

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-5-457-476>

УДК 66.047.7

Исследования конвективной сушки тонких и толстых влажных материалов

А. И. Ольшанский¹⁾, А. Н. Голубев¹⁾

¹⁾Витебский государственный технологический университет
(Витебск, Республика Беларусь)

Реферат. Рассмотрены закономерности сушки тонких и толстых образцов керамики и пластин глины, установлены значения теплообменного числа Био, а также характер изменения температурного коэффициента сушки для его различных величин. Анализ эксперимента по сушке тонких и толстых материалов показал, что одного числа Био недостаточно для такого деления, поскольку величина числа Био зависит от многих факторов – режима сушки, коэффициента теплоотдачи, вида влажного тела и его коэффициента теплопроводности сухого тела. Самое значительное влияние на величину числа Био оказывает сложная форма зависимости коэффициента теплопроводности влажного тела от влагосодержания и температуры. На основе изучения и анализа многих источников установлены формулы для определения коэффициентов теплопроводности влажных тел. Для комплексной оценки возможного деления материалов на тонкие и толстые изучено влияние группы критериев подобия тепло- и массообмена на температурный коэффициент сушки. Предложен возможный метод деления материалов совместно по величине тепло- и массообменных чисел Био и критерию Лыкова на четыре группы. Установлены пределы изменения критерия Лыкова в зависимости от величины чисел Био. Представлены расчеты средней температуры в процессе сушки тонких и толстых образцов керамики и пластин глины по формулам и дано сопоставление значений с опытными данными.

Ключевые слова: температурный коэффициент сушки, сушка тонких и толстых материалов, скорость сушки, коэффициент теплоотдачи, коэффициент теплопроводности влажного тела, влагосодержание

Для цитирования: Ольшанский, А. И. Исследования конвективной сушки тонких и толстых влажных материалов / А. И. Ольшанский, А. Н. Голубев // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2025. Т. 68, № 5. С. 457–476. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-5-457-476>

Investigations of Convective Drying of Thin and Thick Wet Materials

A. I. Ol'shanskii¹⁾, A. N. Golubev¹⁾

¹⁾Vitebsk State Technological University (Vitebsk, Republic of Belarus)

Abstract. The regularities of drying thin and thick ceramic samples and clay plates are considered, the values of the Biot heat exchange number in the process of drying ceramics and clay

Адрес для переписки

Голубев Алексей Николаевич
Витебский государственный технологический университет
просп. Московский, 72,
220035, 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.,
220035, Vitebsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 29 112 79 25
tm@vstu.by

plates of different thicknesses are established, as well as the nature of the change in the drying temperature coefficient for its various values. An analysis of the experiment on drying of thin and thick materials showed that such division based on one Biot number is insufficient, since the Biot value depends on many factors – the drying mode, the heat transfer coefficient, the type of wet body and its coefficient of thermal conductivity of a dry body. The most significant influence on the Biot value is exerted by the complex form of the dependence of the coefficient of thermal conductivity of a wet body on moisture content and temperature. Based on the study and analysis of many sources, formulas have been established for determining the coefficients of thermal conductivity of wet bodies. For a comprehensive assessment of the possible division of materials into thin and thick, the influence of a group of heat and mass transfer similarity criteria on the temperature coefficient of drying was studied. A possible method for dividing materials into four groups based on the value of heat and mass exchange Biot numbers and the Lykov criterion is proposed. The limits of change in the Lykov criterion are established depending on the value of the Biot numbers. Calculations of the average temperature during drying of thin and thick ceramic samples and clay plates are presented using formulas and a comparison of the values with experimental data is given.

Keywords: drying temperature coefficient, drying of thin and thick materials, drying speed, heat transfer coefficient, thermal conductivity coefficient of a wet body, moisture content

For citation: Ol'shanskii A. I., Golubev A. N. (2025) Investigations of Convective Drying of Thin and Thick Wet Materials. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 68 (5), 457–476. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-5-457-476> (in Russian)

Введение

Сушка влажных материалов – сложный теплофизический процесс, в котором изменяются структурно-механические и технологические свойства влажных тел.

Закономерности сушки тонких и толстых плоских материалов значительно различаются как механизмом переноса теплоты и влаги внутри тела, так и характером взаимодействия поверхности испарения материала с окружающей средой [1, 2]. Сушимые тонкие материалы с большой удельной поверхностью имеют малые перепады влагосодержаний и температур по сечению тела. Для таких тонких материалов тепломассообменные числа Био (Bi , Bi_m) в реальных условиях сушки зависят друг от друга и их численные значения имеют приблизительно один порядок [3, 4–6]. При малых значениях Био главным лимитирующим фактором является внешний теплоперенос с поверхности материала при взаимодействии с окружающей средой (внешняя задача) [3–5]. В условиях внешней задачи при незначительных градиентах влагосодержаний и температур скорость сушки практически не зависит от внутреннего массопереноса [4–6] и термодиффузионное сопротивление (термодиффузия) не влияет на условия кинетики сушки (критерий Поснова $Pn \rightarrow 0$). Испарение влаги происходит только с поверхности материала [3–5].

Характер сушки толстых материалов отличается от характера сушки тонких, сушка которых протекает по схеме «мягкого» режима с периодами ее постоянных скорости и температуры на уровне температуры мокрого термометра $t_{м.т}$ [4, 5, 7, 8]. С увеличением толщины материала при сушке

внутри тела возникают значительные температурные градиенты и перепады влагосодержаний, разность температур $t_n - t_c$ возрастает и значительную роль начинает играть термодиффузия, препятствующая переносу влаги от центра тела к поверхности [2, 4, 5]. Происходит углубление зоны испарения, и влага испаряется не только с поверхности, но и внутри тела [1, 4, 9]. При этом сушка толстых материалов происходит по схеме жесткого режима без периода постоянной температуры [2]. Температура возрастает сразу от начальной $t_n \approx 20$ °С до конечной, заданной режимом сушки.

А. В. Лыковым было предложено проводить деление материалов в процессе сушки на тонкие и толстые по величине теплообменного критерия $Bi = \alpha\delta/\lambda_w$, где за характерный размер влажного тела принимать толщину материала δ . Для тонких материалов число $Bi < 1$, для толстых $Bi > 1$. Однако необходимо отметить, что в аналитических решениях уравнения теплопроводности в граничных условиях за характерный размер принимается по условиям симметрии половина толщины пластины $R = \delta/2$ [1, 3, 10], а также то, что на величину числа Bi влияет интенсивность теплообмена на границе тела с окружающей средой, определяемая коэффициентом теплоотдачи $\bar{\alpha}$ [1, 4, 10]. И, наконец, самое большое влияние на величину числа Bi оказывает коэффициент теплопроводности влажного материала $\lambda_{вл}$, который находится в очень сложной форме зависимости от влагосодержания, температуры и вида материала, его коэффициента теплопроводности сухого тела λ_0 [10–16].

В [8] предложено проводить деление на тонкие и толстые материалы с учетом перепада температур $\Delta t = t_n - t_c$ по сечению влажного тела. Для толстых материалов Δt увеличивается с ростом толщины материала. Однако величина числа Bi зависит не только от коэффициента теплоотдачи $\bar{\alpha}$, но и существенно от коэффициента теплопроводности влажного тела $\lambda_{вл}$. Коэффициент $\lambda_{вл}$ зависит не только от температуры и влагосодержания тела, но и от его физических свойств. Например, при коэффициенте теплопроводности сухой войлочной пластины $\lambda_0 \approx 0,052$ Вт/м °С с толщиной $\delta \approx 10$ мм ($Bi = 0,65-0,8$) при режиме сушки $t_c = 120$ °С, $v = 3$ м/с перепад температур $\Delta t = t_n - t_c$ составлял на протяжении всего процесса $\Delta t = 30-35$ °С. Таким образом, величина числа Bi зависит и от теплофизических характеристик материала и, следовательно, от критерия Лыкова $Lu = a_m/a$, где a_m – коэффициент диффузии влаги; a – то же диффузии теплоты; $a_m = \lambda_m/c_m\rho$; $a = \lambda_{вл}/c_{вл}\rho$; λ_m – коэффициент теплопроводности; c_m – то же массоемкости; $c_{вл}$ – удельная теплоемкость влажного тела.

