких материалов / Г. Д. Рабинович // Инженерно-физический журнал. 1966. Т. 11, № 2. С. 182–192.
14. Ольшанский, А. И. Исследование сушки тонких материалов с использованием обобщенных комплексных переменных / А. И. Ольшанский // Инженерно-физический журнал. 2016. Т. 89, № 4. С. 884–894.
15. Журавлева, В. П. Массоперенос при термообработке и сушке капиллярнопористых строительных материалов / В. П. Журавлева. Минск: Наука и техника, 1972. 189 с.
16. Лыков, А. В. Явления переноса в капиллярно-пористых телах / А. В. Лыков. М.: Гостехиздат, 1954. 296 с.
17. Горобцова, Н. Е. Исследование диффузии влаги во влажных материалах / Н. Е. Горобцова // Инженерно-физический журнал. 1968. Т. 15, № 6. С. 1019–1026.
18. Франчук, А. У. Таблицы теплотехнических показателей строительных материалов / А. У. Франчук. М.: НИИ строительной физики, 1969. 142 с.
19. Блази, В. Строительная физика. Справочник проектировщика / В. Блази. М.: Техносфера, 2005. 536 с.
20. Григорьев, И. С. Физические величины: справочник / И. С. Григорьев, Е. З. Мейлихов. М.: Энергоатомиздат, 1991. 1232 с.
21. Лыков, А. В. Тепломассообмен: справочник / А. В. Лыков. М.: Энергия, 1972. 552 с.
22. Мельникова, И. С. Определение некоторых критериев переноса тепла и вещества при испарении из твердых тел / И. С. Мельникова // Тепло- и массообмен в процессах испарения: сб. ст. М.: Изд-во АН СССР, 1958. 255 с.
23. Нестеренко, А. В. Основы термодинамических расчетов вентиляции и кондиционирования воздуха / А. В. Нестеренко. М.: Высш. шк., 1962. 355 с.
24. Лыков, А. В. Кинетика теплообмена в процессе сушки влажных материалов / А. В. Лыков, П. С. Куц, А. И. Ольшанский // Инженерно-физический журнал. 1972. Т. 23, № 3. С. 401–406.
25. Сергеев, Г. Т. Исследование внешнего тепло- и массопереноса при испарении жидкости капиллярно-пористым телом / Г. Т. Сергеев // Инженерно-физический журнал. 1961. Т. 4, № 5. С. 33–37.

26. Ольшанский, А. И. Исследование тепломассообмена в процессах тепловой обработки и сушки теплоизоляционных материалов / А. И. Ольшанский, С. В. Жерносек, А. М. Гусаров // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2022. Т. 65, № 2. С. 156–168. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-2-156-168>.
27. Ольшанский, А. И. Регулярный тепловой режим нагревания влажных плоских капиллярно-пористых материалов в процессе сушки / А. И. Ольшанский, В. И. Ольшанский // Инженерно-физический журнал. 2014. Т. 87, № 6. С. 1308–1318.
28. Ольшанский, А. И. Экспериментальное исследование кинетики сушки тонких плоских влажных материалов методом регулярного режима с использованием обобщенных комплексных переменных / А. И. Ольшанский, А. М. Гусаров // Инженерно-физический журнал. 2017. Т. 90, № 3. С. 700–713.
29. Ольшанский, А. И. Экспериментальные исследования тепловлагообмена в процессе конвективной сушки тонких влажных материалов / А. И. Ольшанский, С. В. Жерносек, А. М. Гусаров // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2018. Т. 61, № 6. С. 564–578. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-6-564-578>.
30. Ольшанский, А. И. Исследование кинетики тепловлагообмена при термической обработке и сушке тонких влажных теплоизоляционных материалов / А. И. Ольшанский, А. Н. Голубев // Энергетика. Изв. высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2023. Т. 66, № 1. С. 66–79. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-1-66-79>.
31. Шорин, С. Н. Теплопередача / С. Н. Шорин. М.: Высшая школа, 1964. 491 с.
32. Кавказов, Ю. Л. Тепло- и массообмен в технологии кожи и обуви / Ю. Л. Кавказов. М., Легкая индустрия, 1973. 272 с.
33. Ольшанский, А. И. Исследование процесса сушки пористой керамики методом Доучаева–Смирнова / А. И. Ольшанский // Инженерно-физический журнал. 2013. Т. 86, № 2. С. 77–85.

Поступила 05.04.2023    Подписана в печать 06.06.2023    Опубликована онлайн 29.09.2023

