Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol. 2017. V. 60. N 10

DOI: 10.6060/tcct.20176010.5568

УДК: 537.868:536.33

ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ СУШКЕ КОНВЕКЦИЕЙ И СУШКЕ ИНФРАКРАСНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

А.М. Афанасьев, А.В. Никишова, Б.Н. Сипливый

Анатолий Михайлович Афанасьев *, Арина Валерьевна Никишова *

Кафедра информационной безопасности, Институт приоритетных технологий, Волгоградский государственный университет, просп. Университетский, 100, Волгоград, Российская Федерация, 400062
E-mail: a.m.afanasiev@yandex.ru, arinanv@ yandex.ru, nikishova.arina@volsu.ru

Борис Николаевич Сипливый

Кафедра теоретической физики и волновых процессов, Физико-технический институт, Волгоградский государственный университет, просп. Университетский, 100, Волгоград, Российская Федерация, 400062
E-mail: tf@volsu.ru

В рамках теории тепломассопереноса А.В. Лыкова сформулирована начально-краевая задача для расчета полей температуры и влагосодержания в плоском образце, нижняя поверхность которого тепло- и влагоизолирована, а верхняя обдувается потоком воздуха и подвергается воздействию инфракрасного излучения. Данный вид излучения обладает малой глубиной проникновения, поэтому его действие на материал учитывается источниками тепла, которые вводятся не в уравнение теплопроводности, а в краевое условие теплообмена. Для корректного учета нелинейного характера процессов массообмена на поверхности образца граничные условия для потоков влаги принимаются в форме закона испарения Дальтона. Целью работы был расчет перепадов влагосодержания между границами образца, которые определяют качество сушки и величину внутренних механических напряжений. Исследование проводилось в переходных и в установившихся режимах. Переходные режимы, которые возникают при резком изменении температуры воздуха (сушка конвекцией), и, соответственно, при включении или выключении источника излучения (инфракрасная сушка), исследовались численными методами. Для исследования установившихся режимов, следующих за режимами переходными и являющихся их асимптотикой для больших моментов времени, использовались оригинальные, полученные авторами квазистационарные решения исходной начально-краевой задачи для полей температуры и влагосодержания. Центральным понятием в этих решениях является установившаяся температура поверхности образца, которая является обобщением понятия температуры мокрого термометра на случай сушки излучением. Исследование показало, что при сушке конвекцией опасность разрушения материала от механических деформаций, вызванных неравномерностью распределения влагосодержания по толщине образца, возникает в переходных режимах, а при сушке инфракрасным излучением эта опасность возникает в режимах установившихся. В первом случае причиной является конденсация пара на поверхности пластины, возникающая за счет резкого изменения температуры воздуха, а во втором случае появление большого перепада влагосодержания обусловлено тем, что тепловые источники, индуцированные поглощением инфракрасного излучения, сосредоточены на поверхности материала. Предложенный расчетный алгоритм позволяет организовать сушку, при которой механические напряжения внутри материала не превышают допустимых значений.

Ключевые слова: сушка конвекцией; сушка инфракрасным излучением; уравнения Лыкова; численные методы; переходные процессы; механические деформации; оптимизация технологических процессов

TRANSIENTS PROCESSES UNDER DRYING WITH CONVECTION AND INFRARED RADIATION

A.M. Afanas'ev, A.V. Nikishova, B.N. Siplivy

Anatoly M. Afanas'ev*, Arina V. Nikishova

Department of Information Security, Volgograd State University, Institute of Priority Technologies, Universitetskiy ave., 100, Volgograd, 400062, Russia
E-mail: a.m.afanasiev@yandex.ru*, arinanv@ yandex.ru, nikishova.arina@volsu.ru

Boris N. Siplivy

Department of Theoretical Physics and Wave pPocesses, Physico-Technical Institute, Volgograd State University, Universitetskiy ave., 100, Volgograd, 400062, Russia
E-mail: tf@volsu.ru