Эксперимент

На рис. 1а и 2а даны температурные кривые $\bar{t} = f(\bar{u})$ для процессов сушки тонких и толстых образцов керамики и пластин глины при $t_c = 120^\circ\text{C}$, скорости воздуха $v = 5$ м/с.

На рис. 1а даны кривые I и II для процессов сушки керамических плиток толщиной $\delta = 5, 10$ мм и $\delta = 20, 30$ и 50 мм соответственно, на рис. 2а – кривые I и II для процессов сушки пластин глины толщиной $\delta = 10, 12, 15$ мм и $\delta = 20, 30$ и 50 мм соответственно.

Эксперимент по конвективной сушке тонких и толстых образцов керамики и глины показал различный характер изменения среднеинтегральных температур. Видно, что в отличие от сушки тонких образцов при сушке толстых не наблюдается постоянной температуры на уровне $t_{\text{м.т.}}$. Температура сразу возрастает с начала процесса от начальной $t_n = 20^\circ\text{C}$.

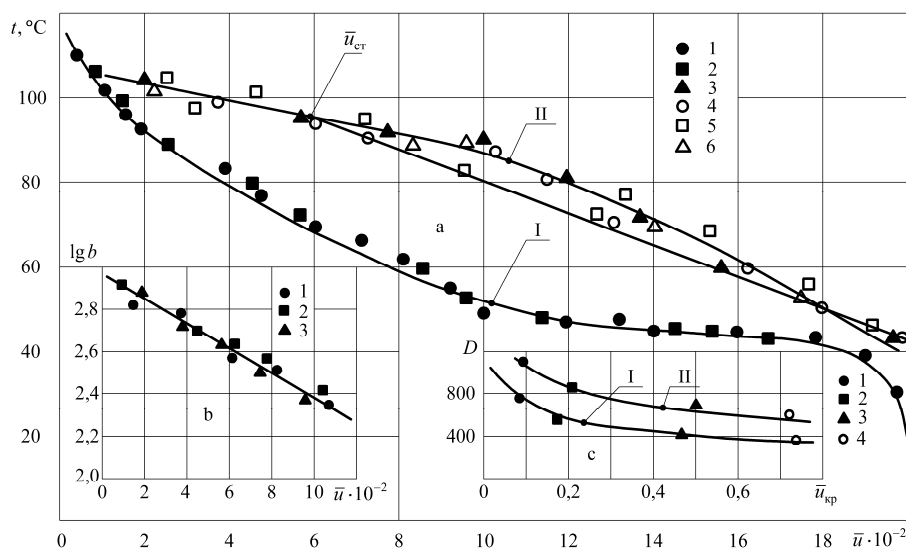


Рис. 1. Температурные кривые $\bar{t} = f(\bar{u})$ для процессов конвективной сушки тонкой керамической плитки (I), толстой плитки (II) при: $t_c = 120^\circ\text{C}$; $v = 5$ м/с; $\varphi = 5\%$; 1 – 5 мм; 2 – 10; 3 – 20; 4 – 30; 5 – 50 мм (а);

зависимость температурного коэффициента сушки $\lg b$ от влагосодержания $\bar{u}$ для керамической плитки при: 1 – $t_c = 90^\circ\text{C}$; 2 – 120°C ; 3 – 150°C , $v = 3; 5; 10$ м/с (b);

зависимость коэффициента D от критического влагосодержания $\bar{u}_{\text{кр}}$ при сушке:

1 – керамической плитки, 2 – асбеста, 3 – картона, 4 – войлока; I – $t_c = 90^\circ\text{C}$; II – 120°C (c)

Fig. 1. Temperature curves $\bar{t} = f(\bar{u})$ in the process of convective drying of thin ceramic tiles (I), thick tiles (II) for the drying mode: $t_c = 120^\circ\text{C}$, $v = 5$ м/с; $\varphi = 5\%$; 1 – 5 мм; 2 – 10 мм; 3 – 20 мм; 4 – 30 мм; 5 – 50 мм (a); dependence of the drying temperature coefficient $\lg b$ on the moisture content $\bar{u}$ in the process of drying ceramic tiles under drying modes: 1 – $t_c = 90^\circ\text{C}$, 2 – $t_c = 120^\circ\text{C}$, 3 – $t_c = 150^\circ\text{C}$, $v = 3; 5$ and 10 м/с (b); dependence of the coefficient D on the critical moisture content $\bar{u}_{\text{кр}}$ in formula (10) during drying: 1 – ceramic tiles, 2 – asbestos, 3 – cardboard, 4 – felt; I – $t_c = 90^\circ\text{C}$; II – $t_c = 120^\circ\text{C}$ (c)

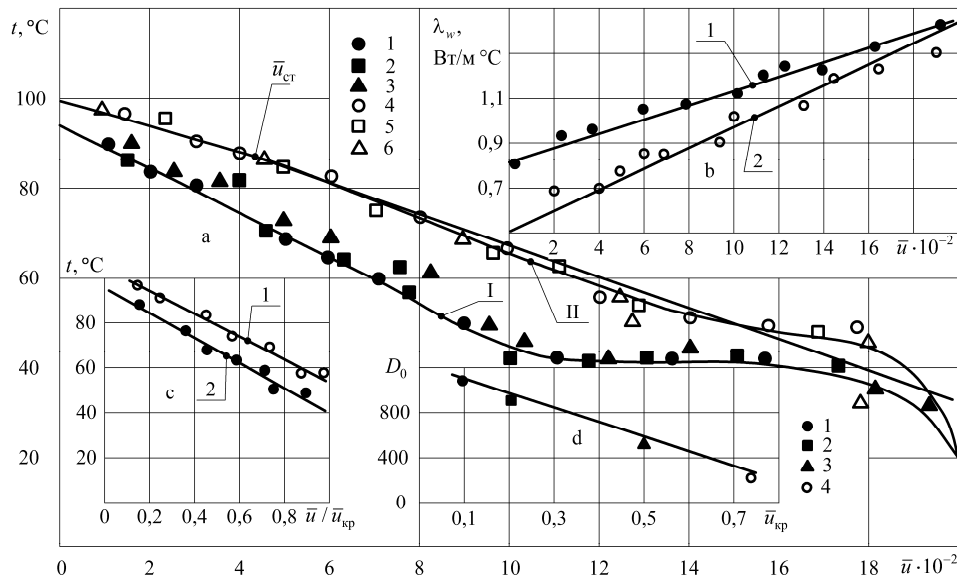


Рис. 2. Температурные кривые $\bar{t} = f(\bar{u})$ для конвективной сушки тонких (I) и толстых пластин (II) глины при: $t_c = 120^\circ\text{C}$; $v = 5\text{ м/с}$; $\varphi = 5\%$; 1 – 5 мм; 2 – 12; 3 – 15; 4 – 20; 5 – 30; 6 – 50 мм (а); зависимость коэффициента теплопроводности λ_w влажной керамики и красных глин от влагосодержания $\bar{u}$:

1 – керамика, 2 – красные глины (b); зависимость средней температуры $\bar{t}$ от относительного влагосодержания $\bar{u} / \bar{u}_{\text{кр}}$ для процессов сушки тонкой керамической плитки (1) и тонких пластин глин (2) для режима сушки $t_c = 120^\circ\text{C}$, $v = 5\text{ м/с}$ (c); зависимость коэффициента D_0 от критического влагосодержания $\bar{u}_{\text{кр}}$ для сушки: 1 – керамики, 2 – асбеста, 3 – картона, 4 – войлока (d)

