

ISSN 1561-8358 (Print)
ISSN 2524-244X (Online)
УДК 66.047.37
<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2018-63-3-333-341>

Поступила в редакцию 30.03.2018
Received 30.03.2018

А. И. Ольшанский, С. В. Жерносек, А. М. Гусаров

Витебский государственный технологический университет, Витебск, Республика Беларусь

АНАЛИТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУРЫ В ПРОЦЕССЕ СУШКИ ТОНКИХ КАПИЛЛЯРНО-ПОРИСТЫХ ПЛОСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Аннотация. Приведен анализ решения дифференциальных уравнений нестационарной теплопроводности для неограниченной пластины при теплообмене ее поверхностей с окружающей средой по закону Ньютона при постоянной температуре среды. Для использования результатов решений уравнений в процессах сушки тонких плоских материалов проведено исследование зависимости коэффициентов переноса от температуры и влагосодержания. В результате изучения и анализа ряда литературных источников с высокой достоверностью установлены закономерности изменения коэффициентов теплопереноса в процессе сушки. Исследования сушки тонких влажных пластин из белых и красных глин с известными коэффициентами переноса показали, что при малых значениях теплообменного критерия Био и малых градиентах температур по сечению тонкого материала использование результатов решений уравнений теплопереноса дает вполне удовлетворительное совпадение расчетных и экспериментальных значений температур и длительности сушки. Установлено, что при малых числах Био главным фактором является внешний теплообмен поверхности материала с окружающей средой и скорость сушки слабо зависит от внутреннего теплопереноса. Показано, что использование численных методов решения дифференциальных уравнений возможно с разной степенью приближенности только при точных и достоверных зависимостях коэффициентов переноса от влагосодержания и температуры. Для ряда материалов с известными коэффициентами переноса использование в расчетах аналитических методов представляет значительный интерес и сближает теорию с практикой сушки.

Ключевые слова: влагосодержание, коэффициент теплопроводности, коэффициент теплообмена, критерий Био, критерий Фурье

Для цитирования. Ольшанский, А. И. Аналитический расчет температуры в процессе сушки тонких капиллярно-пористых плоских материалов / А. И. Ольшанский, С. В. Жерносек, А. М. Гусаров // Вест. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – Т. 63, № 3. – С. 333–341. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2018-63-3-333-341>

A. I. Ol'shanskii, S. V. Zhernosek, A. M. Gusarov

Vitebsk State Technological University, Vitebsk, Belarus

CALCULATION OF THE KINETICS OF HEAT TRANSFER USING THE EXPERIMENTAL DATA OF MOISTURE EXCHANGE IN THE PROCESS OF CONVECTIVE DRYING OF THIN FLAT MATERIALS

Abstract. In the paper, the authors analyzed the solution of the differential equation of non-stationary heat conduction for an unbounded plate during the heat exchange of plate surfaces with the surrounding medium according to Newton's law at a constant temperature of the medium. To use the results of solving the equations in the drying of thin flat materials, the dependence of the heat transfer coefficients on temperature and moisture content was studied. As a result of studying and analyzing a number of literature sources, the regularities of the change in the heat transfer coefficients during drying are established with high reliability. Studies of drying of thin wet plates of white and red clays with known heat transfer coefficients have shown that for small values of the heat transfer criterion of the Bio and small temperature gradients over the section of a thin material, application of the results of solutions of the heat transfer equations gives completely satisfactory agreement between the calculated and experimental values of the temperatures and the duration of drying. It is established that for small Bio numbers, the main factor is the external heat and mass transfer of the surface of the material with the surrounding medium and the rate of drying depends little on internal mass transfer. It is shown that the use of numerical methods for solving differential equations is possible with varying degrees of approximation only for accurate and reliable dependences of heat and mass transfer coefficients on moisture content and temperature. For a number of materials with known heat transfer coefficients, the use of analytical methods in calculations is of considerable interest and brings the theory closer to the practice of drying.

Keywords: moisture content, thermal conductivity coefficient, heat transfer coefficient, Bio criterion, Fourier criterion

For citation. Ol'shanskii A. I., Zhernosek S. V., Gusarov A. M. Calculation of the kinetics of heat transfer using the experimental data of moisture exchange in the process of convective drying of thin flat materials. *Vesti Natsyonal'noi akademii nauk Belarusi. Seriya fizika-technichnykh nauk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2018, vol. 63, no. 3, pp. 333–341 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2018-63-3-333-341>

Введение. Температура материала в процессе термической обработки является одним из важных параметров, определяющим не только длительность процесса и энергозатраты, но и качество конечного продукта. Поэтому в процессе сушки при минимальной длительности процесса температура и время ее воздействия на материал должны обеспечивать необходимые технологические свойства. Значительное влияние на выбор рационального режима сушки оказывает также температура теплоносителя.

Основным препятствием для увеличения интенсивности влагообмена при сушке является ограниченная возможность увеличения температуры теплоносителя, поскольку повышенная температура, особенно при длительном процессе, может вызывать напряжения, разрушающие структуру материала. Поскольку температура теплоносителя определяет технологические свойства, длительность сушки, то необходим контроль температуры материала в конкретных условиях производства.

Постановка задачи. Существует много приближенных уравнений для расчета температуры материала в период убывающей скорости сушки, основанных на обобщении многочисленных опытных данных [1].