Based on the theory of the A.V. Lykov for heat and mass transfer the mathematical model of propagation of heat and moisture in a flat sample, which is blown by the air flow and is exposed to infrared radiation. The model is based on the following views: the density of heat loss is determined by the heat transfer by convection and heat exchange by radiation, and the intensity of the mass exchange surface with the environment depends on the difference in partial pressure of water vapor through the thickness of the boundary layer (the boundary condition of mass transfer in the form of Dalton); temperature field inside the material is determined by the heat transfer due to the phenomenon of thermal conductivity, and the presence of internal heat sources caused by the absorption of penetrating electromagnetic radiation and the processes of evaporation (condensation); the transfer of moisture inside the material is partly liquid and partly in vapor form, and is caused by moisture content gradients (diffusion) and temperature (thermal diffusion). The results of analytical calculation of steady-state fields of temperature and moisture content for cases of convective drying and infrared drying, and the results of numerical calculation of the same field in transient conditions are presented. Numerical experiment allows us to estimate the duration of the transition process, as well as the behavior of the differential moisture content between the borders of the plate, with the increase which increases the probability of failure of the sample from mechanical deformation. It is shown that for convective drying of such a danger occurs in the transitional regime, and for infrared drying – mode steady-state. To reduce internal mechanical stresses when drying by convection, avoid sudden temperature changes of the air flow; the time during which there is an increase in air temperature, should be around the time of the transition process. When drying with infrared rays, if the differences of moisture content in the steady state are invalid for their reduction can be used or drying in the oscillating radiation, or drying under the combined effect of the sample electromagnetic waves with large and small penetration depth. The distinction in the nature of transients, infrared drying and drying with hot air can be explained using the formula of Dalton, which is part of the used mathematical model and determining the intensity of the problem through the boundary layer. Due to the great inertia of thermal processes, even in the case where the intensity of the infrared radiation changes rapidly in time (for example at the initial time gap of the first kind), the surface temperature of the material, and with it the intensity of drying, continue to be continuous functions; on the contrary, an abrupt change in air temperature in convective drier automatically leads to a gap function of the flux density of moisture on the surface.

Key words: convection drying; drying by infrared radiation; Lykov's equation; numerical methods; transients; mechanical deformation; optimization of technological processes

Для цитирования:
Афанасьев А.М., Никишова А.В., Сипливый Б.Н. Переходные процессы при сушке конвекцией и сушке инфракрасным излучением. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2017. Т. 60. Вып. 10. С. 94–101

For citation:
Afanas'ev A.M., Nikishova A.V., Siplivy B.N. Transients processes under drying with convection and infrared radiation. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.* 2017. V. 60. N 10. P. 94–101

ВВЕДЕНИЕ

Сушку влажных материалов, в общем случае с применением электромагнитного излучения, широко применяют в различных отраслях производства, в том числе и в химической промышленности [1, 2]. Типовая схема сушки плоского образца показана на рис. 1. В частном случае, когда излучение отсутствует, сушка является конвективной. В свою очередь, при наличии излучения принято отдельно рассматривать сушку инфракрасным (ИК) излучением и сушку электромагнитными волнами СВЧ диапазона. При ИК сушке излучение поглощается тонким поверхностным слоем материала, а при СВЧ сушке поглощение энергии электромагнитной волны происходит уже по всему объему образца. Ниже мы будем рассматривать только сушку конвекцией и ИК сушку.

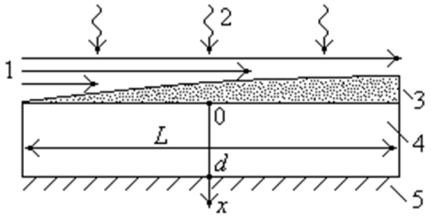


Рис. 1. Сушка плоского образца: 1 – воздушный поток; 2 – плоская электромагнитная волна; 3 – пограничный слой; 4 – пластина из влажного материала; 5 – тепло- и влагоизоляция
Fig. 1. Drying flat samples: 1 – air flow; 2 – a plane electromagnetic wave; 3 – boundary layer; 4 – plate of the wet material; 5 – heat and moisture insulation

Важным параметром в задачах оптимизации процесса сушки является перепад влагосодержания между границами образца. Чем больше этот перепад, тем ниже качество сушки и тем больше вероятность разрушения образца от механических деформаций, вызванных неоднородностью поля влагосодержания. Расчет перепадов в *установившихся* режимах был проведен авторами в работах [3-7]. Такие режимы возникают *асимптотически* (т.е. при рассмотрении больших моментов времени), и анализ этих режимов может быть произведен *аналитическими* методами. Вместе с тем исследование перепадов влагосодержания в *переходных* режимах, возможное только с применением численных процедур, проведено не было. Именно этой проблеме и посвящена настоящая статья. Заметим, что переходный процесс при конвективной сушке индуцируется резким изменением температуры воздуха, а переходный процесс при ИК сушке – включением источника излучения.