Fig. 2. Temperature curves $\bar{t} = f(\bar{u})$ during convective drying of thin clay plates (I) and thick plates (II) of clay at: $t_c = 120^\circ\text{C}$, $v = 5\text{ м/с}$; $\varphi = 5\%$, 1 – 5 mm, 2 – 12 mm, 3 – 15 mm, 4 – 20 mm, 5 – 30 mm, 6 – 50 mm (a); dependence of the thermal conductivity coefficient λ_w of wet ceramics and red clays on the moisture content $\bar{u}$:

1 – ceramics, 2 – red clays (b); dependence of the average temperature $\bar{t}$ on the relative moisture content $\bar{u} / \bar{u}_{\text{кр}}$ for the drying processes of thin ceramic tiles (1) and thin clay plates (2) for the drying mode: $t_c = 120^\circ\text{C}$, $v = 5\text{ м/с}$ (c); dependence of the coefficient D_0 on the critical moisture content $\bar{u}_{\text{кр}}$ in formula (9) for drying: 1 – ceramics, 2 – asbestos, 3 – cardboard, 4 – felt (d)

Различный характер температурных кривых при сушке тонких и толстых образцов материала вызывает существенное различие в температурном коэффициенте сушки $b = d\bar{t} / d\bar{u}$, который определяется графическим дифференцированием кривых $\bar{t} = f(\bar{u})$ [2, 17]. При сушке тонких материалов на температурных кривых $\bar{t} = f(\bar{u})$ наблюдаются периоды постоянной скорости сушки и постоянной температуры $t_{\text{м.т.}}$. При сушке толстых образцов керамики и глины зависимость между $\bar{t}$ и $\bar{u}$ можно представить

приближенно двумя прямыми, сопряженными в точке перехода от первой зоны ко второй при влагосодержании стыковки зон $\bar{u}_{\text{ст}}$. Для линейных зон температурный коэффициент сушки b – величина постоянная ($b = d\bar{t} / d\bar{u} = \text{const}$).

Таким образом, необходимо выяснить наиболее общие признаки возможного деления материалов на тонкие и толстые при сушке, поскольку по величине только критерия Био такое деление невозможно. Необходимо выяснить, каким образом изменяется число Bi при изменении толщины материала.

Число Био вычислим по формуле:

$$Bi = \frac{\bar{\alpha}R}{\lambda_w}; \quad \frac{\bar{\alpha}\delta}{\lambda_w}.$$

За характерный определяющий размер влажного тела принимается толщина материала $\delta = 2R$, где R – половина толщины.

Коэффициент теплоотдачи $\bar{\alpha}$ при взаимодействии поверхности материала с окружающей средой t_c зависит от режима сушки. С увеличением температуры теплоносителя t_c и скорости его движения v коэффициент теплоотдачи $\bar{\alpha}$ возрастает.

Коэффициент теплоотдачи $\bar{\alpha}$ определяется по формуле для критерия Нуссельта

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

где $Nu = \frac{\bar{\alpha}l}{\lambda_{\text{воз}}}$ – число Нуссельта; $Re = \frac{vl}{\nu_{\text{воз}}}$ – число Рейнольдса; T_c , $T_{\text{м.т}}$ – абсолютные температуры среды и мокрого термометра; отношение $\left(\bar{u} / \bar{u}_{\text{кр}} \right)^n$ учитывает уменьшение $\bar{\alpha}$ в периоде падающей скорости сушки; l – длина образца материала по набеганию потока воздуха; $\lambda_{\text{воз}}$, $\nu_{\text{воз}}$ – коэффициенты теплопроводности и кинематической вязкости воздуха по таблицам.

Коэффициент n в уравнении (1) определяется экспериментально [1, 18–21]. Для процесса сушки керамики [1] $n = 0,73$, глины $n = 0,9$. Коэффициент $A = 0,75$ – для керамики, $A = 0,35$ – для глины. Коэффициент теплоотдачи вычисляется по соотношению $\bar{\alpha} = Nu \cdot \lambda_{\text{воз}} / l$.

Самое существенное влияние на величину Bi оказывает коэффициент теплопроводности влажного тела λ_w , который в сложной форме зависит от влагосодержания, температуры и вида материала – коэффициента теплопроводности сухого материала λ_0 [10–16].

Для установления зависимости коэффициента теплопроводности влажных глин от влагосодержания и температуры изучен ряд источников [10–16], и с возможной точностью установлены закономерности изменения коэффициента теплопроводности различных глин от влагосодержания и температуры. Для влажных силикатных, красных, белых, желтых, каолиновых глин установлено, что максимум в зависимости $\lambda_w = f(\bar{u})$ наблюдается приблизительно в области влагосодержания до $\bar{u} \approx 0,2$ [10, 13, 21, 22]. Причем в области влагосодержаний $\bar{u} = 0,02 - 0,2$ зависимость $\lambda_w = f(\bar{u})$ при температурах $t \approx 45 - 60$ °С близка к линейной.

Белые каолиновые глины в промышленности идут на изготовление фарфоровых, фаянсовых изделий, силикатные глины – на изготовление керамических изделий и плит. Для установления зависимости $\lambda_w = f(\bar{u})$ для глины и керамики по результатам исследования проведена обработка полученных данных на основе формулы В. И. Дубницкого [1, 10, 21] и получены расчетные уравнения. Для керамических влажных плиток, пластин глины и войлока:

$$\lambda_{\text{вл}} = \lambda_0 + A_1 \bar{t} \bar{u} \exp(-B_0 \bar{u}); \quad \lambda_{\text{вл}} \approx \lambda_0 + 2,7 \cdot 10^{-3} \bar{t} \bar{u} \exp(2\bar{u});$$

$$\lambda_{\text{вл}} \approx \lambda_0 + 0,026W,$$

где $A_1 \approx 0,075$; $B_0 = 2$; $\lambda_0 = 0,8$ Вт/м °С; W – влагосодержание, %; для влажных глин $A_1 = 0,135$; $B_0 = 2$.

На рис. 2б даны зависимости $\lambda_w = f(\bar{u})$ для керамики и глины.

Согласно экспериментальным данным В. П. Журавлевой [12], по сушке обожженной керамической плитки в области влагосодержания $\bar{u} = 0,02 - 0,18$ при температурах $t \approx 50 - 60$ °С коэффициент теплопроводности λ_w значительно выше, чем для влажной керамики. Обжиг материалов значительно увеличивает значения λ_w и особенно с повышением температуры и уменьшением влагосодержания [12, 13]. Табличные данные источников [10–16] дают значения для сухой керамической плитки и керамических изделий $\lambda_0 \approx 0,8 - 1,2$ Вт/м °С, а для обожженной плитки $\lambda_0 \approx 1,7 - 3,7$ Вт/м °С [12]. Но влияние влажности на λ_w выше, чем температуры [13–14].

Коэффициент теплопроводности λ_0 сухих красных (производство кирпича), силикатных (керамические изделия) и белых каолиновых (производство фаянса и фарфора) глин, по табличным данным, составляет $\lambda_0 \approx 0,5 - 0,85$ Вт/м °С [10, 12–15].

Критерии подобия тепломассообмена.

Температурный коэффициент сушки

Сушка тонких и толстых материалов показала различный характер изменения температурных кривых $\bar{t} = f(\bar{u})$ и существенное различие в значениях температурного коэффициента сушки $b = d\bar{t} / d\bar{u}$, который являет-

ся важной характеристикой ее кинетики [2, 17, 22]. Авторы [5, 23–25] для более полной оценки деления материалов на тонкие и толстые предложили использовать решения системы дифференциальных уравнений, которые устанавливают зависимость процесса сушки от большой группы критериев подобия тепломассопереноса [3, 4, 23, 24]. Для условий конвективной сушки для безразмерной температуры и температурного коэффициента сушки можно записать [3, 10, 17, 23]:

$$T = \frac{t_c - \bar{t}}{t_c - t_{м.т}} = f(Bi, Bi_m, Fo, Fo_m, Lu, Pn);$$

$$b = \frac{dT / dFo}{d\bar{U} / dFo} = f(Bi, Fo, Lu), \quad (2)$$

где $\bar{U} = \frac{\bar{u} - u_p}{\bar{u}_0 - u_p}$, Bi , Bi_m , Fo , Fo_m – тепло- и массообменные критерии

Био и Фурье; Lu , Pn – критерии Лыкова и Поснова.

