

УДК 532.546+536.24: 666.3.047

UDC 532.546+536.24: 666.3.047

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ  
ТЕПЛО- И МАССОПЕРЕНОСА ПРИ  
АДСОРБЦИОННО-КОНТАКТНОЙ СУШКЕ  
КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ  
(ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ)**

**MATHEMATICAL MODELLING OF HEAT AND  
MASS TRANSFER DURING ADSORPTION-  
CONTACT DRYING OF CERAMIC MATERIALS  
(COMPUTING EXPERIMENT)**

Дорняк Ольга Роальдовна  
д.т.н., доцент

Dornyak Olga Roaldovna  
Dr.Sci.Tech., associate professor

Аль Сарраджи Салах Хусейн Мела  
аспирант  
*ФГБОУ ВПО «Воронежская государственная  
лесотехническая академия», Воронеж, Россия*

Al' Sarradzhi Salakh Hussein Mela  
postgraduate student  
*Voronezh State Forestry Academy, Voronezh, Russia*

Усачев Александр Михайлович  
к.т.н., доцент

Usachev Aleksandr Mihajlovich  
Cand.Tech.Sci., associate professor

Шмит'ко Евгений Иванович  
д.т.н., профессор  
*ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный  
архитектурно-строительный университет»*

Shmit'ko Evgeniy Ivanovich  
Dr.Sci.Tech., professor  
*Voronezh State University of Architecture and Civil  
Engineering, Voronezh, Russia*

Рассмотрен предельный однотемпературный вариант общей модели адсорбционно-контактной сушки керамического кирпича. Для одномерного приближения проведено численное моделирование процессов тепло- и массопереноса в образцах донора и акцептора. Показано, в частности, что коэффициент теплопроводности материала в зоне контакта может существенно изменяться вследствие изменения условий для жидкофазного переноса

One-temperature limited version of the general model of adsorption-contact drying for the ceramic brick is considered. Numerical modeling of heat and mass transfer in the donor and the acceptor samples for one-dimensional approach is carried out. It is shown, in particular, that the moisture diffusion coefficient of material in the contact zone can vary significantly due to changes in the conditions for liquid-phase transfer

Ключевые слова: МАТЕМАТИЧЕСКОЕ  
МОДЕЛИРОВАНИЕ, КЕРАМИЧЕСКИЕ  
МАТЕРИАЛЫ, АДСОРБЦИОННО-КОНТАКТНАЯ  
СУШКА

Keywords: MATHEMATICAL MODELING,  
CERAMIC MATERIALS, ADSORPTION-CONTACT  
DRYING

**Введение.** Для сушки кирпичей, изготовленных из высокочувствительного к термообработке сырья, разработана оригинальная технология применения адсорбционно-контактной сушки (АКС), уменьшающая вероятность растрескивания образцов [1-2]. Сущность такого метода заключается в следующем. Отформованный сырец помещается на подложку из пористого материала с высокой влагоемкостью и накрывается сверху влагонепроницаемым колпаком. Подложка с тыльной стороны подвергается высушиванию теплоносителем.

Тем самым осуществляется диффузия влаги из сырца в подложку, а уже за счет подачи и отбора сушильного агента происходит интенсивная конвективная сушка самой подложки [1]. Адсорбционно-контактный метод позволяет снизить нежелательную тепловую нагрузку на материал и одновременно усилить эффективность сушки [3-4]. Поиск эффективных режимов АКС требует решения задач тепло- и массопереноса в капиллярно-пористых телах с учетом особенностей технологического процесса и структурных свойств материалов. Задачи данного типа исследуются методами математического моделирования, при этом известны различные подходы созданию моделей. Метод математического моделирования, наиболее известный среди инженеров, связан с именем А.В. Лыкова [5]. Широко используется теория многофазной фильтрации [3,7]. Работы по механике многофазных систем Р.И. Нигматулина [6] позволили создать математические модели сушки дисперсных систем с учетом специфики механизмов переноса и взаимодействия отдельных фаз. Ряд современных направлений в теории сушки основан на идеях иерархического моделирования [4].

В первой части публикуемой работы синтезирована математическая модель тепломассопереноса при АКС керамического кирпича на основе методологии многофазных систем [6]. В данной части исследован предельный, более простой, вариант этой модели, который близок по форме к диффузионно-фильтрационной модели А.В.Лыкова [5] и получен при следующих предположениях [8-9]. Температура всех фаз дисперсной системы одинакова (однотемпературное приближение). Фазовые переходы происходят по равновесной схеме. Вкладом работы внутренних сил по расширению парогазовой фазы и влиянием конвективного переноса тепла в этой фазе можно пренебречь.

**Физическая постановка задачи.** Рассмотрим часть плиты посредника из тонкопористого материала, на которой уложена заготовка глиняного кирпича. Сверху кирпич прикрыт влагозащитным колпаком. Система находится в конвективной сушильной камере при атмосферном

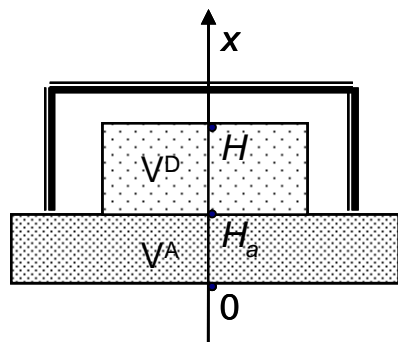


Рисунок 1 - Расчетная схема адсорбционно-контактной сушки глиняного сырца.