В связи с широким развитием компьютерной техники и численных методов решения систем дифференциальных уравнений стало возможным использование с различной приближенностью результатов аналитических решений уравнений теплопереноса для расчета длительности сушки и температуры материала. При этом основная проблема заключается в определении коэффициентов переноса и в достоверности применяемых значений с учетом их зависимости от влажностного содержания и температуры. Для ряда материалов с известными коэффициентами переноса является возможность для вычисления температуры материала использовать результаты численных решений уравнений теплопереноса А. В. Лыкова в процессах сушки [2, 3]. При этом в зависимости от сложности задачи следует учитывать и результаты экспериментальных исследований [3].

Методика эксперимента. Экспериментальные исследования проведены с использованием сушильной установки с конвективным подводом тепла к материалу от нагретого воздуха, которая имеет необходимую измерительную, регистрирующую и регулирующую аппаратуру. Экспериментальные образцы размещались в камере сушки на специальной подвесной этажерке, соединенной с электронными весами, посредством которых через равные промежутки времени измерялась масса образцов с непрерывной регистрацией температуры материала посредством электронного самописца. После окончания сушки образцы помещались в сушильный шкаф для определения массы абсолютно сухого материала. По данным изменения массы образцов материалов построены кривые сушки. По записи электронного самописца определялось изменение температуры материала и строились температурные кривые сушки.

Для изготовления экспериментальных образцов использованы белая и красная глины, взятые с предприятий города Минска по производству керамических изделий и кирпича. Образцы из керамического порошка и красной глины замешивались на воде, тесто в виде пластин различной толщины несколько суток выдерживалось под давлением в пресс-формах, и затем в эксикаторе проходило выравнивание влажности. Образцы толщиной более 5 мм по периметру теплоизолировались фольгой во избежание стока влаги с торцов.

Решения. Рассмотрим решение задачи на нагревание однородной бесконечной пластины толщиной $\delta/2$ в среде с постоянной температурой t_c по С. Н. Шорину [4]. Теплообмен поверхностей пластины с окружающей средой происходит по закону Ньютона. Начальное распределение температуры в пластине равномерное. Поскольку изменение температуры пластины по условию задачи происходит симметрично по обе стороны от плоскости симметрии, то начало координат помещается в середине пластины.

Решение дифференциального уравнения нестационарной теплопроводности при граничных условиях третьего рода для однородной бесконечной пластины приводится в виде [4]

$$\Theta_{\text{п}}(\tau) = \sum_{i=1}^n A_i \mu_i \cos \mu_i \exp(-\mu_i^2 Fo), \quad (1)$$

где A_i – тепловые амплитуды, μ_i – корни характеристического уравнения, Fo – критерий Фурье.

Решение дифференциального уравнения дает для корней μ_i характеристическое уравнение [4]

$$\mu_i \operatorname{tg} \mu_i = \operatorname{Bi}, \quad (2)$$

где Bi – теплообменный критерий Био.

Трансцендентное уравнение (2) имеет бесконечное множество корней μ_i , каждый из которых удовлетворяет граничному условию поставленной задачи [4]. Решается это уравнение путем подбора пяти первых корней уравнения (2) для различных значений критерия Био [4].

Решение является громоздким, однако в большинстве случаев оно упрощается, поскольку заметный вклад оказывают несколько первых корней, а при малых значениях критерия $\operatorname{Bi} \ll 1$ достаточно точное решение получается уже при первом корне μ_1 характеристического уравнения (2) [4]. Окончательное решение задачи при $\operatorname{Bi} \ll 1$ для избыточной относительной температуры на поверхности материала во втором периоде сушки при замене начальной температуры t_0 на $t_{\text{м.т.}}$ имеет вид [4, 5]

$$\Theta_{\text{п}} = \frac{t_{\text{с}} - t_{\text{п}}}{t_{\text{с}} - t_0} = \frac{t_{\text{с}} - t_{\text{п}}}{t - t_{\text{м.т.}}} = \left[\frac{2 \sin \mu_1}{\mu_1 + \sin \mu_1 \cos \mu_1} \right] \cos \mu_1 \exp(-\mu_1^2 \operatorname{Fo}), \quad (3)$$

где $t_{\text{м.т.}}$ – температура мокрого термометра; $t_{\text{с}}, t_{\text{п}}$ – соответственно температура среды и поверхности материала.

Температура на поверхности материала во втором периоде сушки при $x = \delta/2$ находится в результате решения уравнения (3), где первый корень μ_1 уравнения (2) по таблицам [2, 3, 6]. Более точно корень μ_1 рассчитывается для неограниченной пластины по формуле [2, 3, 6]

$$\mu_1 = 1,57 \sqrt{\frac{1}{1 + \frac{2,24}{\operatorname{Bi}^{1,02}}}}.$$

В результате решения дифференциального уравнения нестационарной теплопроводности для неограниченной однородной пластины при тех же условиях нагревания А. В. Лыковым [2] операционным методом получено уравнение, аналогичное уравнению (1), с той лишь разницей, что при решении использовалось иное характеристическое уравнение

$$\operatorname{ctg} \mu_i = \frac{1}{\operatorname{Bi}} \mu_i,$$

а тепловые амплитуды A_i в уравнении (1) А. В. Лыковым представлены в виде

$$A_i = \frac{2 \sin \mu_i}{\mu_i + \sin \mu_i \cos \mu_i}.$$

При $\operatorname{Bi} < 0,1$ можно пользоваться только одним первым корнем характеристического уравнения μ_1 и первую амплитуду представить как