В случае сушки тонких материалов отмечаются периоды ее постоянной скорости и постоянной температуры на уровне $t_{м.т}$. При значениях теплообменного числа $Bi < 1$ происходит быстрое выравнивание температур по поверхности и объему и тепловлагообмен происходит с поверхности материала [7, 8].

При сушке толстых материалов критическое влагосодержание $\bar{u}_{кр}$ отмечается только на кривых сушки [2, 17]. Температура возрастает сразу от начальной t_n .

Эксперименты по сушке тонких и толстых образцов керамики и пластин глины при режимах сушки $t_c = 90–150$ °С показали, что для тонких образцов керамики и глины перепады температур внутри тела $t_n - t_c$ составляли для керамики $\Delta t = 4–5$ °С, для глины $\Delta t = 2–3$ °С. Для толстых образцов ($\delta = 30; 50$ мм): $\Delta t = 10–15$ °С – для керамики; $\Delta t = 10–12$ °С – для глины [2, 17].

Возникающие градиенты влагосодержания и температуры в теле направлены противоположно и препятствуют переносу влаги к поверхности материала [1, 4, 5].

Термовлагопроводность (термодиффузия) определяется критерием Поснова

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

где $\Delta t = t_n - t_c$; δ_T – термоградиентный коэффициент; $\Delta u = \bar{u}$ – влагосодержание, соответствующее Δt .

Критерий Поснова влияет только на массоперенос [2, 3, 5, 23, 24]. Для тонких материалов с малыми перепадами температур $Pn \rightarrow 0$. С уве-

личением градиента температуры в толстых материалах Pn увеличивается. Для силикатных, красных, белых каолиновых глин критерий Поснова изменяется в пределах $Pn \approx 0,07-0,14$ [5]. Большие значения соответствуют толстым глинам. На рис. 3а даны зависимости $Pn = f(\bar{u})$: кривая 1 – красные глины; 2 – белые глины. На рис. 3б кривая 5 – для красной глины толщиной $\delta = 50$ мм.

Сушка тонких материалов протекает при малых величинах чисел Био ($Bi < 1$) и очень незначительных значениях критерия Pn . При этом в тонких материалах влага к поверхности перемещается в виде жидкости и критерий фазового превращения $\varepsilon \approx 0$ и ε не влияет на температурный коэффициент сушки [5, 23, 24].

При сушке толстых образцов пластин глин ($\delta = 30; 50$ мм) влага через границу зоны углубления к поверхности перемещается преимущественно в виде пара $\varepsilon = 0,75$ [5, 17]. Существенное влияние на тепломассоперенос оказывает критерий $Lu = a_m/a$ (где a_m и a – коэффициенты диффузии массы и теплоты).

При малых значениях Lu перенос температуры происходит значительно быстрее, чем влагосодержания [5, 17], и критерий Lu оказывает основное воздействие на теплоперенос, температурный коэффициент сушки увеличивается с уменьшением Lu .

Анализ источников позволяет приближенно указать границы изменения Lu [5]. Для красных глин $Lu = 0,04-0,13$, для белых $Lu = 0,05-0,23$. При сушке керамики отмечаются очень низкие значения $Lu = (0,1-0,17) \times 10^{-2}$ [12] и очень высокие коэффициенты теплопроводности (при $\bar{u} = 0,02-0,18$) $\lambda_0 \approx 1,7-3,7$ Вт/м °С, большие значения характерны для обожженной керамики).

На рис. 3а даны зависимости критерия Поснова Pn от влагосодержания $\bar{u}$ для процесса сушки красных глин (1), белых каолиновых глин (2) и зависимость критерия Лыкова Lu от влагосодержания $\bar{u}$ для белых глин (3). На рис. 3б даны зависимости критерия Lu от влагосодержания $\bar{u}$ для пористой керамики (4) и критерия Поснова Pn от влагосодержания $\bar{u}$ при сушке толстой пластины глины $\delta = 50$ мм (5). Из всей группы критериев подобия в основу классификации процесса конвективной сушки положены числа Bi , Bi_m , Fo , Fo_m и число Lu , которые являются количественными факторами, характеризующими задачу переноса теплоты и влаги [3, 5, 23–25]. По величине критерия Lu все материалы разбиты на три группы: 1 – $Lu = 0,1-0,5$; 2 – $Lu = 0,02-0,12$; 3 – $Lu = 0,05-0,2$ [5, 23]. Недостаток классификации материалов по Bi , Bi_m и Lu заключается в том, что коэффициенты диффузии теплоты a и массы a_m зависят не только от температуры и влагосодержания, вида материала, но и от режима и метода сушки [5].

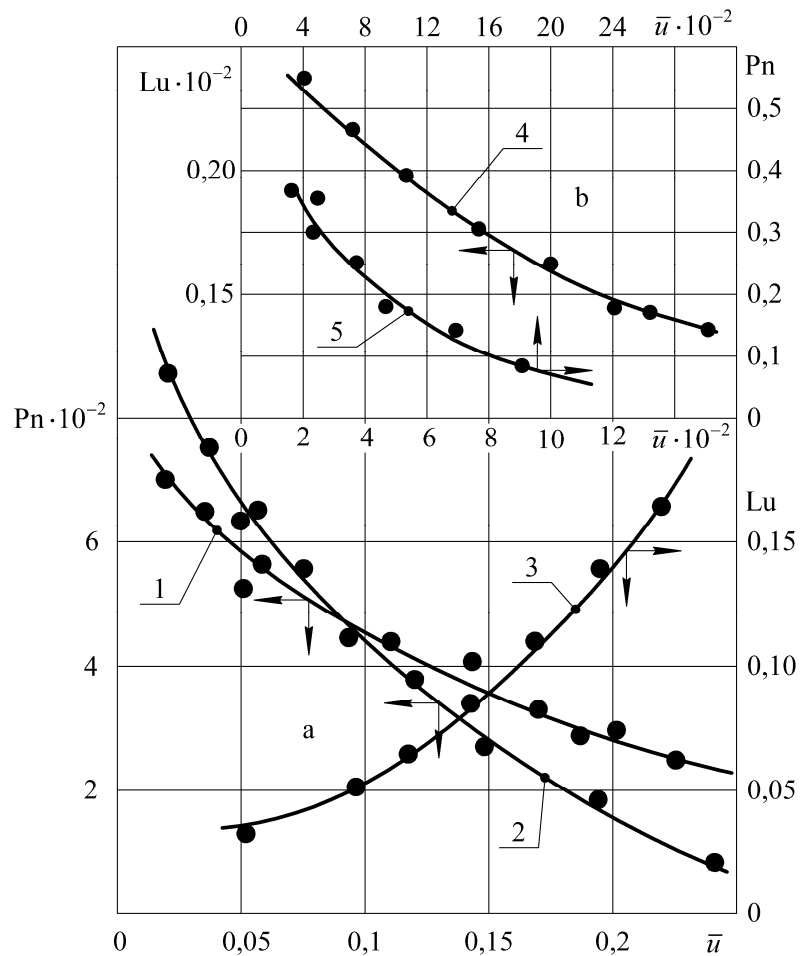


Рис. 3. Зависимость критерия Поснова Pn от влагосодержания $\bar{u}$ в процессах конвективной сушки красных глин (1), белых каолиновых глин (2) и зависимость критерия Лыкова Lu от влагосодержания $\bar{u}$ в процессе сушки каолиновых глин (3) (a); зависимость критерия Лыкова Lu от влагосодержания $\bar{u}$ для пористой керамики (4) и зависимость критерия Поснова Pn от влагосодержания $\bar{u}$ в процессе сушки толстой пластины глины $\delta = 50$ мм (5) (b)

Fig. 3. Dependence of Posnov's criterion Pn on moisture content $\bar{u}$ in the process of convective drying of red clays (1), white kaolin clays (2) and dependence of Lykov's criterion Lu on moisture content $\bar{u}$ in the process of drying kaolin clays (3) (a); dependence of Lykov's criterion Lu on moisture content $\bar{u}$ for porous ceramics (4) and dependence of Posnov's criterion Pn on moisture content $\bar{u}$ in the process of drying a thick clay plate $\delta = 50$ mm (5) (b)

Рассматривая процесс сушки как тепломассообменный процесс, выделяют следующие задачи [5].