давлении с заданными характеристиками сушильного агента - температурой  $T_c$  и относительной влажностью  $\varphi_c$ . Ставится задача изучения особенностей развития полей влажности, температуры, давления в составном образце, содержащем кирпич (донор) и посредник (акцептор).

Предположим, что поля влагосодержания, температуры, общего давления и концентрации пара однородны в направлении осей  $y$  и  $z$ , так что  $u=u(t,x)$ ,  $T=T(t,x)$ ,  $p=p(t,x)$ ,  $\chi=\chi(t,x)$  (рисунок 1). Тогда для изучения процессов переноса достаточно рассмотреть задачу в одномерном приближении.

**Математическая модель.**

Уравнение влагопроводности в составном образце запишем в виде

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( a_m \frac{\partial u}{\partial x} \right) - \frac{s_{12} j}{a_3 r_3^o},$$

$$s_{12} = \begin{cases} s_{12}^A, & x \in V^A \\ s_{12}^D, & x \in V^D \end{cases}; \quad a_3 = \begin{cases} a_3^A, & x \in V^A \\ a_3^D, & x \in V^D \end{cases}; \quad r_3^o = \begin{cases} r_3^{oA}, & x \in V^A \\ r_3^{oD}, & x \in V^D \end{cases}. \quad (1)$$

где коэффициент диффузии  $a_m$  зависит от изменяющихся значений влагосодержания, температуры и проницаемости [8-9]:

$$a_m = \frac{K_{23}}{m_2} \cdot \frac{RTu}{\bar{v}} \cdot \frac{1}{j} \frac{\partial j}{\partial u}; \quad K_{23} = \begin{cases} K_{23}^A, & x \in V^A \\ K_{23}^D, & x \in V^D \end{cases}. \quad (2)$$

В данной работе влияние на фильтрационный перенос насыщенности

соответствующей фазой не рассматривается, т.е. функции относительной проницаемости  $\Psi_1(q_1) = 1$  и  $\Psi_2(q_{2cm}) = 1$ . Как видно из (2), для описания кинетики влагопереноса необходимы уравнения политерм сорбции и для донора и для акцептора -

$$u = f^A(T, j); u = f^D(T, j). \quad (3)$$

Уравнение теплопроводности представляется в следующей форме

$$cr \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} (l \frac{\partial T}{\partial x}) + Ler \frac{\partial u}{\partial t}; \quad (4)$$

$$cr = c_{p1} r_1^o a_1 + c_{p2} r_2^o a_2 + c_{p3} r_3^o a_3, \quad l = a_1 l_1 + a_2 l_2 + a_3 l_3;$$

$$c_{pi} = \begin{cases} c_{pi}^A, x \in V^A \\ c_{pi}^D, x \in V^D \end{cases}; r_3^o = \begin{cases} r_3^{oA}, x \in V^A \\ r_3^{oD}, x \in V^D \end{cases}; a_i = \begin{cases} a_i^A, x \in V^A \\ a_i^D, x \in V^D \end{cases}; l_i = \begin{cases} l_i^A, x \in V^A \\ l_i^D, x \in V^D \end{cases};$$

$$i=1,2,3.$$

Объемная концентрация отдельных фаз вычисляется по формулам

$$a_2 \approx \frac{u a_3 r_3^o}{r_2^o}; \quad a_1 = 1 - a_2 - a_3. \quad (5)$$

Коэффициент фазовых переходов зависит от влажности, температуры и давления пара [8-9]:

$$e = \frac{c_{v1}}{L} \frac{1}{1+u} (T - T_{sat}(p_{1V})). \quad (6)$$

Уравнение давления парогазовой смеси имеет вид

$$\frac{\partial p_1}{\partial t} = p_1 \frac{K_{13}}{m_1} \frac{\partial^2 p_1}{\partial x^2} + \frac{p_1}{T} \frac{\partial}{\partial x} (a \frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{p_1}{T} \frac{Le}{c} \frac{\partial}{\partial x} (a_m \frac{\partial u}{\partial x}) +$$

$$+ \frac{p_1}{B_1} \frac{\partial B_1}{\partial t} - \frac{p_1}{a_1} \frac{\partial a_1}{\partial t} + \frac{s_{12} j T_1 B_1}{a_1} - \frac{p_1}{T} \frac{Le}{c} \frac{s_{12} j}{a_3 r_3^o}; \quad (7)$$

$$K_{13} = \begin{cases} K_{13}^A, x \in V^A \\ K_{13}^D, x \in V^D \end{cases}.$$

Для вычисления полей концентраций паровой и газовой

компоненты в паровоздушной фазе -

$$c = \frac{r_{1V}^o}{r_1^o} \text{ и } 1 - c = \frac{r_{1g}^o}{r_1^o} \quad (8)$$

служит следующее уравнение:

$$\frac{\partial(r_1^o a_1(1 - c))}{\partial t} + \frac{\partial(r_1^o a_1(1 - c)(v_1^3 + w_{1g}^3))}{\partial x_3} = 0; \quad (9)$$

$$w_{1g} = \frac{r_1^o}{r_{1g}^o} D \frac{\partial c}{\partial x}; \quad v_1 = -\frac{K_{13}}{m_1} \frac{\partial p_1}{\partial x}.$$