Математическая модель сушки излучением

При анализе процесса сушки будем считать, что толщина пластины d [м] является малой по сравнению с ее размерами в направлениях, перпендикулярных оси x [м], а материал пластины является *однородным*. В этих условиях искомые распределения – температура материала T [ºС] и его влагосодержание U – будут функциями только координаты x и времени τ [с]:

$$T = T(x,\tau);\ U = U(x,\tau).$$

При сделанных предположениях начально-краевая задача для расчета функций T и U будет иметь следующий вид [8, 9]:

$$c\rho_0 \frac{\partial T}{\partial \tau} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + r\gamma\rho_0 \frac{\partial U}{\partial \tau}; \quad (1)$$

$$\frac{\partial U}{\partial \tau} = a_{\text{m}} \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + a_{\text{m}}\delta \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}; \quad (2)$$

$$Q(\tau) + r(1-\gamma)\cdot J(\tau) = \lambda \frac{\partial T}{\partial x}(0,\tau) + A\cdot S; \quad (3)$$

$$J(\tau) = a_{\text{m}}\rho_0\left[\frac{\partial U}{\partial x}(0,\tau) + \delta \frac{\partial T}{\partial x}(0,\tau)\right]; \quad (4)$$

$$Q(\tau) = \alpha_{\text{w}}\left[T(0,\tau) - T_{\text{в}}\right] + \sigma\tilde{A}\left[\left(T(0,\tau)+T_1\right)^4 - \left(T_{\text{в}}+T_1\right)^4\right]; \quad (5)$$

$$J(\tau) = \alpha_{\text{m}}\left[P(T(0,\tau)) - \varphi\cdot P(T_{\text{в}})\right];$$

$$P(T) = 6{,}03\cdot 10^{-3}\cdot \exp\frac{17{,}3\cdot T}{T+T_2}; \quad (6)$$

$$\alpha_{\text{w}} = k_{\text{w}}\sqrt{\frac{V}{L}},\ \ \alpha_{\text{m}} = k_{\text{m}}\sqrt{\frac{V}{L}},\ \ k_{\text{w}} = 3{,}82\frac{\text{Вт}\cdot \text{с}^{1/2}}{\text{м}^2\cdot{}^\circ\text{С}},$$

$$k_{\text{m}} = 2{,}54\cdot 10^{-3}\frac{\text{кг}}{\text{с}^{1/2}\cdot\text{м}^2}; \quad (7)$$

$$\frac{\partial T}{\partial x}(d,\tau) = 0;\ \ \frac{\partial U}{\partial x}(d,\tau) = 0; \quad (8)$$

$$T(x,0) = T_{\text{М}};\ U(x,0) = U_0 \quad (9)$$

Здесь λ, c, ρ_0, a_{m}, δ, γ – характеристики материала (коэффициент теплопроводности [Вт/(м·ºС)], удельная теплоемкость [Дж/(кг·ºС)], плотность в сухом состоянии [кг/м^3], коэффициент диффузии влаги [м^2/с], относительный коэффициент термодиффузии влаги [1/ºС], критерий испарения); r – удельная теплота парообразования воды [Дж/кг]; A – коэффициент поглощения ИК излучения; S – интенсивность излучения [Вт/м^2]. Соотношения (1) и (2) представляют собой уравнения распространения тепла и влаги, а (3) и (4) есть краевые условия тепло- и массообмена на границе x = 0. Формулы (5) и (6) определяют интенсивности тепло- и массообмена Q [Вт/м^2] и J [кг/(м^2·с)] поверхности x = 0 с воздушной средой; учитывается теплообмен конвекцией и теплообмен излучением, а интенсивность массообмена принимается в виде закона испарения Дальтона. Закон испарения (6) будет справедливым, если водяной пар вблизи поверхности является *насыщенным*; в свою очередь,

для этого влагосодержание на поверхности должно быть выше некоторого характерного для данного материала *критического влагосодержания* $U_{кр}$. Коэффициенты в уравнениях (5) и (6) имеют следующий смысл: σ – постоянная Стефана-Больцмана [Вт/(м^2·ºС^4)]; $\tilde{A}$ – коэффициент теплового излучения; $T_в$ и φ – температура и влажность воздуха за пределами пограничного слоя; $P(T)$ – функция, моделирующая зависимость относительного парциального давления насыщенного водяного пара от его температуры T; T_1 = 273 ºС и T_2 = 238 ºС – постоянные; α_w [Вт/(м^2·ºС)] и α_m [кг/(м^2·с)] – коэффициенты тепло- и массообмена поверхности образца с воздушной средой, которые рассчитываются по формулам (7), полученным авторами в работе [10]. В этих формулах V [м/с] есть скорость воздуха вне пограничного слоя, а L [м]– длина пластины в направлении движения воздушного потока (рис. 1). Соотношения (8) являются краевыми условиями на нижней границе пластины $x = d$ и выражают факт ее тепло- и влагоизоляции, а (9) есть начальные условия, в которых U_0 – начальное влагосодержание материала, а $T_м$ – температура мокрого термометра. Такую температуру имеет поверхность материала $x = 0$ перед началом сушки, т.е. перед тем, как начинают обдувать пластину горячим воздухом или включают источник ИК излучения. При выполнении расчетов мы будем считать, что начальная температура материала при любом x совпадает с начальной температурой его поверхности $T_м$. Метод расчета величины $T_м$ будет указан ниже.