1. При значениях чисел $Bi, Bi_m < 0,5$ скорость сушки не зависит от внутреннего сопротивления переносу ($Pn \approx 0$), а определяется внешними условиями теплообмена (внешняя задача) [4, 5, 9].

2. При значениях чисел $0,5 < Bi, Bi_m < 50$ сушка протекает в условиях, характерных для смешанной задачи, когда сопротивление переносу влаги внутри и внешнее сопротивление при удалении влаги с поверхности примерно одинаковы [4, 5, 9]. Критерий $Pn > 0$ [3, 5, 23].

3. При больших значениях чисел Био, когда $Bi, Bi_m > 50$, главными являются условия массообмена внутри тела и режим сушки (внутренняя задача). Диффузионное сопротивление переносу влаги внутри влажного тела значительно больше сопротивления при удалении влаги с поверхности материала. Значительную роль в переносе влаги к поверхности играет термодиффузия. Критерий $Pn \approx 0,2 - 0,5$ (рис. 3b, кривая 5).

Сушка толстых материалов.

Кинетика сушки. Вывод уравнений

Основное уравнение кинетики сушки А. В. Лыкова имеет вид [1, 4, 5]

$$\frac{q_{II}}{q_I} = N^* \left(1 + \frac{c_w}{r} \cdot \frac{d\bar{t}}{d\bar{u}} \right), \quad (3)$$

где q_I, q_{II} – плотности потока теплоты в первом и втором периодах сушки; N^* – относительная скорость сушки; c_w – удельная теплоемкость влажного тела; r – теплота парообразования; $d\bar{t} / d\bar{u}$ – температурный коэффициент сушки,

$$b = \frac{d\bar{t}}{d\bar{u}}; \quad (4)$$

комплекс $\frac{c_w b}{r} = Rb$ – число Ребиндера.

В расчеты по кинетике сушки А. И. Лыковым была введена безразмерная величина – относительный температурный коэффициент сушки

$$B = b \frac{\Delta\bar{u}}{\Delta T} = f(\bar{u}). \quad (5)$$

В качестве определяющих параметров в расчетах средней температуры удобно принимать: $\Delta\bar{u} = \bar{u}_{кр}$; $\Delta T = T_c$, где $\bar{u}_{кр}$ – критическое влагосодержание; T_c – абсолютная температура среды.

Запишем выражения (4) и (5) [19, 26, 28] в виде:

$$\frac{\bar{t}}{T_c} = \int \frac{B(\bar{u})}{\bar{u}_{кр}} d\bar{u} + C_1; \quad (6)$$

$$\bar{t} = \int b(\bar{u}) d\bar{u} + C_2. \quad (7)$$

Произвольная постоянная C_1 выбирается в зависимости от температуры среды T_c , произвольная постоянная C_2 – в зависимости от температуры $t_{м.т}$ и T_c на границе перехода первого периода сушки во второй.

Для многих влажных материалов зависимости для $Rb = f(\bar{u})$; $B = f(\bar{u})$ и температурного коэффициента сушки $b = f(\bar{u})$ выражаются эмпирическими формулами [1, 4, 5, 18]:

$$\begin{aligned} Rb &= A \exp[-n_0(\bar{u} - u_p)]; \\ B &= a \exp[-m(\bar{u} - u_p)]; \\ b &= D \exp[-m_0(\bar{u} - u_p)]. \end{aligned} \quad (8)$$

Для определения средней температуры воспользуемся более простым уравнением (8) [26].

Значения коэффициентов в формулах находятся опытным путем. Подставляя в (7) уравнение (8) и интегрируя в пределах $t_{м.т}$, t_c и влагосодержаний, получим [19, 26, 28]:

$$\bar{t} = t_{м.т} + \frac{D_0}{m_0} \exp[-m_0(\bar{u} - u_p)]; \quad (9)$$

$$\bar{t} = t_c - \frac{D}{m} [1 - \exp[-m(\bar{u} - u_p)]]; \quad (10)$$

Обработкой экспериментальных данных по сушке керамики, листового асбеста, шерстяного войлока, пластин глины получены уравнения для коэффициентов D_0 и D в формулах (9) и (10):

$$D_0 \approx 10^3 (1,1 - 1,15 \bar{u}_{кр});$$

$$D \approx \frac{t_c}{0,115 + 0,15 \bar{u}_{кр}}.$$

Значения коэффициентов m и m_0 в формулах (9) и (10) даны в табл. 1.

Результаты обработки опытных данных для зависимостей коэффициентов $D_0 = f(\bar{u}_{кр})$ и $D = f(\bar{u}_{кр})$ даны на рис. 1с и 2д. Кривые на рис. 1с представляют собой ветви гиперболы.

Таблица 1

Значения постоянных в расчетных уравнениях по сушке керамики и глины

Values of constants in calculation equations for drying ceramics and clay

Материал и режим сушки	m_0	m	m_1	m_2	b_1	b_{II}	A	n
Тонкая керамика: $\delta = 5-10$ мм; $t_c = 120$ °C; $v = 5-10$ м/с	16	8	0,7	–	–	–	0,75	0,73
Тонкая керамика: $\delta = 5-10$ мм; $t_c = 120$ °C; $v = 5-10$ м/с	–	19	–	1,1	460	280	0,75	0,73
Тонкие пластины глины: $\delta = 12-15$ мм; $t_c = 90-120$ °C; $v = 5$ м/с	18	5	0,9	–	–	–	0,45	0,9
Толстая глина: $\delta = 20-50$ мм; $t_c = 90-120$ °C; $v = 3-5$ м/с	–	17	–	0,9	450	310	0,45	0,9

Толстые материалы.

Зональный метод расчета средней температуры

Сушка толстых материалов протекает без периода постоянной температуры. Температура повышается с начала сушки от $\bar{u}_0$ от начальной $t_n = 20$ °C. Критическое влагосодержание $\bar{u}_{кр}$ отмечается только на кривых сушки $\bar{u} = f(\tau)$. Для расчета средней температуры для процесса сушки толстых материалов воспользуемся зональным методом расчета [1, 4, 26]. На рис. 1а, 2а (кривые II) даны температурные кривые $\bar{t} = f(\bar{u})$ для сушки толстых образцов керамики и глины ($\delta = 20, 30$ и 50 мм). Для избежания стока влаги с торцов поверхности влагоизолировались. Заменяем плавные кривые $\bar{t} = f(\bar{u})$ ломаными прямыми, образуются две зоны, в каждой из которых зависимость между $\bar{t}$ и $\bar{u}$ принимается линейной (рис. 1а, рис. 2а).

Тогда температурный коэффициент сушки для каждой зоны $b = d\bar{t}/d\bar{u} = \text{const}$. Для каждой зоны

$$d\bar{t} = -b d\bar{u}. \quad (11)$$

Интегрируя, получим

$$\Delta\bar{t} = -b(\Delta\bar{u}). \quad (12)$$

Для первой зоны $\bar{u}_{ст} < \bar{u} < \bar{u}_0$, где $\bar{u}_{ст}$ – влагосодержание при стыке зон. При $\bar{u} = \bar{u}_0$ $t = t_n = 20$ °C. Для первой зоны получим

$$t_1 = t_n + b_1(\bar{u}_0 - \bar{u}), \quad (13)$$

где b_1 – средний температурный коэффициент сушки в первой зоне. Для второй зоны при $\bar{u} = \bar{u}_p$ $t \rightarrow t_c$.