Уравнения состояния идеального газа для смеси и ее компонент имеют вид

$$p_1 = r_1^o T B_1; \quad p_{1g} = r_{1g}^o T B_{1g}; \quad p_{1V} = r_{1V}^o T B_{1V}.$$

$$B_1 = c B_{1V} + (1 - c) B_{1g}; \quad r_1^o = r_{1V}^o + r_{1g}^o. \quad (10)$$

Интенсивность фазовых переходов, определяемая в многофазной модели с помощью соотношения Герца-Кнудсена-Ленгмюра, после предельного перехода к однотемпературной модели записывается в виде

$$j = \frac{k_1 [p_{sat}(T) - p_{1V}(T)]}{\sqrt{2p B_{1V} T_{sat}(p_{1V})}}. \quad (11)$$

Формула (11) уже не имеет первоначального физического смысла, связанного с оценкой разности молекулярных потоков от поверхности жидкости в пар и обратно [10], и  $k_1$  – не является коэффициентом аккомодации. Для вычисления  $j$ , таким образом, имеем аналог формулы Дальтона (уравнения удельной поверхностной влагоотдачи) [4,11], согласно которой массовая скорость испарения жидкости с поверхности осушаемого образца в установившемся процессе

$$j = k_2 \frac{p_{sat}(T) - p_{1V}(T)}{p_{atm}}, \quad k_2 = KS,$$

где  $K$  – коэффициент, зависящий от гидродинамических условий на

поверхности,  $S$  – геометрическая площадь поверхности образца.

Для определения давления насыщенного пара при данной температуре воспользуемся известной формулой Антуана, которая аппроксимирует кривую фазовых переходов 1 рода в диапазоне изменения температуры 284 – 441 K следующим образом [12]:

$$p_{sat} = e^{A_s - B_s / (T + C_s)}. \quad (12)$$

Здесь величина  $p_{sat}$  имеет размерность *мм. рт.ст.* Константы в (12) имеют следующие значения  $A_s = 18.3036$ ;  $B_s = 3816.44$ ;  $C_s = -46.13$  [12].

**Начальные условия** задают произвольное распределение зависимых переменных:

$$u(0, x) = u_0(x); \quad u_0 = \begin{cases} u_0^A, & x \in V^A \\ u_0^D, & x \in V^D \end{cases}. \quad (13)$$

$$T(0, x) = T_0(x); \quad p_1(0, x) = p_{10}(x); \quad c(0, x) = c_0(x); \quad c_0 = \begin{cases} c_0^A, & x \in V^A \\ c_0^D, & x \in V^D \end{cases}.$$

Отметим, что функция  $c_0(x)$  не является независимой функцией. Концентрация пара в образце однозначно определяется величиной относительной влажности воздуха, которая в равновесных условиях связана с влажностью материала уравнениями политермы сорбции (3).

**Граничные условия.** Влагосодержание на границах донора и акцептора соответствует своим равновесным значениям при соответствующих значениях температуры и относительной влажности сушильного агента и паровоздушной смеси под влагоизолирующим колпаком:

$$u|_{x=0} = f^A(T_c, j_c); \quad u|_{x=H} = f^D(T_k, j_k). \quad (14)$$

Для температуры на внешних границах составного образца ставятся условия Ньютона-Рихмана

$$I^A \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = a^{\Gamma_A} (T \Big|_{x=0} - T_k) ; I^D \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=H} = -a^{\Gamma_D} (T \Big|_{x=H} - T_k). \quad (15)$$

Граничные значение давления парогазовой смеси и концентрации каждой из компонент в капиллярно-пористом образце полагаем равными соответствующим значениям в соседнем объеме – в сушильной камере для акцептора (подложки) и в пространстве под колпаком для донора (высушиваемого образца) –

$$c \Big|_{x=0} = c_c ; p_1 \Big|_{x=0} = p_c ; c \Big|_{x=H} = c_k ; p_1 \Big|_{x=H} = p_k. \quad (16)$$

**Параметры сушильного агента под влагоизолирующим колпаком**  
 $T_k, p_k, \chi_k$  изменяются в процессе сушки. Они определяются из решения сопряженной задачи тепломассопереноса в образце и в среде под колпаком. Поведение парогазовой фазы, заполняющей негерметичный объем сложной формы, ограниченный поверхностями материалов с различной степенью проницаемости – весьма сложная и существенно неоднородная задача. Методика ее приближенного решения построена в [13], следуя [14].

Уравнения сохранения массы записаны, в балансовой форме для воды, паровой и газовой компонент:

$$\frac{dM_{1V}}{dt} = m_{1V}^A + m_{1V}^D - m_{1V_c} - m_2; \quad (17)$$

$$\frac{dM_{1g}}{dt} = m_{1g}^A + m_{1g}^D - m_{1g_c}; \quad (18)$$

$$\frac{dM_2}{dt} = m_2; \quad m_2 = -jS ; \quad j = \frac{k[p_{sat}(T_k) - p_{1V_k}]}{\sqrt{2pB_{1V}T_{sat}(p_{1V_k})}}. \quad (19)$$

В уравнениях (17-19) учтено, что масса воды и масса пара изменяются за счет процессов испарения или конденсации на поверхностях, ограничивающих паровоздушный слой, а также за счет массовых потоков на границе с капиллярно-пористыми телами донора и