В действительности, в качестве начальных распределений T и U следовало бы взять рассматриваемые в следующем пункте *параболические* распределения. Однако при сушке конвекцией эту начальную неоднородность полей можно при расчетах не учитывать [10].

Установившийся режим сушки

Здесь мы будем опираться на результаты работ авторов [3, 11]. Через какое-то время после начала сушки (формально – при $\tau\to\infty$) возникает установившийся режим, для которого характерно следующее:

1. Температура поверхности $x = 0$ перестает изменяться во времени; обозначив эту температуру как T_∞, будем иметь для ее нахождения следующее трансцендентное уравнение:

$$\alpha_w(T_\infty - T_в) + \sigma\tilde{A}\left[(T_\infty + T_1)^4 - (T_в + T_1)^4\right] + r\alpha_m\left[P(T_\infty) - \varphi\cdot P(T_в)\right] = SA. \quad (10)$$

Если $S = 0$ (конвективная сушка), то температура T_∞ совпадает с температурой мокрого термометра $T_м$, входящей в начальные условия (9).

2. Интенсивность сушки (обозначим ее в этой ситуации как J_∞) также перестает изменяться во времени и вычисляется по формуле

$$J_\infty = \alpha_m[P(T_\infty) - \varphi\cdot P(T_В)]. \quad (11)$$

3. Температурное поле оказывается *стационарным*, распределенным по *параболическому* закону и имеющим перепад по толщине пластины

$$\Delta T = T(d) - T(0) = -\gamma r d J_\infty/(2\lambda). \quad (12)$$

4. Поле влагосодержания оказывается *квазистационарным* (производная $\partial U/\partial\tau$ не зависит ни от координаты, ни от времени), распределенным в каждый фиксированный момент времени по *параболическому* закону и имеющим неизменный во времени перепад между границами пластины

$$\Delta U = U(d,\tau) - U(0,\tau) = \frac{\chi r\delta d}{2\lambda} J_\infty(T_\infty),$$
$$\chi = \gamma + \lambda/(a_m\rho_0\delta r). \quad (13)$$

При выполнении численного эксперимента процесс должен «выходить» на указанные здесь параметры. При $S = 0$ все формулы дают характеристики конвективной сушки.

Переходные процессы при конвективной сушке

В качестве материала будем использовать *глину*. Ее характеристики [8]: λ = 0,93 Вт/(м·ºС); $c = 1{,}9\cdot10^3$ Дж/(кг·ºС); $\rho_0 = 1{,}5\cdot10^3$ кг/м^3; $a_m = 2{,}6\cdot10^{-8}$ м^2/с; $\delta = 1{,}5\cdot10^{-3}$ 1/ºС; γ = 0,10; χ = 7,13; U_0 = 0,4; $U_{кр}$ = 0,1; $\tilde{A}$ = 0,75.

Другие параметры: $S = 0$; $V/L = 5{,}0$ с$^{-1}$; $d = 4$ см; φ = 0,5; $T_в$ = 28 ºС.

Решая уравнение (11), найдем температуру мокрого термометра $T_\infty = T_м$, а затем по формуле (13) рассчитаем установившуюся интенсивность сушки J_∞. В итоге будем иметь:

T_∞ = 20 ºС; $J_\infty = 2{,}87\cdot10^{-5}$ кг/(м^2·с); τ < 0.

Будем считать, что такими эти величины были в установившемся режиме при τ < 0. Примем, что в момент τ = 0 температура воздуха мгновенно возросла от значения $T_в$ = 28 ºС до значения $T_в$= =100 ºС. Тогда к некоторому моменту установления $\tau_{уст}$, который будет нужно еще определить, процесс выйдет на новый установившийся режим с параметрами

T_∞ = 82,3 ºС; $J_\infty = 6{,}68\cdot10^{-5}$ кг/(м^2·с); $\tau > \tau_{уст}$.

Значения этих величин получены тем же способом, что и выше.

Таким образом, здесь мы имеем ситуацию, когда влажную пластину, имеющую низкую температуру T_∞ = 20 ºС и обдуваемую воздухом с температурой $T_в$ = 28 ºС, в момент τ = 0 начинают обдувать горячим воздухом с температурой 100 ºС. На отрезке $0 < \tau < \tau_{уст}$ будут наблюдаться переходные

процессы, которые и являются целью исследования в настоящем пункте.

Для понимания особенностей этих явлений введем дополнительно функцию q(τ) [Вт/м^2] – плотность поверхностных источников тепла, обусловленных конденсацией пара на границе пластины $x = 0$; эта величина, согласно используемой математической модели, определяется следующим образом:

$$q(\tau) = -r(1 - \gamma)\cdot J(\tau). \qquad (14)$$

Здесь J(τ) есть интенсивности сушки, определяемая формулой (6).