Тогда получим для второй зоны

$$t = t_c - b_2(\bar{u} - u_p). \quad (14)$$

Следовательно, для определения средней температуры необходимо графическим дифференцированием кривых $\bar{t} = f(\bar{u})$ определить температурные коэффициенты сушки b_1 и b_2 для двух зон.

Граница перехода одной зоны в другую через влагосодержание стыковки зон $\bar{u}_{\text{ст}}$ определяется по формуле

$$\bar{u}_{\text{ст}} \approx \frac{1}{b_1 + b_2} (t_c - b_1 \bar{u}_0 + b_2 u_p).$$

А. В. Лыковым решено дифференциальное уравнение нестационарной теплопроводности для влажной пластины для периода падающей скорости сушки при введении в граничные условия уравнения скорости сушки [29]

$$\left| \frac{d\bar{u}}{d\tau} \right| = K(\bar{u} - u_p), \quad (15)$$

где коэффициент сушки $K = N / (\bar{u}_{\text{кр}} - u_p)$; N – скорость сушки в первом периоде, являющаяся экспоненциальной функцией времени [1, 3, 4]. Из уравнения (15) получим

$$\frac{\bar{u} - u_p}{\bar{u}_{\text{кр}} - u_p} = \exp(-K\tau). \quad (16)$$

Граничные условия $\frac{\rho r R}{\lambda_w} \cdot \frac{d\bar{u}}{d\tau}$ запишем с учетом (15), (16)

$$\frac{\rho R N r}{\lambda_w} \exp(-K\tau) = \frac{j r}{\lambda_w} \exp(-K\tau), \quad (17)$$

где $j = \rho R N$ – интенсивность сушки ($\text{кг/м}^2 \text{ с}$).

В результате решения дифференциального уравнения с граничными условиями (17) получено уравнение для относительной температуры [16]

$$T^* = \frac{t_c - \bar{t}}{t_c - t_{\text{м.т.}}}. \quad (18)$$

В процессах конвективной сушки температура изменяется с одновременным изменением влагосодержания. Запишем

$$\frac{t_c - \bar{t}}{t_c - t_{\text{м.т.}}} = f\left(\frac{\bar{u}}{\bar{u}_{\text{кр}}}\right). \quad (19)$$

Обработка опытных данных по сушке ряда влажных материалов показала, что средняя температура в периоде падающей скорости хорошо описывается зависимостью (19) [28]

$$\bar{t} = t_c - (t_c - t_{\text{м.т.}}) \left(\frac{\bar{u}}{\bar{u}_{\text{кр}}} \right)^{m_1} \quad (20)$$

Для толстых материалов уравнение имеет вид

$$\bar{t} = t_c - (t_c - t_{\text{н}}) \left(\frac{\bar{u}}{\bar{u}_0} \right)^{m_2} \quad (21)$$

Результаты расчетов основных параметров сушки, критериев подобия тепломассообмена и расчеты средней температуры в процессах сушки керамики и глин и сопоставление значений с экспериментальными данными даны в табл. 2–5. Сравнение расчетных значений температур по формулам с опытными данными показало достаточно хорошее совпадение в пределах погрешности эксперимента.

Таблица 2

Значения критериев подобия и коэффициентов тепло- и массообмена в процессе конвективной сушки тонких керамических плиток

Values of similarity criteria and heat and mass transfer coefficients in the process of convective drying of thin ceramic tiles

Тонкая керамическая плитка $120 \times 80 \times 5$ мм; $\rho_0 = 1860$ кг/м ³ ; $\lambda_0 = 0,8$ Вт/(м·°C); $\bar{u}_0 = 0,2$; $\bar{u}_{\text{кр}} = 0,1$; $u_p = 0$; $N = 0,022$ мин ⁻¹ ; $t_{\text{м.т.}} = 46$ °C. Режим тепловой обработки: $t_c = 120$ °C; $v = 5$ м/с; $\varphi = 5$ %								
$\bar{u}$	λ_w , Вт/(м·°C)	$\bar{\alpha}$, Вт/(м ² ·°C)	Bi	$\bar{\alpha}_m$, кг/ч °М	λ_m , кг/м ч °М	$\text{Bi}_m = \bar{\alpha}_m R / \lambda_m$	$\text{Lu} \cdot 10^{-2}$	$\text{Pn} \cdot 10^{-2}$
0,08	1,11	47	0,105	26,4	0,235	0,27	0,18	6,0
0,06	1,05	39	0,093	20,2	0,221	0,21	0,19	7,0
0,04	0,98	30	0,076	16,4	0,198	0,18	0,22	8,0
0,02	0,89	22	0,062	14,5	0,185	0,16	0,24	8,5
Примечания: $\bar{\alpha}$ – коэффициент теплоотдачи, Вт/м ² °C; $\bar{\alpha}_m$ – то же массоотдачи, кг/(ч·°М); °М – водяной градус; λ_m – коэффициент влагопроводности, кг/(м·ч·°М); Bi_m – массообменное число Био, $\bar{\alpha}_m R / \lambda_m$; R – половина толщины пластины.								

Таблица 3

Расчетные значения коэффициента теплоотдачи, коэффициента теплопроводности, числа Био и сопоставление расчетных значений температур с экспериментом в процессе сушки обожженной и влажной тонкой пластины керамики

Calculated values of heat transfer coefficient, thermal conductivity coefficient, Biot number, and comparison of calculated temperature values with experiment in the process of drying fired and wet thin ceramic plate

Обожженная керамическая плитка $120 \times 80 \times 5$ мм; $\rho_0 = 1860$ кг/м ³ ; $\lambda_0 = 1,5$ Вт/(м·°C); $\bar{u}_0 = 0,2$; $\bar{u}_{\text{кр}} = 0,11$; $u_p = 0$; $t_{\text{м.т.}} = 46$ °C. Режим сушки: $t_c = 120$ °C; $v = 5$ м/с; $\varphi = 5$ %								
$\bar{u}$	$\bar{\alpha}$, Вт/(м ² ·°C)	λ_w , Вт/(м·°C)	$\text{Bi} = \bar{\alpha} R / \lambda_w$	$\text{Bi} = \bar{\alpha} \delta / \lambda_w$	$\bar{t}$, °C экс	$\bar{t}$, °C (9)	$\bar{t}$, °C (10)	$\bar{t}$, °C (20)
0,1	52,0	1,85	0,067	0,15	53	54,6	53,5	52
0,08	47,4	1,78	0,068	0,14	60	60,8	59,5	62

Окончание табл. 3

End of Table 3

$\bar{u}$	$\bar{\alpha},$ Вт/(м ² ·°C)	$\lambda_w,$ Вт/(м·°C)	$Bi = \bar{\alpha}R / \lambda_w$	$Bi = \bar{\alpha}\delta / \lambda_w$	$\bar{t},$ °C экс	$\bar{t},$ °C (9)	$\bar{t},$ °C (10)	$\bar{t},$ °C (20)
0,06	39,6	1,67	0,059	0,12	70	71,7	69,6	70
0,04	31,2	1,61	0,052	0,11	81	79,2	83,4	83
0,02	19,6	1,56	0,034	0,08	92	89,8	95,0	95
Влажная керамическая плитка 120×80×5 мм; $\rho_0 = 1860$ кг/м ³ ; $\lambda_0 = 0,8$ Вт/м °C; $\bar{u}_0 = 0,24$; $\bar{u}_{кр} = 0,14$; $u_p = 0$; $t_{м.т} = 48$ °C. Режим сушки: $t_c = 120$ °C; $v = 5$ м/с; $\varphi = 5$ %								
0,1	48,5	1,15	0,19	0,51	61	60,2	61,0	63,2
0,08	38,6	0,98	0,18	0,46	65	63,5	68,2	65,0
0,06	34,5	0,87	0,18	0,45	73	71,5	73,4	71,5
0,04	26,3	0,81	0,15	0,40	82	80,5	84,5	83,5
0,02	19,7	0,62	0,13	0,36	102	99	102	101