акцептора и вследствие массообмена через возможные негерметичности в зонах контакта плиты и посредника. При этом приближенно можно полагать, что

$$m_{1V}^D = (r_{1V}^o v_{1V})_{x=H} S^D, m_{1g}^D = (r_{1g}^o v_{1g})_{x=H} S^D;$$

$$m_{1V}^A = (r_{1V}^o v_{1V})_{x=H_a} S^A, m_{1g}^A = (r_{1g}^o v_{1g})_{x=H_a} S^A.$$

Для вычисления расхода парогазовой смеси через возможные отверстия между плитой акцептора и колпаком используется формула, основанная на теореме Бернулли:

$$m_{1c} = \alpha_m \epsilon_m S_c \sqrt{2 r_{1k}^o (p_{1k} - p_c)}, \quad (20)$$

где  $\alpha_m$  - коэффициентом расхода сужающего устройства,  $\epsilon_m$  - поправочный множитель, учитывающий уменьшение плотности вещества при его прохождении через сужающее устройство,  $S_c$  – площадь отверстия [15]. Будем считать, что расход паровой и газовой компонент в отдельности из объема под в колпаком в сушильную камеру пропорционален их концентрации:

$$m_{1Vc} = m_{1c} c_k, c_k = \frac{M_{1V}}{M_1}; m_{1gc} = m_{1c} (1 - c_k), \frac{M_{1g}}{M_1} = 1 - c_k. \quad (21)$$

Если смесь движется в обратном направлении, то значения расхода пропорциональны соответствующим концентрациям в среде сушильного агента.

Балансовое уравнение для температуры в паровоздушном слое между образцом и защитной поверхностью имеет вид:

$$\begin{aligned} & (M_{1V} c_{V1V} + M_{1g} c_{V1g} + M_2 c_{p2}) \frac{dT_k}{dt} = m_{1V}^D (i_{1V}^D - c_{V1V} T_k) + m_{1g}^D (i_{1g}^D - c_{V1g} T_k) + \\ & + m_{1V}^A (i_{1V}^A - c_{V1V} T_k) + m_{1g}^A (i_{1g}^A - c_{V1g} T_k) - m_{1Vc} (i_{1Vc} - c_{V1V} T_k) - \\ & - m_{1gc} (i_{1gc} - c_{V1g} T_k) + m_2 (c_{p2} - c_{p1V}) T_k + q_{гр}^A + q_{гр}^D + q_{грк}. \end{aligned} \quad (22)$$



$$i_{1V}^D = c_{p1V} T \Big|_{x=H}, \quad i_{1g}^D = c_{p1g} T \Big|_{x=H}, \quad i_{1V}^A = c_{p1V} T \Big|_{x=H_a}, \quad i_{1g}^A = c_{p1g} T \Big|_{x=H_a},$$

$$i_{1V_c} = c_{p1V} T_c, \quad i_{1g_c} = c_{p1g} T_c,$$

$$q_{гр}^D = -a^D (T_k - T|_{x=H}) S^D, \quad q_{гр}^A = -a^A (T_k - T|_{x=H_a}) S^A, \quad q_{грk} = -a_k (T_k - T_c) S_k.$$

Начальные условия для уравнений (17-19, 22) приняты в предположении, что температурно-влажностное состояние газообразной фазы под влагоизолирующим колпаком при  $t=0$  совпадает с характеристиками сушильного агента в камере:

$$T_k(0) = T_c, \quad p_{1k}(0) = p_c; \quad j_k(0) = j_c. \quad (23)$$

По заданному значению  $\varphi_c$  определяем начальную концентрацию паровой и газовой компонент ( $\chi_c$  и  $(1-\chi_c)$  соответственно) с помощью известных соотношений [16]:

$$d_c = \frac{0.622 j_c p_{sat}(T_c)}{p_c - j_c p_{sat}(T_c)}, \quad c_c = \frac{d_c}{1 + d_c},$$

$$M_{1g}(0) = (1 - c_c) M_1(0), \quad M_{1V}(0) = c_c M_1(0). \quad (24)$$

Величина начальной массы паровоздушной смеси под влагоизолирующим колпаком -

$$M_1(0) = V r_c; \quad r_c = \frac{p_c}{B_{1c} T_c}; \quad B_c = B_{1g} (1 - c_c) + B_{1V} c_c. \quad (25)$$

Масса конденсированной фазы в начальный момент времени

$$M_2(0) = M_{20}. \quad (26)$$

Система нелинейных дифференциальных уравнений (1, 4, 7, 9, 17-19, 22), дополненная уравнениями состояния (10-12), начальными (13, 23-26) и граничными условиями (14-16) описывает нестационарный тепло- и массоперенос при адсорбционно-контактной сушке образцов из двух различных материалов в одномерном приближении.