$$A_1 = \frac{2 \sin \mu_1}{\mu_1 + \sin \mu_1 \cos \mu_1} = 1. \quad (4)$$

При значениях $\operatorname{Bi} < 0,1$ допустимо $\operatorname{tg} \mu_1$ заменить через μ_1 , тогда $\mu_1^2 = \operatorname{Bi}$ [2, 4]. Анализ значений первого корня μ_1 при $\operatorname{Bi} < 0,1$ приводит к выражению $\cos \mu_1 \approx \cos \sqrt{\operatorname{Bi}}$, и уравнения (3) можно представить в виде [2, 4, 6]

$$\Theta_{\text{п}} = \frac{t_{\text{с}} - t_{\text{п}}}{t_{\text{с}} - t_{\text{м.т.}}} = \cos \sqrt{\operatorname{Bi}} \exp(-\operatorname{Bi} \operatorname{Fo}). \quad (5)$$

Интенсивность нагревания тонкой пластины $d\Theta_{\text{п}}/d\tau$ при $Bi \ll 1$ прямо пропорциональна коэффициенту теплообмена и обратно пропорциональна первой степени характерного размера пластины $R = \delta/2$ [2]. Интенсивность нагревания тонкой пластины при толщине $\delta/2$ и $Bi < 0,1$ определяется скоростью переноса тепла от поверхности в окружающую среду (внешняя задача), и в этом случае интенсивность нагревания $d\Theta_{\text{п}}/d\tau$ практически не зависит от толщины. При $Bi > 0,1$ интенсивность нагрева определяется толщиной пластины, и $d\Theta_{\text{п}}/d\tau$ тем больше, чем выше значения Bi (внутренняя задача) [2].

Анализ величины первого корня μ_1 при изменении Bi от 0,1 до 0,5 показал, что параметр A_1 в формуле (4) изменяет свои значения в диапазоне 1,02–1,04. Таким образом, уравнение (5) до значений $Bi \approx 0,4$ дает погрешность при вычислении температуры на поверхности не более 5 %.

Из формулы (5) при $Bi < 0,1$ ($\cos\sqrt{Bi} \approx \cos\mu_1 \approx 1$) после подстановки $Fo = a\tau_{\text{п}}/(\delta/2)^2$ определяется длительность сушки во втором периоде [4, 5, 6]:

$$\tau_{\text{п}} = \frac{(\delta/2)^2}{aBi} \ln \frac{t_c - t_{\text{м.т.}}}{t_c - t_{\text{п}}}, \quad (6)$$

где $a = \lambda_{\text{в}} / (c_{\text{вл}} \rho_0)$ – коэффициент температуропроводности влажного тела, $\text{м}^2/\text{с}$ ($\lambda_{\text{в}}$ – коэффициент теплопроводности, $\text{Вт}/(\text{м}\cdot^{\circ}\text{C})$; $c_{\text{вл}}$ – удельная теплоемкость влажного тела, $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot^{\circ}\text{C})$; ρ_0 – плотность сухого тела, $\text{кг}/\text{м}^3$).

Для использования результатов аналитических решений уравнений теплопереноса в инженерной практике необходимы надежные измерения коэффициентов теплопроводности влажных материалов в зависимости от влагосодержания и температуры [2, 3, 5]. Определение коэффициентов теплопроводности, температуропроводности и удельной теплоемкости при одновременном изменении температуры и влагосодержания представляет известные трудности [3, 5]. Основным требованием для получения достоверных значений коэффициентов переноса является требование кратковременности теплового воздействия на влажный материал в эксперименте для предотвращения значительных изменений температуры и влагосодержания [5, 6]. Поэтому создание простых и универсальных приборов для определения термических коэффициентов является важной задачей теплофизики [3, 5].

При использовании результатов решений уравнений с постоянными коэффициентами переноса для случая, когда коэффициенты переменны, необходимо знать физический характер протекания процесса. В малоинтенсивных процессах сушки, когда температура при изменении влагосодержания материала не претерпевает значительных изменений в коротких промежутках времени для тонких материалов при $Bi < 0,1$ и небольших градиентах температуры по сечению тела, полагая незначительными изменения коэффициентов переноса в течение малых промежутков времени, в инженерной практике можно использовать аналитические решения дифференциальных уравнений теплопереноса, полученные при постоянных коэффициентах переноса, если погрешность расчетов находится в допустимых пределах.

Удельные теплоемкости c_0 сухих тел определяются химическим составом материала и его макроструктурой и являются линейной функцией температуры [6, 7]. Удельные теплоемкости влажных тел существенно зависят от влагосодержания и определяются по уравнению [1, 5, 7]

$$c_{\text{вл}} = c_0 + c_{\text{ж}}\bar{u},$$

где $c_{\text{вл}}$, c_0 , $c_{\text{ж}}$ – удельные теплоемкости влажного, сухого тела и жидкости соответственно. Для сухих глин $c_0 \approx 0,8 - 0,82$ $\text{кДж}/(\text{кг}\cdot^{\circ}\text{C})$.