Таблица 4

Расчетные значения коэффициента теплоотдачи, коэффициента теплопроводности, числа Био и сравнение расчетных значений средних температур с экспериментом в процессе сушки толстых образцов керамики

Calculated values of heat transfer coefficient, thermal conductivity coefficient, Biot number and comparison of calculated values of average temperatures with experiment in the process of drying thick ceramic samples

Керамическая плитка 130×110×30 мм; $\rho_0 = 1860$ кг/м ³ ; $\lambda_0 = 0,8$ Вт/(м·°C); $\bar{u}_0 = 0,23$; $\bar{u}_{кр} = 0,165$; $t_n = 20$ °C. Режим сушки: $t_c = 120$ °C; $v = 5$ м/с; $\varphi = 5$ %								
$\bar{u}$	$\bar{\alpha},$ Вт/(м ² ·°C)	$\lambda_w,$ Вт/(м·°C)	$Bi = \bar{\alpha}R / \lambda_w$	$Bi = \bar{\alpha}\delta / \lambda_w$	$\bar{t},$ °C экс	$\bar{t},$ °C (10)	$\bar{t},$ °C (13)	$\bar{t},$ °C (21)
0,10	57	1,21	0,70	1,45	84	82,5	82,5	85
0,06	36	1,10	0,52	1,16	96	94,5	97,5	97
0,03	23	0,92	0,42	0,94	103	104,0	106	106
0,02	17	0,86	0,35	0,78	107	108,0	110	109
Керамическая плитка 130×110×50 мм; $\rho_0 = 1880$ кг/м ³ ; $\lambda_0 = 0,5$ Вт/(м·°C); $\bar{u}_0 = 0,24$; $\bar{u}_{кр} = 0,17$; $u_p = 0$; $t_n = 20$ °C. Режим сушки: $t_c = 120$ °C; $v = 5$ м/с; $\varphi = 5$ %								
0,10	47,5	1,15	1,02	2,10	85	85,5	86,0	83
0,08	39,6	1,12	0,93	1,83	90	88,5	87,5	88
0,06	30,5	1,05	0,84	1,50	96	97,5	98,5	97
0,04	24,4	0,94	0,68	1,34	102	105	104	101
0,02	19,6	0,87	0,60	1,16	108	110	110	112

Таблица 5

Расчетные значения коэффициента теплоотдачи, коэффициента теплопроводности, числа Био и сравнение расчетных значений температуры с экспериментом в процессе сушки тонких и толстых пластин глин
Calculated values of heat transfer coefficient, thermal conductivity coefficient, Biot number and comparison of calculated temperature values with experiment in the process of drying thin and thick clay plates

Пластина глины 135×110×12 мм; $\rho_0 = 1960 \text{ кг/м}^3$; $\lambda_0 = 0,5 \text{ Вт/(м}^\circ\text{C)}$; $\bar{u}_0 = 0,20$; $\bar{u}_{\text{кр}} = 0,11$; $u_p = 0$; $t_{\text{м.т.}} = 42^\circ\text{C}$. Режим сушки: $t_c = 120^\circ\text{C}$; $v = 5 \text{ м/с}$; $\varphi = 5\%$								
$\bar{u}$	$\bar{\alpha}, \text{ Вт/(м}^2\cdot^\circ\text{C)}$	$\lambda_w, \text{ Вт/(м}^\circ\text{C)}$	$\text{Bi} = \bar{\alpha}R / \lambda_w$	$\text{Bi} = \bar{\alpha}\delta / \lambda_w$	$\bar{t}, ^\circ\text{C}$ экс	$\bar{t}, ^\circ\text{C}$ (9)	$\bar{t}, ^\circ\text{C}$ (10)	$\bar{t}, ^\circ\text{C}$ (20)
0,10	18,6	1,15	0,095	0,24	58	57	56	58
0,06	14,7	0,95	0,087	0,20	68	70	69	69
0,04	11,4	0,86	0,082	0,15	79	82	81	75
0,02	8,7	0,65	0,058	0,13	88	87	91	87
Пластина глины 130×110×30 мм; $\rho_0 = 1900 \text{ кг/м}^3$; $\lambda_0 = 0,5 \text{ Вт/(м}^\circ\text{C)}$; $\bar{u}_0 = 0,20$; $\bar{u}_{\text{кр}} = 0,12$; $u_p = 0$; $t_n = 20^\circ\text{C}$. Режим сушки: $t_c = 120^\circ\text{C}$; $v = 5 \text{ м/с}$; $\varphi = 5\%$								
0,10	22,6	1,11	0,35	0,91	65	62	61	64
0,08	17,8	0,96	0,28	0,75	75	75	74	74
0,06	13,6	0,85	0,24	0,66	82	83	82	83
0,04	9,8	0,76	0,20	0,42	92	94	91	94
0,02	6,5	0,66	0,14	0,37	100	98	102	102
Пластина глины 130×100×50 мм; $\rho_0 = 1950 \text{ кг/м}^3$; $\lambda_0 = 0,55 \text{ Вт/(м}^\circ\text{C)}$; $\bar{u}_0 = 0,20$; $\bar{u}_{\text{кр}} = 0,17$; $t_n = 20^\circ\text{C}$. Режим сушки: $t_c = 120^\circ\text{C}$; $v = 5 \text{ м/с}$; $\varphi = 5\%$								
0,14	30,5	1,15	0,65	1,54	45	42	45	44
0,10	22,6	0,97	0,58	1,18	63	61	62	60
0,08	17,7	0,92	0,49	1,14	70	68	72	68
0,06	12,5	0,75	0,41	0,86	80	79	79	78
0,04	9,6	0,70	0,34	0,69	88	90	88	87
0,02	5,8	0,57	0,27	0,54	98	100	97	100

ВЫВОДЫ

1. Деления материалов на тонкие и толстые в процессе сушки по числу Био недостаточно, поскольку величина Био зависит от многих факторов.
2. Рассмотрены влияние критериев подобия тепломассообмена на температурный коэффициент сушки и зависимость чисел Био от температурного коэффициента сушки.
3. Изложен комплексный метод деления материалов по величинам чисел Био и критерия Лыкова на четыре группы.
4. Представлены расчеты средней температуры в процессе сушки тонких и толстых материалов по полученным формулам.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лыков, А. В. Теория сушки / А. В. Лыков. М.: Энергия, 1968. 472 с.
2. Ольшанский, А. И. Исследование процесса конвективной сушки тонких и толстых влажных материалов / А. И. Ольшанский, В. И. Ольшанский // Весці Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. 2012. Т. 57. № 4. С. 78–88.
3. Лыков, А. В. Теория тепло- и массопереноса / А. В. Лыков, Ю. А. Михайлов. М.–Л.: Госэнергоиздат, 1963. 535 с.
4. Акулич, П. В. Расчеты сушильных и теплообменных установок / П. В. Акулич. Минск: Беларус. наука, 2010. 443 с.
5. Сажин, Б. С. Научные основы техники сушки / Б. С. Сажин. М.: Наука, 1997. 447 с.
6. Лыков, А. В. Тепло- и массообмен в процессах сушки / А. В. Лыков. М.: Госэнергоиздат, 1956. 464 с.
7. 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.
8. Рабинович, Г. Д. Новый метод расчета конвективной сушки тонких материалов / Г. Д. Рабинович // Инженерно-физический журнал. 1966. Т. 11, № 2. С. 182–192.
9. Рудобашта, С. П. Массоперенос в системах с твердой фазой / С. П. Рудобашта. М.: Химия, 1980. 248 с.
10. Лыков, А. В. Теоретические основы строительной теплофизики / А. В. Лыков. Минск: Изд-во Академии наук БССР, 1961. 519 с.
11. Лыков, А. В. Явления переноса в капиллярно-пористых телах / А. В. Лыков. М.: Гостехиздат, 1954. 296 с.
12. Журавлева, В. П. Массоперенос при термообработке и сушке капиллярнопористых строительных материалов / В. П. Журавлева. Минск: Наука и техника, 1972. 189 с.
13. Франчук, А. У. Таблицы теплотехнических показателей строительных материалов / А. У. Франчук. М.: НИИ строительной физики, 1969. 142 с.
14. Блази, В. Строительная физика: справ. проектировщика / В. Блази. М.: Техносфера, 2005. 536 с.
15. Григорьев, И. С. Физические величины: справочник / И. С. Григорьев, Е. З. Мейлихов. М.: Энергоатомиздат, 1991. 1232 с.
16. Лыков, А. В. Тепло-массообмен: справ. / А. В. Лыков. М.: Энергия, 1972. 552 с.
17. Куц, П. С. Зависимость температурного коэффициента сушки от критериев подобия тепло- и массообмена при различных значениях теплообменного числа Био / П. С. Куц, А. И. Ольшанский, Е. Л. Бром // Инженерно-физический журнал. 1977. Т. 33, № 1. С. 836–840.
18. 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.
19. 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>.
20. Ольшанский, А. И. Исследование кинетики тепловлагообмена при термической обработке и сушке тонких влажных теплоизоляционных материалов / А. И. Ольшанский, А. Н. Голубев // Энергетика. Изв. высш. 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>.
21. 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.
22. Ольшанский, А. И. Аналитический расчет температуры в процессе сушки тонких капиллярно-пористых плоских материалов / А. И. Ольшанский, С. В. Жерносек, А. М. Гу-