#### REFERENCES

1. Lykov A. V. (1968) *Theory of Drying*. Moscow, Energiya Publ. 472 (in Russian).
2. Akulich P. V. (2010) *Calculations of Drying and Heat Exchange Installations*. Minsk, Belaruskaya Navuka Publ. 443 (in Russian).
3. Krasnikov V. V. (1973) *Conductive Drying*. Moscow, Energiya Publ. 288 (in Russian).
4. Sazhin B. S. (1997) *Scientific Fundamentals of Drying Techniques*. Moscow, Nauka Publ. 447 (in Russian).
5. Rudobashta S. P. (1980) *Mass Transfer in Systems with a Solid Phase*. Moscow, Khimiya Publ. 248 (in Russian).
6. Lykov A. V., Mikhailov Yu. A. (1963) *Theory of Heat and Mass Transfer*. Moscow – Leningrad, Gosenergoizdat Publ. 535 (in Russian).
7. Lykov A. V. (1961) *Theoretical Foundations of Construction Thermophysics*. Minsk, BSSR Academy of Sciences Publ. 519 (in Russian).
8. Lykov A. V. (1956) *Heat and Mass Transfer in Drying Processes*. Moscow, Gosenergoizdat Publ. 464 (in Russian).
9. Kuts P. S., Ol'shanskii A. I. (1977) Some Features of Heat and Moisture Transfer and Approximate Methods of Calculating the Drying Kinetics of Moist Materials. *Journal of Engineering Physics*, 32, 650–656. <https://doi.org/10.1007/BF00862568>.
10. Vasiliev V. N., Kutsakova V. E., Frolov S. V. (2013) *Drying Technology. Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. St. Petersburg, Giord Publ. 224 (in Russian).
11. Mikhailov Yu. A. (1957) Influence of Similarity Criteria on Heat and Mass Transfer During Convective Drying. *Izvestiya Akademii Nauk Latvviyskoy SSR* [Proceedings of the Academy of Sciences of the Latvian SSR], (6) (in Russian).
12. Ol'shanski A. I. (2016) Regular Thermal Regime and Influence of Heat and Mass Transfer Similarity Criteria on the Process of Convective Drying of Porous Ceramics. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 89, 38–49. <https://doi.org/10.1007/s10891-016-1351-6>.
13. Rabinovich G. D. (1966) A New Method of Calculation of Convective Drying of Thin Materials. *Journal of Engineering Physics*, 11, 98–104. <https://doi.org/10.1007/BF00831262>.

14. Ol'shanskii A. I. (2016) Investigation of the Drying of Thin Materials with the use of Generalized Complex Variables. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 89, 886–895. <https://doi.org/10.1007/s10891-016-1450-46>.
15. Zhuravleva V. P. (1972) *Mass Transfer During Heat Treatment and Drying of Capillary-Porous Construction Materials*. Minsk, Nauka i Tekhnika Publ. 189 (in Russian).
16. Lykov A. V. (1954) *Transfer Phenomena in Capillary-Porous Bodies*. Moscow, Gostekhizdat Publ. 296 (in Russian).
17. Gorobtsova N. E. (1968) Moisture Diffusion in Moist Materials. *Journal of Engineering Physics*, 15, 1183–1188. <https://doi.org/10.1007/BF00828942>.
18. Franchuk A. U. (1969) *Tables of Thermal Performance of Construction Materials*. Moscow, Research Institute of Construction Physics. 142 (in Russian).
19. Blasi V. (2005) *Construction Physics. Designer's Handbook*. Moscow, Tekhnosfera Publ. 536 (in Russian).
20. Grigoriev I. S., Meilikhov E. Z. (1991) *Physical Quantities: A Handbook*. Moscow, Energoatomizdat Publ. 1232 (in Russian).
21. Lykov A. V. (1972) *Heat and Mass Transfer: A Handbook*. Moscow, Energiya Publ. 552 (in Russian).
22. Mel'nikova I. S. (1958) Determination of Some Criteria for the Transfer of Heat and Matter During Evaporation from Solids. *Teplo- i Massoobmen v Protsessakh Ispareniya: Sb. St.* [Heat and Mass Transfer in Evaporation Processes. Collection of Articles]. Moscow, USSR Academy of Sciences Publ. 255 (in Russian).
23. Nesterenko A. V. (1962) *Fundamentals of Thermodynamic Calculations of Ventilation and Air Conditioning*. Moscow, Vysshaya shkola Publ. 355 (in Russian).
24. Lykov A. V., Kutz P. S., Ol'shanskii A. I. (1972) Kinetics of Heat Transfer during the Desiccation of Moist Materials. *Journal of Engineering Physics*, 23 (3), 1082–1086. <https://doi.org/10.1007/bf00832214>.
25. Sergeev G. T. (1961) Study of External Heat and Mass Transfer During the Evaporation of a Liquid by a Capillary-Porous Body. *Inzhenerno-Fizicheskii Zhurnal* [Engineering and Physics Journal], 4 (5), 33–37 (in Russian).
26. Ol'shanskii A. I., Zhernosek S. V., Gusarov A. M. (2022) Investigation of Heat and Mass Transfer in the Processes of Heat Treatment and Drying of Thermal Insulation Materials. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 65 (2), 156–168. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-2-156-168> (in Russian).
27. Ol'shanskii A. I. (2014) Regular Heat Regime of Heating of Moist Capillary-Porous Materials in the Process of Their Drying. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 87, 1362–1373. <https://doi.org/10.1007/s10891-014-1139-5>.
28. Ol'shanskii A. I., Gusarov A. M. (2017) Experimental Study of the Kinetics of Drying of Thin Plane Moist Materials by the Regular-Regime Method Using Generalized Complex Variables. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 90, 665–678. <https://doi.org/10.1007/s10891-017-1614-x>.
29. Ol'shanskii A. I., Zhernosek S. V., Gusarov A. M. (2018) Experimental Studies of Heat and Moisture Exchange in the Process of Convective Drying of Thin Wet Materials. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 61 (6), 564–578/ <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-6-564-578> (in Russian).
30. Ol'shanskii A. I., Golubev A. N. (2023) Investigation of the Kinetics of Heat and Moisture Exchange during Heat Treatment and Drying of Thin Wet Thermal Insulation Materials. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 66 (1), 66–79. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-1-66-79> (in Russian).
31. Shorin S. N. (1964) *Heat Transfer*. Moscow, Vysshaya Shkola Publ. 491 (in Russian).
32. Kavkazov Yu. L. (1973) *Heat and Mass Transfer in Leather and Footwear Technology*. Moscow, Legkaya Promyshlennost' Publ. 272 (in Russian).
33. Ol'shanskii A. I. (2013) Investigation of the Processes of drying of Porous Ceramics by the Dokuchaev–Smirnov Method. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 86 (1), 80–87. <https://doi.org/10.1007/s10891-013-0807-1>.