### **Безразмерная форма начально-краевой задачи.**

Приведем сформулированную задачу тепломассообмена к

безразмерному виду. В качестве единиц величин с независимой размерностью используем характерный размер заготовки  $l_{хар}$ , характерное время процесса  $t_{хар}$ , давление  $p_{хар}$ , температуру  $T_{хар}$ . Безразмерные переменные определим следующим образом:

$$x^* = \frac{x}{l_{хар}}; t^* = \frac{t}{t_{хар}}; u^* = \frac{u}{u_{хар}}; a_m^* = \frac{a_m}{a_{m_{хар}}}; a_{m_{хар}} = \frac{K_{23_{хар}} RT_{хар}}{m_{2_{хар}} \bar{v}}; p_1^* = \frac{p_1}{p_{хар}};$$

$$r_i^* = \frac{r_i}{r_{хар}}; s_{12}^* = s_{12} l_{хар}; m_2^* = \frac{m_2}{m_{2_{хар}}}; K_{23}^* = \frac{K_{23}}{K_{хар}}; K_{13}^* = \frac{K_{13}}{K_{хар}}; c_{V1}^* = \frac{c_{V1}}{c_{хар}};$$

$$j^* = \frac{j}{j_{хар}}; B_1^* = \frac{B_1}{B_{хар}}; T_i^* = \frac{T_i}{T_{хар}}; v_{хар} = \frac{l_{хар}}{t_{хар}}; a_{хар} = \frac{l_{хар}}{r_{хар} c_{хар}}; r_{хар} = \frac{p_{хар}}{v_{хар}^2};$$

$$c_{хар} = B_{хар}; B_{хар} = \frac{v_{хар}^2}{T_{хар}}; j_{хар} = \frac{\Delta u_{хар} r_{хар} l_{хар}}{t_{хар}}; m_{хар} = \frac{M_{хар}}{t_{хар}}; M_{хар} = r_{хар} l_{хар}^3.$$

Безразмерные уравнения переноса в материале донора и акцептора имеют вид:

$$\frac{\partial u^*}{\partial t^*} = \frac{1}{Pe_m} \frac{\partial}{\partial x^*} \left( a_m^* \frac{\partial u^*}{\partial x^*} \right) - \frac{\Delta u_{хар} s_{12}^* j^*}{u_{хар} a_3 r_3^{o*}}; a_m^* = \frac{K_{23}^*}{m_2^* (T^*)} \cdot \frac{RT^* u^*}{\bar{v}} \cdot \frac{1}{j} \frac{\partial j}{\partial u};$$

$$K_{23}^* = \begin{cases} K_{23}^{A*}, x \in V^A \\ K_{23}^{D*}, x \in V^D \end{cases}; s_{12}^* = \begin{cases} s_{12}^{A*}, x \in V^A \\ s_{12}^{D*}, x \in V^D \end{cases}; a_3 = \begin{cases} a_3^A, x \in V^A \\ a_3^D, x \in V^D \end{cases};$$

$$r_3^{o*} = \begin{cases} r_3^{oA*}, x \in V^A \\ r_3^{oD*}, x \in V^D \end{cases}; u^* = f^A(T^* \cdot j); u^* = f^D(T^* \cdot j).$$

$$c^* r^* \frac{\partial T^*}{\partial t^*} = \frac{1}{Pe} \frac{\partial}{\partial x^*} \left( I^* \frac{\partial T^*}{\partial x^*} \right) + Ko \cdot er^* \frac{\partial u^*}{\partial t^*};$$

$$c^* r^* = c_{p1}^* r_1^{o*} a_1 + c_{p2}^* r_2^{o*} a_2 + c_{p3}^* r_3^{o*} a_3, I^* = a_1 l_1^* + a_2 l_2^* + a_3 l_3^*;$$

$$c_{pi}^* = \begin{cases} c_{pi}^{A*}, x \in V^A \\ c_{pi}^{D*}, x \in V^D \end{cases}; I_i^* = \begin{cases} I_i^{A*}, x \in V^A \\ I_i^{D*}, x \in V^D \end{cases}; r_3^{o*} = \begin{cases} r_3^{oA*}, x \in V^A \\ r_3^{oD*}, x \in V^D \end{cases};$$

$$a_i = \begin{cases} a_i^A, x \in V^A \\ a_i^D, x \in V^D \end{cases}; i=1,2,3. \quad K_{13}^* = \begin{cases} K_{13}^{A*}, x \in V^A \\ K_{13}^{D*}, x \in V^D \end{cases};$$

$$e = \frac{c_{V1}^*}{Ku} \frac{1}{1+u} (T^* - T_{sat}^*(p_{1V}^*)).$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial p_1^*}{\partial t} = & p_1^* \frac{Da_{13} Re_1}{M_g} \frac{\partial^2 p_1^*}{\partial x^{*2}} + \frac{1}{Pe} \frac{p_1^*}{c^* r^* T^*} \frac{\partial}{\partial x^*} (I^* \frac{\partial T^*}{\partial x^*}) + \\ & + Da_{23} Re_2 Kl_2 \frac{p_1^* e}{c^* T^*} \frac{\partial}{\partial x^*} (a_m^* \frac{\partial u^*}{\partial x^*}) + \frac{p_1^*}{B_1^*} \frac{\partial B_1^*}{\partial t^*} - \frac{p_1^*}{a_1} \frac{\partial a_1}{\partial t^*} + \\ & + \frac{\Delta u_{xap}}{M_g} \frac{a_3 r_3^{o*} s_{12} j^* T^* B_1^*}{a_1} - \frac{p_1^*}{T^*} e \cdot Ko \frac{s_{12} j^*}{c^*}; \end{aligned}$$