Алгоритм численного решения начально-краевой задачи (1)-(9) подробно изложен в статье авторов [12]. Результаты численных экспериментов показаны в табл. 1 и на рис. 2.

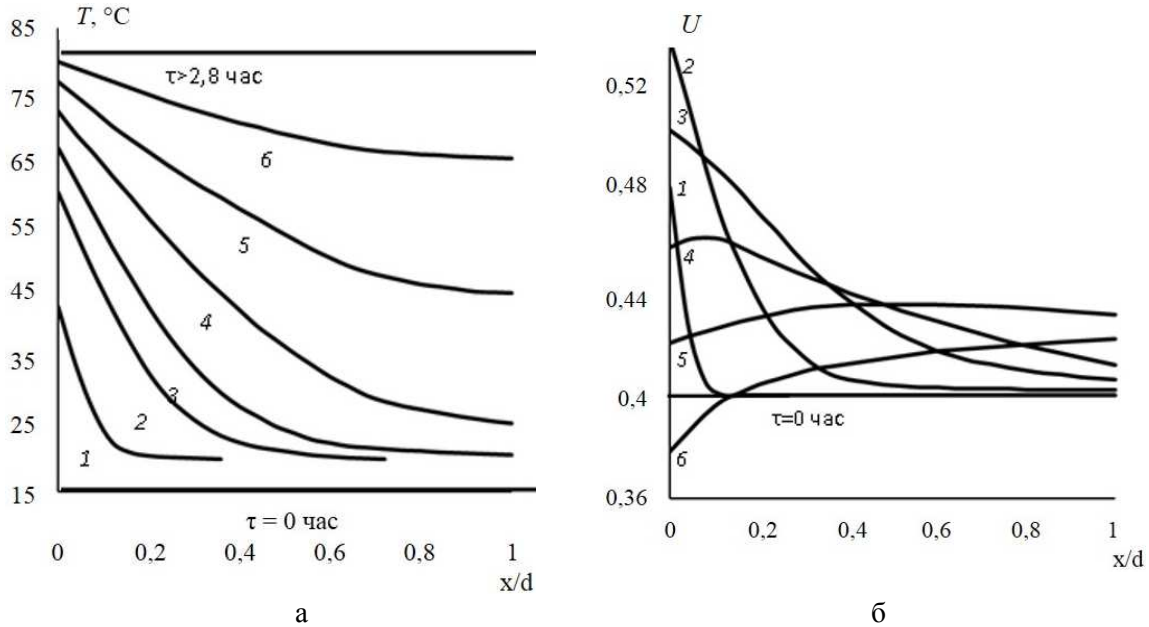
Значения функций в табл. 1 при τ = +0 получаются из формул (6) и (14) при $T_в$=100 °С (температура горячего воздуха, которым стали обдувать пластину) и $T(0, \tau) = T_м$ = 20 °С (температура поверхности пластины, которая была до начала обдува). Как видно из таблицы, в момент τ = 0 направление движения влаги вблизи поверхности пластины изменяется на противоположное, т.е. вместо испарения влаги начинается ее конденсация ($J < 0$, $q > 0$). Конденсация влаги, в свою очередь, приводит к возрастанию влагосодержания вблизи поверхности U; поскольку конденсация сопровождается еще и выделением тепла, то она вызывает и повышение температуры вблизи поверхности T. Эти явления, происходящие вблизи момента τ = 0, отчетливо наблюдаются на рис. 2. Далее, в момент τ = 1,66 ч функция $q(\tau)$ изменяет знак на противоположный (табл. 1), т.е. заканчивается процесс конденсации влаги и начинается процесс сушки, который приблизительно к моменту τ = 4,0 ч выходит на установившийся режим (рис. 2); перепады температуры и влагосодержания в этом режиме, подсчитанные по формулам (12) и (13) и определенные по результатам численного эксперимента, находятся в хорошем согласии и составляют примерно ΔT = -0,32 °С, ΔU = 0,034.

Таблица 1

Интенсивность сушки J и плотность поверхностных источников тепла q в различные моменты времени при конвективной сушке

Table 1. **The intensity of the drying J [kg/(m^2·s)] and the density of the surface heat sources q [W/m^2] at different moments of time t [h] under convective drying**

τ, ч	–0	+0	0,103	0,413	0,800	1,66	2,01	2,40	3,02	τ>4,0
J·10^5, кг/(м^2·с)	2,87	–269	–113	–52,4	–23,8	0,0	3,20	5,02	6,23	6,68
q, Вт/м^2	–58,3	5460	2294	1064	483	0,0	–65	–102	–126	–136