Известно, что с увеличением влагосодержания строительных и теплоизоляционных материалов возрастает влияние температуры на коэффициент теплопроводности, особенно при температурах выше 50°C [3, 5, 6, 7], и для большинства влажных материалов коэффициенты теплопроводности и температуропроводности с повышением влагосодержания вначале увеличиваются, а потом – уменьшаются таким образом, что кривые изменения термических коэффициентов

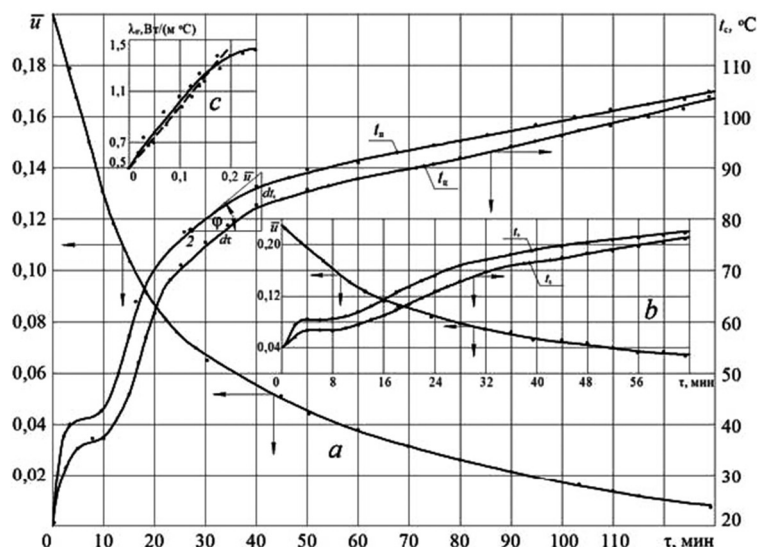


Рис. 1. Зависимости $\bar{u} = f(\tau)$ и $t = f(\tau)$ для процессов сушки влажных пластин из глины при режиме сушки $t_c = 120^\circ\text{C}$; скорость воздуха $v = 5$ м/с: а) пластина глины толщиной $\delta = 26$ мм; б) пластина глины толщиной $\delta = 12$ мм; в) зависимость $\lambda_w = f(\bar{u})$ для сушки влажных глин

Fig. 1. Dependencies $\bar{u} = f(\tau)$ and $t = f(\tau)$ for the processes of drying wet plates from clay under the drying regime $t_c = 120^\circ\text{C}$; air velocity $v = 5$ м/с: а) clay plate with thickness $\delta = 26$ mm; б) clay plate with thickness $\delta = 12$ mm; в) dependence $\lambda_w = f(\bar{u})$ for drying wet clays

от влагосодержания $\lambda_w = f(\bar{u})$ и $a = f(\bar{u})$ имеют максимум. Этот максимум объясняется переходом одной формы связи влаги с материалом к другой [3, 5, 6]. Для влажных белых, красных, желтых, каолиновых глин этот максимум наблюдается приблизительно в области влагосодержания до $\bar{u} \approx 0,2$ [3, 5, 6]. В результате изучения и анализа ряда литературных источников [3, 5, 6, 7–10] с достаточной точностью установлены закономерности изменения термических коэффициентов от влагосодержания и температуры. В результате обработки имеющихся опытных данных для влажных глин установлена приближенная зависимость $\lambda_w = f(\bar{u})$ при температуре 45°C , изображенная на рис. 1, в. В области влагосодержаний $\bar{u} = 0,07–0,17$ зависимость близка к линейной.

Согласно экспериментальным данным В. П. Журавлевой [7] по сушке обожженной пористой керамики с пористостью 10–28 % в области влагосодержания 0,04–0,14 при температурах материала $40–50^\circ\text{C}$, коэффициенты теплопроводности λ_w и температуропроводности a значительно отличаются от значений для влажных необожженных глин. Обжиг строительных материалов значительно увеличивает значения λ_w и a , особенно с повышением температуры материала выше 50°C с уменьшением влагосодержания [3, 5, 7]. Табличные данные источников [8–10] дают значения для сухой керамической плитки и керамических изделий $\lambda_0 = 1,3–1,5$ Вт/(м·°C), а для пористой керамики по данным [7] в области влагосодержаний 0,04–0,14 и при температурах выше 50°C коэффициенты теплопроводности принимают значения $\lambda_w = 1,7–3,7$ Вт/(м·°C) в зависимости от пористости и плотности $\rho_0 = 1680–1860$ кг/м³.

Таким образом, важное значение приобретают исследования по установлению точных значений коэффициентов переноса в зависимости от влагосодержания и температуры.

Для решения задачи по уравнениям (3), (5) необходимо вычислять критерии Bi и Fo по соотношениям:

$$Bi = \frac{\bar{\alpha}\delta/2}{\lambda_w}; \quad Fo = \frac{a\tau_{II}}{(\delta/2)^2}. \quad (7)$$

Коэффициент теплообмена $\bar{\alpha}$ определяется по формуле для теплообменного критерия Нуссельта Nu [1, 3]. Для сушки глин формула имеет вид [1]

$$\text{Nu} = 0,45 \text{Re}^{0,5} \left(\frac{T_c}{T_{\text{м.т.}}} \right)^2 \left(\frac{\bar{u}}{\bar{u}_{\text{кр}}} \right)^{0,9}, \quad (8)$$

где Re – критерий Рейнольдса; T_c и $T_{\text{м.т.}}$ – абсолютные температуры среды и мокрого термометра, К; \bar{u} и $\bar{u}_{\text{кр}}$ – текущее и критическое влагосодержание влажного материала. В период постоянной скорости сушки $\bar{u} / \bar{u}_{\text{кр}} = 1$.