$$\frac{\partial (r_1^{o*} a_1 (1-c))}{\partial t^*} + \frac{1}{Pe_{1D}} \frac{\partial}{\partial x^*} \left[ r_1^{o*} a_1 (1-c) \frac{r_1^{o*}}{r_{1g}^{o*}} \frac{\partial c}{\partial x^*} \right] -$$

$$- Re_1 Da_{13} \frac{\partial}{\partial x^*} \left[ r_1^{o*} a_1 (1-c) \frac{r_1^{o*}}{r_{1g}^{o*}} \frac{\partial p_1^*}{\partial x^*} \right] = 0;$$

$$p_1^* = M_g r_1^{o*} T^* B_1^*; \quad p_{1g}^* = M_g r_{1g}^{o*} T^* B_{1g}^*; \quad p_{1V}^* = M_g r_{1V}^{o*} T^* B_{1V}^*.$$

$$B_1^* = c B_{1V}^* + (1-c) B_{1g}^*; \quad r_1^{o*} = r_{1V}^{o*} + r_{1g}^{o*},$$

$$c = \frac{r_{1V}^{o*}}{r_1^{o*}}; \quad 1-c = \frac{r_{1g}^{o*}}{r_1^{o*}}; \quad a_2 \approx \frac{u^* a_3 r_3^{o*}}{r_2^{o*}}; \quad a_1 = 1 - a_2 - a_3.$$

$$j^* = \frac{k_1 [p_{sat}^*(T^*) - p_{1V}^*(T^*)]}{\sqrt{2p B_{1V}^* T_{sat}^*(p_{1V}^*)}}; \quad p_{sat}^*(T^*) = e^{A_s - B_s / (T^* T_{xap} + C_s)} \cdot 133.322 / p_{xap}$$

$$u^*(0, x^*) = u_0^*(x^*); \quad u_0^* = \begin{cases} u_0^{A*}, x \in V^A \\ u_0^{D*}, x \in V^D \end{cases}; \quad T^*(0, x^*) = T_0^*(x^*).$$

$$p_1^*(0, x^*) = p_{10}^*(x^*); \quad c(0, x^*) = c_0(x^*); \quad c_0 = \begin{cases} c_0^A, x \in V^A \\ c_0^D, x \in V^D \end{cases}.$$

$$u^* \Big|_{x^*=0} = f^A(T_c^* j_c); \quad u^* \Big|_{x^*=H^*} = f^D(T_k^* j_k);$$

$$\left. \frac{\partial T^*}{\partial x^*} \right|_{x^*=0} = Bi^{\Gamma A} (T^* \Big|_{x^*=0} - T_c^*); \quad \left. \frac{\partial T^*}{\partial x^*} \right|_{x^*=H^*} = -Bi^{\Gamma D} (T^* \Big|_{x^*=H^*} - T_k^*);$$

$$c \Big|_{x^*=0} = c_c; \quad p_1 \Big|_{x^*=0} = p_c^*; \quad c \Big|_{x^*=H^*} = c_k; \quad p_1 \Big|_{x^*=H^*} = p_k^*. \quad (27)$$

Безразмерные уравнения баланса массы (пара, газа, конденсированной жидкости) и теплоты под влагоизолирующим колпаком получены в виде

$$\frac{dM_{1V}^*}{dt^*} = m_{1V}^{A*} + m_{1V}^{D*} - m_{1V_c}^* - m_2^*; \quad \frac{dM_{1g}^*}{dt^*} = m_{1g}^{A*} + m_{1g}^{D*} - m_{1g_c}^*;$$

$$\frac{dM_2^*}{dt^*} = m_2^*; \quad m_2^* = -j^* S^* ;$$

$$\left( M_{1V}^* c_{V1V}^* + M_{1g}^* c_{V1g}^* + M_2^* c_{p2}^* \right) \frac{dT_k^*}{dt^*} = m_{1V}^{D*} (i_{1V}^{D*} - c_{V1V}^* T_k^*) + m_{1g}^{D*} (i_{1g}^{D*} - c_{V1g}^* T_k^*) +$$

$$+ m_{1V}^{A*} (i_{1V}^{A*} - c_{V1V}^* T_k^*) + m_{1g}^{A*} (i_{1g}^{A*} - c_{V1g}^* T_k^*) - m_{1V_c}^* (i_{1V_c}^* - c_{V1V}^* T_k^*) -$$

$$- m_{1g_c}^* (i_{1g_c}^* - c_{V1g}^* T_k^*) - (c_{p2}^* - c_{V1V}^*) T_k^* \frac{k[p_{sat}^*(T_k^*) - p_{1V_k}^*]}{\sqrt{2p_{1V}^* T_{sat}^*(p_{1V_k}^*)}} S^* -$$

$$- \frac{Nu^D}{Pe_T} S^{D*} (T_k^* - T^* \Big|_{x^*=H^*}) - \frac{Nu^A}{Pe_T} S^{A*} (T_k^* - T^* \Big|_{x^*=H_a^*}) - \frac{Nu^k}{Pe_T} S_k^* (T_k^* - T_c^*);$$

$$i_{1V}^{D*} = c_{p1V}^* T^* \Big|_{x^*=H^*}; \quad i_{1g}^{D*} = c_{p1g}^* T^* \Big|_{x^*=H^*}; \quad i_{1V}^{A*} = c_{p1V}^* T^* \Big|_{x^*=H_a^*}; \quad i_{1g}^{A*} = c_{p1g}^* T^* \Big|_{x^*=H_a^*};$$