а б

Рис. 2. Конвективная сушка. Распределения температуры (а) и влагосодержания (б) в различные моменты времени τ, ч. Температура T, °С: τ=0,01 (1); 0,04 (2); 0,07 (3); 0,19 (4); 0,44 (5); 0,88 (6). Влагосодержание U: τ=0,0135 (1); 0,26 (2); 1,06 (3); 2,00 (4); 4,00 (5); 8,39 (6)

Fig. 2. Convective drying. Distribution of temperature (a) and moisture content (б) in different moments of time τ, h. Temperature T, °C: τ=0.01 (1); 0.04 (2); 0.07 (3); 0.19 (4); 0.44 (5); 0.88 (6). The moisture content U: τ=0.0135 (1); 0.26 (2); 1.06 (3); 2.00 (4); 4.00 (5); 8.39 (6)

Таким образом, в переходном режиме поле $U(x,\tau)$ имеет характер волны повышения влагосодержания, которая распространяется от поверхности пластины к ее центру. Максимальный перепад влагосодержания наблюдается в переходном режиме; следовательно, именно в этом режиме будет наблюдаться и максимум механических деформаций образца [13]. Значит, для уменьшения деформаций следует избегать резких изменений температуры воздушного потока; время, за которое происходит повышение температуры воздуха, должно быть порядка времени переходного процесса.

Переходные процессы при инфракрасной сушке

Примем для всех опытов настоящего пункта в качестве неизменных такие значения параметров: $T_В$ = 20 °С; V/L = 5,0 с$^{-1}$; φ = 0,5; d = 2 см; U_0 = 0,4; $A = \tilde{A}$ = 0,75.

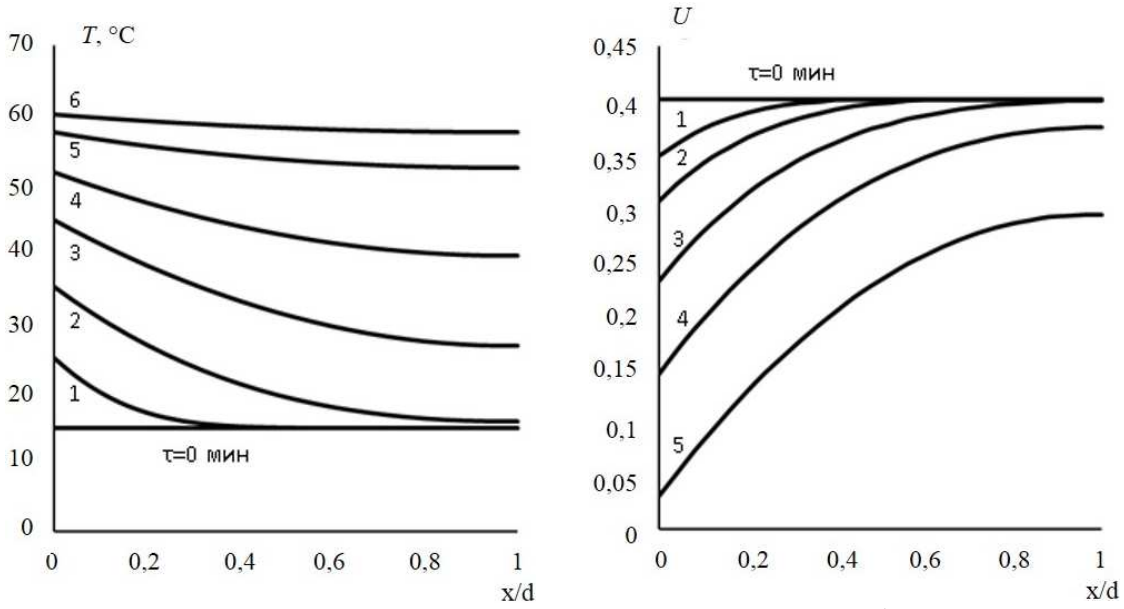
Решая, с учетом (7), уравнение (10) при S = 0, найдем температуру мокрого термометра $T_\infty = T_м$ = =13,7 °С, т.е. начальную температуру материала. Приняв для установившейся температуры поверхности при ИК сушке значение T_∞ = 60,0 °С, найдем из (10) и (11) интенсивность излучения и установившуюся интенсивность сушки: S = 3,91·10^3 Вт/м^2; J_∞ = 1,05·10^{-3} кг/(м^2·с).

Исследуем переходные процессы. В качестве материала возьмем глину. Результаты численных экспериментов показаны в табл. 2 и на рис. 3.