Здесь критерий Нуссельта Nu и критерий Рейнольдса Re равны:

$$\text{Nu} = \frac{\bar{\alpha}l}{\lambda_{\text{воз}}}; \quad \text{Re} = \frac{vl}{\nu_{\text{воз}}},$$

где l – длина образца по набеганию потока воздуха; $\lambda_{\text{воз}}$, $\nu_{\text{воз}}$ – соответственно теплопроводность и кинематическая вязкость воздуха, определяемые по температуре среды по таблицам [12].

Для сушки обожженной проницаемой пористой керамики [13] критерий Нуссельта Nu можно представить как

$$\text{Nu} = 0,7 \text{Re}^{0,5} \left(\frac{T_c}{T_{\text{м.т.}}} \right)^2 \left(\frac{\bar{u}}{\bar{u}_{\text{кр}}} \right)^{0,5}. \quad (9)$$

На рис. 1 изображены кривые сушки $\bar{u} = f(\tau)$ и температурные кривые $t = f(\tau)$ для поверхности и в центре влажного материала: влажных пластин из красной глины толщиной $\delta = 26$ мм (а) и $\delta = 12$ мм (б), а на рис. 2 даны эти кривые для сушки влажной необожженной керамической пластины толщиной $\delta = 10$ мм (I) и проницаемой обожженной пористой керамики с пористостью 10 % толщиной $\delta = 5$ мм (II).

Из теории следует, что критерий Фурье, входящий в экспоненциальную функцию, пропорционален времени теплового воздействия на материал. Температура на поверхности и в центре пластин более интенсивно возрастает в начале нагрева, и ее рост замедляется в конце [4]. С увеличением толщины материала (ростом Bi) эти изменения усиливаются [4]. Из представленных экспериментальных графиков $t = f(\tau)$ видно, что теория хорошо согласуется с экспериментом.

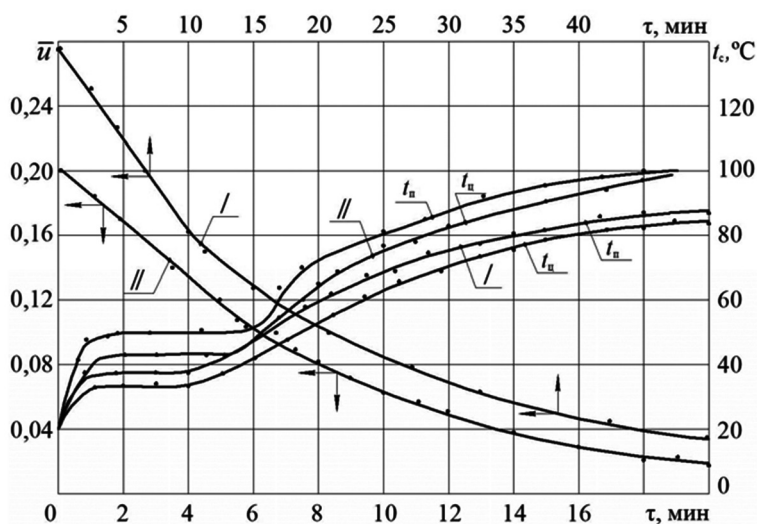


Рис. 2. Зависимости $\bar{u} = f(\tau)$ и $t = f(\tau)$ для процессов сушки тонких влажных керамических пластин.

I – влажная керамическая необожженная пластина толщиной $\delta = 10$ мм;

II – проницаемая пористая керамика толщиной $\delta = 5$ мм. Режим сушки: $t_c = 120$ °С; $v = 5$ м/с

Fig. 2. Dependencies $\bar{u} = f(\tau)$ and $t = f(\tau)$ for drying processes of thin wet ceramic plates. I – wet ceramic unfired plate with thickness $\delta = 10$ mm; II – permeable porous ceramic with thickness $\delta = 5$ mm. Drying mode: $t_c = 120$ °С; $v = 5$ м/с

Коэффициент температуропроводности можно определить по данным эксперимента по методу А. В. Лыкова [11] без применения сложной измерительной аппаратуры по формуле

$$a = \frac{b(\delta/2)^2}{m(t_{\text{п}} - t_{\text{ц}})}, \quad (10)$$

где $b = dt_{\text{п}}/d\tau$ – скорость изменения температуры на поверхности материала во времени, °C/c; m – постоянное число (для пластины $m = 2$; для цилиндра $m = 4$; для шара $m = 6$); $t_{\text{п}}$ и $t_{\text{ц}}$ – температуры на поверхности и в центре тела, °C.

Необходимое условие применения уравнения (10) заключается в следующем: изменение температуры материала должно соответствовать уравнению (5) при значениях критерия $Bi < 1$ и $Fo > 0,5$, температура любой точки тела становится функцией времени, градиенты температуры и влагосодержания невелики и постоянны во времени [2, 5, 6, 11] (внешняя задача). При малых перепадах температуры между центральными и поверхностными слоями температуру материала можно приближенно определить по зависимости

$$t_{\text{п}} = t_{\text{м.т.}} + b\tau, \quad (11)$$

где τ – время прогревания материала в процессе сушки от начального влагосодержания до заданного текущего значения.