$$i_{1V_c}^* = c_{p1V}^* T_c^*; \quad i_{1g_c}^* = c_{p1g}^* T_c^* .$$

$$m_{1V}^{D*} = \left( r_{1V}^{o*} v_{1V}^* \right)_{x^*=H^*} S^{D*}; \quad m_{1g}^{D*} = \left( r_{1g}^{o*} v_{1g}^* \right)_{x^*=H^*} S^{D*}; \quad m_{1V}^{A*} = \left( r_{1V}^{o*} v_{1V}^* \right)_{x^*=H_a^*} S^{A*};$$

$$m_{1g}^{A*} = \left( r_{1g}^{o*} v_{1g}^* \right)_{x^*=H_a^*} S^{A*}; \quad m_{1c}^* = a_m e_m S^{c*} \sqrt{2r_{1k}^{o*} (p_{1k}^* - p_c^*)};$$

$$c_k = \frac{M_{1V}^*}{M_1^*}, \quad m_{1V_c}^* = m_{1c}^* c_k, \quad m_{1g_c}^* = m_{1c}^* (1 - c_k).$$

$$T^*(0) = T_c^*, \quad M_{1V}^*(0) = c_c M_1^*(0), \quad M_{1g}^*(0) = (1 - c_c) M_1^*(0), \quad M_2^*(0) = 0. \quad (28)$$

**Вычислительный эксперимент.** Система уравнений (27-28) исследована численно. Дискретный аналог уравнений в частных производных построен методом контрольного объема [17]. Обыкновенные дифференциальные уравнения решаются с использованием метода Рунге-Кутты. Вычислительный алгоритм является итерационным в связи с нелинейностью поставленной задачи. Тестирование программного комплекса проведено на основе ряда точных решений уравнений с дополнительными источниковыми членами. Сравнивая расчетные зависимости среднего влагосодержания сырца и данные опытов (рисунок 4), можно сделать вывод об их удовлетворительном совпадении.

На рисунках 2-7 представлены результаты численного анализа, иллюстрирующие особенности процессов тепло- и массопереноса при адсорбционно-контактной сушке образцов, полученных из высокочувствительной глины способом пластического формования. В качестве посредника рассматривается цементный камень ( $V/C=0,4$ ).

Сорбционные свойства материалов описаны с использованием уравнения Л.Б. Цимерманиса, полученного на основе термодинамического анализа [18]. Для типичных капиллярно-пористых тел это уравнение имеет вид

$$u = u_{MG} j^{a_0 k^j},$$

где  $u$  – равновесное влагосодержание,  $\varphi$  – относительная влажность воздуха,  $a_0$  и  $k$  – безразмерные постоянные, называемые соответственно структурной активностью капиллярно-пористого материала и коэффициентом приращения активности связи. Как показано в [18], равновесное влагосодержание цементного камня снижается с увеличением температуры, и для максимального гигроскопического влагосодержания справедливо соотношение

$$u_{MG} = u_{S0} - a_{ST}(T - 273).$$

Здесь  $u_{S0}$  - максимальное гигроскопическое содержание при  $T=273$  К,  $\alpha_{ST}$  – постоянный множитель.

Расчеты выполнены при следующих значениях теплофизических параметров.

Водяной пар и воздух:  $R=8.3144$  Дж/(моль·К);  $B_{1v}=461.9$  Дж/(кг·К);  $B_{1g}=284$  Дж/(кг·К);  $\mu_1=10^{-6}$  Па·с;  $\lambda_1=0.0248$  Вт/(м·К);  $c_{p1v}=2.034 \cdot 10^3$  Дж/(кг·К);  $c_{p1g}=9.05 \cdot 10^2$  Дж/(кг·К);  $c_{v1v}=1.58 \cdot 10^3$  Дж/(кг·К);  $c_{v1g}=7.07 \cdot 10^2$  Дж/(кг·К);  $p_{atm}=1.013 \cdot 10^5$ ;  $\mu_1=10^{-6}$  Па·с;  $D=2.16 \cdot 10^{-5}$  м<sup>2</sup>/с.

Вода:  $\rho_2^0=10^3$  кг/м<sup>3</sup>;  $\mu_2=10^{-3}$  Па·с;  $V'_2=18 \cdot 10^{-6}$  м<sup>3</sup>/моль;  $\lambda_2=0.648$  Вт/(м·К),  $c_2=4.2 \cdot 10^3$  Дж/(кг·К);  $L=2.25 \cdot 10^6$  м<sup>3</sup>/моль;  $\kappa_1=1.875 \cdot 10^{-11}$ ;  $\kappa=0.04$ ;  $K_{23}=10^{-17}-10^{-18}$  м<sup>2</sup>;  $K_{13}=10^{-11}-10^{-12}$  м<sup>2</sup>.

Донор:  $\rho_3^0=2370$  кг/м<sup>3</sup>;  $\rho=1400$  кг/м<sup>3</sup>;  $\lambda_3=0.73$  Вт/(м·град),  $c_3=0.796 \cdot 10^3$  Дж/(кг·К);  $u_{S0}=0.23$  кг/кг;  $\alpha_{ST}=1.1 \cdot 10^{-3}$  К<sup>-1</sup>;  $a_0=0.8862$ ;  $k=3.12$ ;  $K_{13}=2.5 \cdot 10^{-14}$  м<sup>2</sup>;  $K_{23}=10^{-18}$  м<sup>2</sup>;  $s_{12}=7.98 \cdot 10^6$  м<sup>-1</sup>;  $H_d=0.015$  м;  $a_a=0.05$  м,  $b_a=0.02$  м.