- саров // Весці Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. 2018. Т. 63, № 3. С. 333–341. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2018-63-3-333-341>.
23. Михайлов, Ю. А. Влияние критериев подобия на тепло- и массообмен при конвективной сушке / Ю. А. Михайлов // Известия Академии наук Латвийской ССР. 1957. № 6. С. 878–893
24. 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. С. 121–126.
25. 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.
26. Красников, В. В. Кондуктивная сушка / В. В. Красников. М.: Энергия, 1973. 288 с.
27. Васильев, В. Н. Технология сушки. Основы тепло- и массопереноса / В. Н. Васильев, В. Е. Куцакова, С. В. Фролов. Санкт-Петербург: ГИОРД, 2013. 224 с.
28. Ольшанский, А. И. Кинетика теплообмена и экспериментальные методы расчета температуры материала в процессе сушки / А. И. Ольшанский // Инженерно-физический журнал. 2013. Т. 86, №3. С. 584–594.
29. Лыков, А. В. Теория теплопроводности / А. В. Лыков. М.: Высш. шк., 1967. 600 с.

Поступила 14.11.2024 Подписана в печать 15.01.2025 Опубликовано онлайн 30.09.2025

REFERENCES

1. Lykov A. V. (1968) *Drying Theory*. Moscow, Energiya Publ. 472 (in Russian).
2. Olshanskii A. I., Olshanskii V. I. (2012) Study of the Process of Convective Drying of Thin and Thick Wet Materials. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-tekhnichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 57 (4), 78–88 (in Russian).
3. Lykov A. V., Mikhailov Yu. A. (1963) *Theory of Heat and Mass Transfer*. Moscow–Leningrad, Gosenergoizdat Publ. 535 (in Russian).
4. Akulich P. V. (2010) *Calculations of Drying and Heat Exchange Installations*. Minsk, Belaruskaya Navuka Publ. 443 (in Russian).
5. Sazhin B. S. (1997) *Scientific Fundamentals of Drying Technology*. Moscow, Nauka Publ. 447 (in Russian).
6. Lykov A. V. (1956) *Heat and Mass Transfer in Drying Processes*. Moscow, Gosenergoizdat Publ. 464 (in Russian).
7. Olshanskii A. I. (2016) Investigation of Drying of Thin Materials Using Generalized Complex Variables. *Inzhenerno-Fizichesky Zhurnal = Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 89 (4), 886–895. <https://doi.org/10.1007/s10891-016-1450-4>.
8. Rabinovich G. D. (1966). A New Method of Calculation of Convective Drying of thin Materials. *Journal of Engineering Physics*, 11(2), 98–104. <https://doi.org/10.1007/bf00831262>.
9. Rudobashta S. P. (1980) *Mass Transfer in Systems with Solid Phase*. Moscow, Khimiya Publ. 248 (in Russian).
10. Lykov A. V. (1961) *Theoretical Foundations of Construction Thermophysics*. Minsk: Publishing House of the Academy of Sciences of the BSSR. 519 (in Russian).
11. Lykov A. V. (1954) *Transfer Phenomena in Capillary-Porous Bodies*. Moscow, Gostekhizdat Publ. 296 (in Russian).
12. Zhuravleva V. P. (1972) *Mass Transfer During Heat Treatment and Drying of Capillary-Porous Construction Materials*. Minsk, Nauka i Tekhnika Publ. 189 (in Russian).
13. Franchuk A. U. (1969) *Tables of Thermal Performance Indicators of Construction Materials*. Moscow, Publishing House of Research Institute of Construction Physics. 142 (in Russian).
14. Blasi V. (2005) *Construction Physics. Designer's Handbook*. Moscow, Tekhnosfera Publ. 536 (in Russian).
15. Grigoriev I. S., Meilikhov E. Z. (1991) *Physical Quantities*. Moscow, Energoatomizdat Publ. 1232 (in Russian).

16. Lykov A. V. (1972) *Heat and Mass Transfer*. Moscow, Energiya Publ. 552 (in Russian).
17. Kuts P. S., Ol'shanskii A. I., Brom E. L. (1977) Dependence of the Temperature Coefficient of drying on the Heat- And Mass-Transfer Similarity Criteria for Various values of the Heat-Transfer Biot Number. *Journal of Engineering Physics*, 33 (1), 836–840. <https://doi.org/10.1007/bf00861427>.
18. 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 (6), 650–656. <https://doi.org/10.1007/bf00862568>
19. 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).
20. 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).
21. 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 (3), 665–678. <https://doi.org/10.1007/s10891-017-1614-x>.
22. Ol'shanskii A. I., Zhernosek S. V., Gusarov A. M. (2018) Calculation of the Kinetics of Heat Transfer Using the Experimental Data of Moisture Exchange in the Process of Convective Drying of Thin Flat Materials. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-Tekhnichnykh Navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 63 (3), 333–341. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2018-63-3-333-341> (in Russian).
23. Mikhailov Yu. A. (1957) Influence of Similarity Criteria on Heat and Mass Transfer During Convective Drying. *Izvestiya Akademii Nauk Latvyskoy SSR [Proceedings of the Academy of Sciences of the Latvian SSR]*, (6), 878–893 (in Russian).
24. Melnikova I. S. (1958) Determination of Some Criteria for the Transfer of Heat and Matter During Evaporation from Solids. *Heat and Mass Transfer in Evaporation Processes: Collection of Articles*. Moscow, Publishing House of USSR Academy of Sciences, 121–126 (in Russian).
25. Ol'shanskii 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 (1), 38–49. <https://doi.org/10.1007/s10891-016-1351-6>.
26. Krasnikov V. V. (1973) *Conductive Drying*. Moscow, Energiya Publ. 288 (in Russian).
27. Vasiliev V. N., Kutsakova V. E., Frolov S. V. (2013) *Drying Technology. Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. Saint Petersburg, GIOR Publ. 224 (in Russian).
28. Ol'shanskii A. I. (2013) Heat Transfer Kinetics and Experimental methods for Calculating the Material Temperature in the Drying Process. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 86 (3), 622–633. <https://doi.org/10.1007/s10891-013-0876-1>.
29. Lykov A. V. (1967) *Theory of Heat Transfer*. Moscow, Vysshaya Shkola Publ. 600 (in Russian).

Received: 14 November 2024 Accepted: 15 January 2025 Published online: 30 September 2025