Для определения коэффициента температуропроводности a по методу А. В. Лыкова необходимо по результатам единичного опыта построить в укрупненном масштабе для уменьшения погрешности графического дифференцирования графики зависимостей для кривой сушки $\bar{u} = f(\tau)$ и температурные кривые $t = f(t_{\text{п}})$. Пример расчета коэффициента a показан на рис. 1. Текущее влагосодержание выбирается так, чтобы к кривой $t_{\text{п}} = f(\tau)$ более точно провести касательную для определения b (см. рис. 1). Затем проводится касательная к точке 2 при влагосодержании $\bar{u} = 0,07$ и определяется скорость нагрева поверхности пластины в точке 2; $b = dt_{\text{п}}/d\tau \approx 0,022$ °C/c. Перепад температуры между поверхностью и центральным слоем материала в точке 2 $\Delta t = t_{\text{п}} - t_{\text{ц}} \approx 3$ °C. Коэффициент температуропроводности при $\bar{u} = 0,07$ приближенно равен

$$a = \frac{b(\delta/2)^2}{m(t_{\text{п}} - t_{\text{ц}})} = \frac{0,022 \cdot \left(\frac{26}{2} \cdot 10^{-3}\right)^2}{2 \cdot 3} \approx 6,2 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с},$$

что удовлетворительно согласуется с расчетным значением коэффициента a : из табл. 1 для пластины толщиной $\delta = 26$ мм, $a = 6,4 \cdot 10^{-7}$ м²/с при $\bar{u} = 0,08$.

Температура на поверхности пластины в точке 2 (см. рис. 1) по уравнению (11) при времени прогревания пластины от влагосодержания $\bar{u}_0 = 0,2$ до $\bar{u} = 0,115$, равном $\tau = 1650$ с, и температуре $t_{\text{м.т.}} = 41$ °C (табл. 1) равна

$$t_{\text{п}} = 41 + 0,022 \cdot 1650 = 77,3 \text{ °C}.$$

В эксперименте в точке 2 (см. рис. 1, а) температура составляет $t_{\text{п.экс.}} \approx 78$ °C.

В табл. 1–3 представлены результаты расчетов всех параметров для определения температуры материала по уравнениям (3) и (5). Анализ расчетных данных показывает вполне удовлетворительное совпадение значений температуры материала с экспериментальными значениями. Однако следует отметить, что использование аналитических решений требует достаточно точных значений коэффициентов переноса от влагосодержания и температуры.

Таблица 1. Расчет температуры на поверхности пластин глины в процессе сушки конвективным способом
Table 1. Calculation of the temperature on the surface of the clay plates for the process of drying with a convective method

Пластина глины 135×110×12 мм; $\rho_0 = 1790 \text{ кг/м}^3$; $\bar{u}_0 = 0,236$; $\bar{u}_{кр} = 0,15$; $t_{м.т.} \approx t_{п1} = 41 \text{ }^\circ\text{C}$; $\bar{\alpha}_{кр} = 26,1 \text{ Вт/(м}^\circ\text{C)}$; $\lambda_0 = 0,5 \text{ Вт/(м}^\circ\text{C)}$. Режим сушки: $t_c = 120 \text{ }^\circ\text{C}$; $v = 5 \text{ м/с}$; $\phi = 5 \%$										
\bar{u}	$\bar{\alpha}, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}}$	$\lambda_{ш}, \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot ^\circ\text{C}}$	Bi	$\tau_{п}, \text{ с}$	$a \cdot 10^6, \text{ м}^2/\text{с}$	Fo	μ_1	$t_{п}, ^\circ\text{C} (3)$	$t_{п.экс.}, ^\circ\text{C}$	$t_{п}, ^\circ\text{C} (5)$
0,10	16,6	1,48	0,067	590	0,66	10,8	0,26	80	78,0	82
0,08	13,7	1,32	0,062	950	0,64	16,6	0,24	90	88,2	89
0,06	11,3	1,24	0,053	1410	0,64	25,6	0,23	99	96,5	99
0,04	7,9	0,92	0,051	2010	0,53	28,8	0,22	101	99,4	101
0,02	3,8	0,81	0,028	3560	0,50	48,6	0,19	105	106,0	103
Пластина глины 130×120×26 мм; $\rho_0 = 1860 \text{ кг/м}^3$; $\bar{u}_0 = 0,2$; $\bar{u}_{кр} = 0,125$; $t_{м.т.} \approx t_{п1} = 41 \text{ }^\circ\text{C}$; $\bar{\alpha}_{кр} = 26,1 \text{ Вт/(м}^\circ\text{C)}$; $\lambda_0 = 0,5 \text{ Вт/(м}^\circ\text{C)}$. Режим сушки: $t_c = 120 \text{ }^\circ\text{C}$; $v = 5 \text{ м/с}$; $\phi = 5 \%$										
\bar{u}	$\bar{\alpha}, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}}$	$\lambda_{ш}, \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot ^\circ\text{C}}$	Bi	$\tau_{п}, \text{ с}$	$a \cdot 10^6, \text{ м}^2/\text{с}$	Fo	μ_1	$t_{п}, ^\circ\text{C} (3)$	$t_{п.экс.}, ^\circ\text{C}$	$t_{п}, ^\circ\text{C} (5)$
0,10	17,6	1,46	0,156	665	0,65	2,54	0,39	67,5	69,0	66,5
0,08	13,7	1,31	0,136	1215	0,61	4,31	0,37	76,6	78,2	76,5
0,06	11,3	1,23	0,119	1670	0,66	6,78	0,35	88,0	88,0	86,5
0,04	7,9	0,92	0,108	2882	0,52	8,60	0,33	90,5	93,0	89,4
0,02	3,8	0,81	0,089	5380	0,53	16,30	0,30	102,0	101,0	101,5
0,01	3,1	0,56	0,074	7810	0,41	19,60	0,28	105,0	104,0	103,2