Таблица 2

Интенсивность сушки вида ИК как функция времени
***Table 2.* The intensity of IR drying as a function of time**

τ, мин	0	0,20	0,40	0,81	1,62	3,23	4,04	6,47	8,09	16,2	32,3	64,7	129
J·10^4 кг/(м^2·с)	0,290	0,864	1,12	1,49	2,07	2,93	3,26	4,20	4,65	6,84	9,27	10,3	10,5



а б

Рис. 3. Сушка вида ИК. Распределения температуры (а) и влагосодержания (б) в различные моменты времени τ, мин. Температура Т, °С: τ=0,40 (1); 2,43 (2); 8,09 (3); 16,2 (4); 32,3 (5); 150 (6). Влагосодержание U: τ=8,09 (1); 16,2 (2); 32,3 (3); 56,6 (4); 101 (5)
Fig. 3. Drying of IR form. Distribution of temperature (a) and moisture content (б) in different moments of time τ, min. Temperature T, °C: τ=0.40 (1); 2.43 (2); 8.09 (3); 16.2 (4); 32.3 (5); 150 (6). The moisture content U: τ=8.09 (1); 16.2 (2); 32.3 (3); 56.6 (4); 101 (5)

Как видно из представленных данных, к определенному моменту времени, который можно оценить как $\tau_{уст}$ = 35 мин, процесс действительно выходит на квазистационарный режим, причем характеристики этого режима T_∞, J_∞, ΔT и ΔU находятся в очень хорошем согласии с рассчитанными по формулам (10)-(13) значениями. В частности, перепады ΔT и ΔU и по расчетам, и по результатам численного эксперимента оказываются примерно такими: ΔT = -2,5 °С, ΔU = 0,26.

Таким образом, полученные данные говорят о том, что работа вычислительной программы происходит корректно.

Обратимся теперь к выводам, которые можно сделать о переходных процессах, развивающихся при $0 < \tau < \tau_{уст}$. В отличие от конвективной сушки, перепад влагосодержания и связанные с ним деформации достигают своих экстремальных значений не в переходном режиме, а в установившемся, т.е. при $\tau > \tau_{уст}$. Если установившийся перепад ΔU

оказывается недопустимо большим, то для его уменьшения следует или снизить интенсивность излучения, или применить инфракрасную сушку в *осциллирующем* режиме [2]. Как показано в работе авторов [3], снизить перепад влагосодержания в этой ситуации можно еще и за счет комбинированного воздействия на материал электромагнитными волнами с большой и малой глубиной проникновения.

ВЫВОДЫ

Предложена математическая модель процессов распространения тепла и влаги в плоском образце, который обдувается воздушным потоком и находится под воздействием инфракрасного излучения. Приведены результаты аналитического расчета установившихся полей температуры и влагосодержания для случаев конвективной сушки и сушки инфракрасным излучением, а также результаты численного расчета этих же полей в переходных режимах. Численный эксперимент позволяет оценить продолжительность переходного процесса, а также поведение перепада влагосодержания между границами пластины, с увеличением которого возрастает вероятность разрушения образца от механических деформаций. Показано, что для конвективной сушки такая опасность возникает в переходном режиме, что объясняется явлением конденсации пара на поверхности образца, а для инфракрасной сушки – в установившемся режиме, когда интенсивность сушки становится максимальной, а распределение влагосодержания – параболическим. Предложены способы организации сушки, при которых деформации образца снижаются до необходимого уровня. Полученные результаты могут найти применение для оптимизации работы различных технических устройств химической промышленности, в которых применяются конвективное или инфракрасное воздействия на влажные материалы.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и администрации Волгоградской области в рамках научного проекта 16-48-340527 «р_а».

ЛИТЕРАТУРА

1. **Натареев С.В., Венкин Е.Н., Натареев О.С.** Массоперенос в процессе сушки влажного материала при конвективном подводе теплоты. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2012. Т. 55. Вып. 3. С. 104-108.
2. **Рудобашта С.П., Зуева Г.А., Зуев Н.А.** Влияние термодиффузии на кинетику осциллирующей инфракрасной сушки. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2016. Т. 59. Вып. 4. С. 83-87.
3. **Афанасьев А.М., Сипливый Б.Н.** Оптимизация процесса электромагнитной сушки капиллярно-пористых материалов. *Изв. вузов. Электромеханика*. 2006. № 5. С. 3-10.
4. **Афанасьев А.М., Сипливый Б.Н.** Теория электромагнитной сушки: асимптотическое решение начально-краевой задачи для прямоугольной области. *Физика волновых процессов и радиотехнич. сис-мы*. 2012. Т. 15. № 1. С. 77-83.
5. **Афанасьев А.М., Сипливый Б.Н.** Асимптотические распределения температуры и влагосодержания при электромагнитной сушке образца, имеющего форму прямоугольного параллелепипеда. *Изв. вузов. Электромеханика*. 2012. № 3. С. 3-8.
6. **Афанасьев А.М., Сипливый Б.Н.** Задача о сушке шара электромагнитным излучением. *Инж.-физич. журн*. 2013. Т. 86. № 2. С. 322-330.
7. **Афанасьев А.М., Сипливый Б.Н.** Теория электромагнитной сушки: асимптотическое решение начально-краевой задачи для цилиндра. *Теоретич. основы хим. технологии*. 2014. Т. 48. № 2. С. 222-227.
8. **Лыков А.В.** Теория сушки. М.-Л.: Энергия. 1968. 471 с.
9. **Натареев О.С., Кокина Н.Р., Натареев С.В.** Теплоперенос в процессе конвективной сушки влажного материала. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2015. Т. 58. Вып. 2. С. 67-72.