Таблица 2. Расчет температуры на поверхности влажной необожженной керамической пластины в процессе сушки конвективным способом

Table 2. Calculation of the temperature on the surface of a moist unbaked ceramic plate for the process of drying with a convective method

Влажная керамическая пластина 120×80×10 мм; $\rho_0 = 1860 \text{ кг/м}^3$; $\bar{u}_0 = 0,273$; $\bar{u}_{кр} = 0,16$; $t_{м.т.} \approx t_{п1} = 38 \text{ }^\circ\text{C}$; $\bar{\alpha}_{кр} = 23,6 \text{ Вт/(м}^\circ\text{C)}$; $\lambda_0 = 0,5 \text{ Вт/(м}^\circ\text{C)}$. Режим сушки: $t_c = 120 \text{ }^\circ\text{C}$; $v = 3 \text{ м/с}$; $\phi = 5 \%$										
\bar{u}	$\bar{\alpha}, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}}$	$\lambda_{ш}, \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot ^\circ\text{C}}$	Bi	$\tau_{п}, \text{ с}$	$a \cdot 10^6, \text{ м}^2/\text{с}$	Fo	μ_1	$t_{п}, ^\circ\text{C} (3)$	$t_{п.экс.}, ^\circ\text{C}$	$t_{п}, ^\circ\text{C} (5)$
0,10	15,4	1,11	0,069	270	0,49	5,30	0,266	63,3	61,5	63,3
0,08	12,5	0,98	0,061	396	0,46	7,26	0,245	67,7	68,5	67,4
0,06	9,6	0,86	0,056	547	0,44	9,68	0,236	73,2	75,5	73,3
0,04	6,6	0,81	0,041	786	0,43	14,22	0,207	77,8	79,3	76,5
0,02	4,4	0,59	0,044	1310	0,36	18,73	0,191	82,6	85,5	81,5

Таблица 3. Расчет температуры на поверхности проницаемой обожженной пористой керамики для второго периода сушки

Table 3. Calculation of the temperature on the surface of the permeable porous ceramics fired for the second drying period

Пластина проницаемой обожженной пористой керамики 120×80×5 мм; $\rho_0 = 1860 \text{ кг/м}^3$; $\bar{u}_0 = 0,2$; $\bar{u}_{кр} = 0,1$; $t_{м.т.} \approx t_{п1} = 50 \text{ }^\circ\text{C}$; $\bar{\alpha}_{кр} = 32,0 \text{ Вт/(м}^\circ\text{C)}$; $\lambda_0 = 1,5 \text{ Вт/(м}^\circ\text{C)}$. Режим сушки: $t_c = 120 \text{ }^\circ\text{C}$; $v = 3 \text{ м/с}$; $\phi = 5 \%$										
\bar{u}	$\bar{\alpha}, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}}$	$\lambda_{ш}, \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot ^\circ\text{C}}$	Bi	$\tau_{п}, \text{ с}$	$a \cdot 10^6, \text{ м}^2/\text{с}$	Fo	μ_1	$t_{п}, ^\circ\text{C} (3)$	$t_{п.экс.}, ^\circ\text{C}$	$t_{п}, ^\circ\text{C} (5)$
0,10	32,0	1,70	0,047	0	0,75	0,0	0,216	50,0	50,0	51,5
0,08	26,2	1,69	0,037	85	0,76	10,7	0,190	72,5	71,5	72,5
0,06	18,2	1,72	0,026	180	0,81	23,1	0,170	79,5	76,5	81,7
0,04	14,6	1,70	0,020	360	0,85	48,5	0,140	92,0	90,5	92,5
0,02	9,8	1,68	0,013	620	0,92	89,2	0,144	97,5	97,8	98,1

Заключение. Исследования сушки тонких плоских влажных капиллярно-пористых материалов при значениях теплообменного критерия $Bi \ll 1$, малых перепадах температур по сечению тела, невысоких значениях коэффициента теплообмена при конвективной сушке и достоверных значениях коэффициентов переноса показали, что расчет температуры на поверхности материала по аналитическим уравнениям дает вполне удовлетворительное согласование расчетных значений с экспериментом.

Для обоснованного и правильного выбора режима сушки необходимы точные значения теплофизических характеристик материалов и их зависимость от влагосодержания и температуры,

что позволит расширить возможность использования компьютерной техники при решении практических задач.