REFERENCES

1. **Natareev S.V., Venken E.N., Natareev O.S.** Mass transfer in drying process of moist material at convective supply of heat. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.* 2012. V. 55. N 3. P. 104-108 (in Russian).
2. **Rudobashta, S.P., Zueva G.A., Zuev N.A.** The influence of diffusion on the kinetics of the oscillating infrared drying. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.* 2016. V. 59. N 4. P. 83-87 (in Russian).
3. **Afanasiev A.M., Siplivy B.N.** Process optimization of electromagnetic drying of capillary-porous materials. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Elektromekhanika*. 2006. N 5. P. 3-10 (in Russian).
4. **Afanasiev A.M., Siplivy B.N.** The theory of the electromagnetic drying: asymptotic solution of the initial-boundary value problem for a rectangular region. *Fizika volnovykh protsessov i radiotekhnich. sis-my*. 2012. V. 15. N 1. P. 77-83 (in Russian).
5. **Afanasiev A.M., Siplivy B.N.** The asymptotic distribution of temperature and moisture content using electromagnetic drying of the sample, having the shape of a rectangular parallelepiped. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Elektromekhanika.* 2012. N 3. P. 3-8 (in Russian).
6. **Afanas'ev A.M., Siplivyi B.N.** Problem of Electromagnetic Drying of a Sphere. *J. Eng. Phys. Thermophys.* 2013. V. 86. N 2. P. 340-348. DOI: 10.1007/s10891-013-0839-6.
7. **Afanas'ev A.M., Siplivyi B.N.** Theory of Electromagnetic Drying: An Asymptotic Solution of an Initial-Boundary Value Problem for a Cylinder. *Theor. Found. Chem. Eng.* 2014. V. 48. N 2. P. 206-211. DOI: 10.1134/S0040579514020018.
8. **Lykov A.V.** Theory of drying. M.-L.: Energiya. 1968. 471 p. (in Russian).
9. **Natareev S.V., Kokina N.R., Natareev O.S.** Heat transfer in the convective drying process of moist material. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.* 2015. V. 58. N 2. P. 67-72 (in Russian).

10. **Афанасьев А.М., Сипливый Б.Н.** О краевых условиях массообмена в виде законов Ньютона и Дальтона. *Инж.-физич. журн*. 2007. Т. 80. № 1. С. 27-34.
11. **Афанасьев А.М., Сипливый Б.Н.** Обобщение понятия температуры мокрого термометра на случай электромагнитной сушки. *Инж.-физич. журн*. 2016. Т. 89. № 3. С. 610-616.
12. **Афанасьев А.М., Сипливый Б.Н.** Математическое моделирование сушки электромагнитными волнами с малой глубиной проникновения. *Изв. вузов. Электромеханика*. 2008. № 5. С. 8-12.
13. **Афанасьев А.М., Конягин И.А., Михайлов В.К., Сипливый Б.Н.** Внутренние механические напряжения при сушке нагретым воздухом. Теоретич. основы хим. технологии. 2005. Т. 39. № 1. С. 95-100.

10. **Afanas'ev A.M., Siplivyi B.N.** Boundary-Mass Exchange Conditions in the Form of the Newton and Dalton Laws. *J. Eng. Phys. Thermophys.* 2007. V. 80. N 1. P. 28-35. DOI: 10.1007/s10891-007-0005-0.
11. **Afanas'ev A.M., Siplivyi B.N.** Generalization of the Wet-Bulb Temperature Notion to the Case of Electromagnetic Drying. *J. Eng. Phys. Thermophys.* 2016. V. 89. N 3. P. 620-626. DOI: 10.1007/s10891-016-1419-3.
12. **Afanasiev A.M., Siplivy B.N.** Mathematical modeling of drying of electromagnetic waves with a small penetration depth. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Elektromekhanika.* 2008. N 5. P. 8-12 (in Russian).
13. **Afanasiev A.M., Konyagin I.A., Mikhailov V.K., Siplivy B.N.** Internal mechanical stresses in hot air drying. *Theor. Found. Chem. Eng.* 2005. V. 39. N 1. P. 92-97. DOI: 10.1007/s11236-005-0014-7.

Поступила в редакцию 22.02.2017
Принята к опубликованию 05.05.2017

Received 22.02.2017
Accepted 05.05.2017