Список использованных источников

1. Лыков, А. В. Теория сушки / А. В. Лыков. – М.: Энергия, 1968. – 472 с.
2. Лыков, А. В. Теория теплопроводности / А. В. Лыков. – М.: Высш. шк., 1967. – 600 с.
3. Лыков, А. В. Теоретические основы строительной теплофизики / А. В. Лыков. – Минск: АН БССР, 1961. – 520 с.
4. Шорин, С. Н. Теплопередача / С. Н. Шорин. – М.: Высш. шк., 1964. – 490 с.
5. Лыков, А. В. Явления переноса в капиллярно-пористых телах / А. В. Лыков. – М.: Госэнергоиздат, 1954. – 298 с.
6. Лыков, А. В. Тепломассообмен / А. В. Лыков. – М.: Энергия, 1972. – 560 с.
7. Журавлева, В. П. Массотеплоперенос при термообработке и сушке капиллярно-пористых строительных материалов / В. П. Журавлева. – Минск: Наука и техника, 1972. – 192 с.
8. Франчук, А. У. Таблицы теплотехнических показателей строительных материалов / А. У. Франчук. – М.: НИИ строительной физики, 1969. – 143 с.
9. Физические величины: справочник / под ред. И. С. Григорьева, Е. З. Меймехова. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 1232 с.
10. Блази, В. Строительная физика: справочник проектировщика / В. Блази. – М.: Техносфера, 2005. – 536 с.
11. Лыков, А. В. Теория сушки капиллярно-пористых коллоидных материалов пищевой промышленности / А. В. Лыков, Л. Я. Ауэрман. – М.: Пищепромиздат, 1946. – 286 с.
12. Исаченко, В. П. Теплопередача / В. П. Исаченко, В. А. Осипова, А. С. Сукомел. – М.: Энергия, 1975. – 486 с.
13. Лыков, А. В. Кинетика теплообмена в процессе сушки влажных материалов / А. В. Лыков, П. С. Куц, А. И. Ольшанский // Инженер.-физ. журн. – 1972. – Т. 23, № 3. – С. 401–406.

References

1. Lykov A. V. *Drying theory*. Moscow, Energiya Publ., 1968. 472 p. (in Russian).
2. Lykov A. V. *Heat conductivity theory*. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1967. 600 p. (in Russian).
3. Lykov A. V. *Theoretical fundamentals of construction thermophysics*. Minsk, Publishing house of Academy of Sciences of BSSR, 1961. 520 p. (in Russian).
4. Shorin S. N. *Heat transfer*. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1964. 490 p. (in Russian).
5. Lykov A. V. *Transport phenomena in capillary-porous bodies*. Moscow, Gosenergoizdat Publ., 1954. 298 p. (in Russian).
6. Lykov A. V. *Heat and mass transfer*. Moscow, Energiya Publ., 1972. 560 p. (in Russian).
7. Zhuravleva V. P. *Mass transfer in the course of heat treatment and drying of capillary-porous building materials*. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1972. 192 p. (in Russian).
8. Franchuk A. U. *Tables of heat engineering indicators of building materials*. Moscow, Research Institute of Building Physics Publ., 1969. 143 p. (in Russian).
9. Grigorieva I. S., Meymehova E. Z. (eds.). *Physical quantities*. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1991. 1232 p. (in Russian).
10. Blazy V. *Construction physics*. Moscow, Technosphere Publ., 2005. 536 p. (in Russian).
11. Lykov A. V., Auerman L. Ya. *The theory of drying capillary-porous colloid materials of the food industry*. Moscow, Pishchepromizdat Publ., 1946. 286 p. (in Russian).
12. Isachenko V. P., Osipova V. A., Sukomel A. S. *Heat transfer*. Moscow, Energiya Publ., 1975. 486 p. (in Russian).
13. Lykov A. V., Kuts P. S., Olshansky A. I. Kinetics of heat transfer in the process of drying wet materials. *Inzhenerno-fizicheskii zhurnal = Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 1972, vol. 23, no. 3, pp. 401–406 (in Russian).

Информация об авторах

Ольшанский Анатолий Иосифович – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры технологии и оборудования машиностроительного производства, Витебский государственный технологический университет (Московский пр., 72, 210035, Витебск, Республика Беларусь). E-mail: tiomp@vstu.by

Жерносек Сергей Васильевич – кандидат технических наук, доцент кафедры технологии и оборудования машиностроительного производства, Витебский государственный технологический университет (Московский пр., 72, 210035, Витебск, Республика Беларусь). E-mail: zs_85@mail.ru

Гусаров Алексей Михайлович – кандидат технических наук, доцент кафедры технологии и оборудования машиностроительного производства, Витебский государственный технологический университет (Московский пр., 72, 210035, Витебск, Республика Беларусь). E-mail: tiomp@vstu.by

Information about the authors

Anatolii I. Ol'shanskii – Ph. D. (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of the Department of technology and equipment of machine-building production, Vitebsk State Technological University (72, Moskovsky Ave., 210035, Vitebsk, Republic of Belarus). E-mail: tiomp@vstu.by

Sergei V. Zhernosek – Ph. D. (Engineering), Associate Professor of the Department of technology and equipment of machine-building production, Vitebsk State Technological University (72, Moskovsky Ave., 210035, Vitebsk, Republic of Belarus). E-mail: zs_85@mail.ru

Aleksei M. Gusarov – Ph. D. (Engineering), Associate Professor of the Department of technology and equipment of machine-building production, Vitebsk State Technological University (72, Moskovsky Ave., 210035, Vitebsk, Republic of Belarus). E-mail: tiomp@vstu.by