Акцептор:  $\rho_3^0=4800$  кг/м<sup>3</sup>;  $\rho=1680$  кг/м<sup>3</sup>;  $\lambda_3=0.88$  Вт/(м·град),  $c_3=0.838 \cdot 10^3$  Дж/(кг·К);  $u_{S0}=0.0967$  кг/кг;  $\alpha_{ST}=0.418 \cdot 10^{-3}$  К<sup>-1</sup>;  $a_0=0.6640$ ;  $k=14.8$ ;  $K_{13}=5 \cdot 10^{-14}$  м<sup>2</sup>;  $K_{23}=10^{-20}$  м<sup>2</sup>;  $s_{12}=0.15 \cdot 10^6$  м<sup>-1</sup>;  $H_a=0.01$  м.

Колпак:  $h_k=0.065$  м. Окружающая среда:  $T_c=293 \div 393$  К;  $p_c=p_{atm}$ ;  $\varphi_c=45 \div 100\%$ .

Начальные значения:  $u_0^A=0.0169$  кг/кг;  $u_0^D=0.28$  кг/кг;  $T_0=293$  К;  $p_{10}=p_{atm}$ ;  $M_{20}=0$ ; Характерные значения:  $t_{хар}=1281600$  с  $\approx 356$  час;  $l_{хар}=H_d$ .

Коэффициент теплоотдачи от акцептора к сушильному агенту  $a^{\Gamma A}$  вычислялся по числу Нуссельта для вынужденной конвекции согласно эмпирической формуле А.В. Нестеренко в зависимости от чисел Рейнольдса и Прандтля [5]. Среднее значение  $a^{\Gamma A} = 30$  Вт/(м<sup>2</sup>·К). Теплоотдача от донора к газообразной фазе под влагонепроницаемым

колпаком определяется значением  $a^{\Gamma D} = 50 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ . Коэффициент теплоотдачи от паровоздушной среды под колпаком к сушильному агенту  $a^k = 12 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ . Теплоотдачей от паровоздушной среды в объеме под колпаком к акцептору и донору пренебрегаем -  $a^A = 0$ ,  $a^D = 0$ .

### Результаты и обсуждение и вычислительного эксперимента.

Построенная математическая модель учитывает, что коэффициент влагопроводности материала изменяется во времени и в пространстве, что, с одной стороны, уточняет расчеты режимов сушки, а с другой стороны, позволяет оценить возможность адекватного использования постоянного коэффициента  $a_m$ . Вычислительный эксперимент дает интересные результаты, связанные с изменением коэффициента диффузии в зоне контакта донора и акцептора, согласующиеся с теоретическими выводами работы [19].

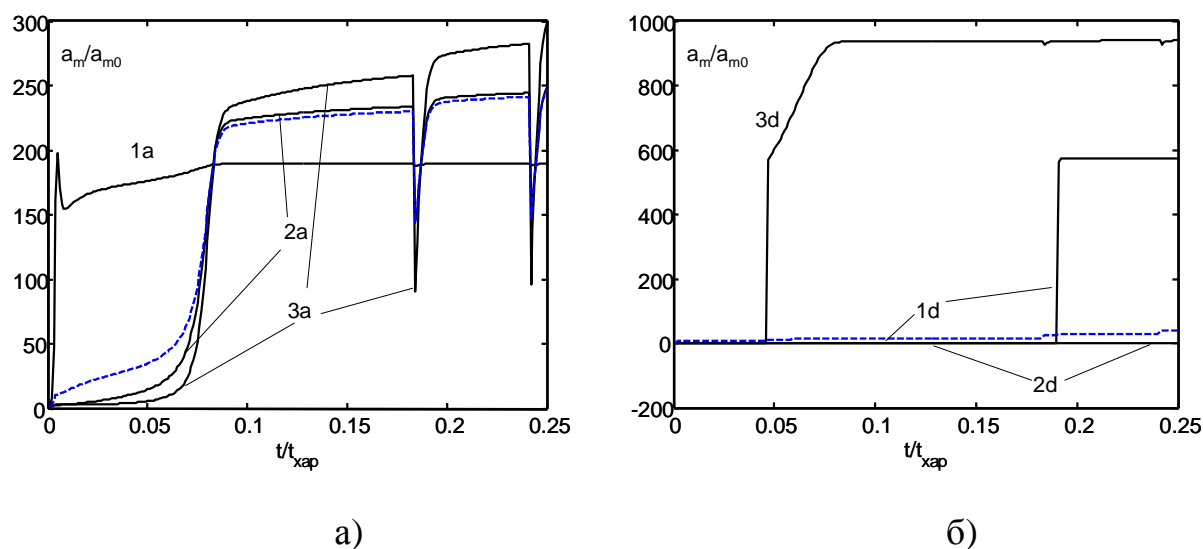


Рисунок - 2. Изменение коэффициента влагопроводности в различных точках образца акцептора - а) и донора – б) со временем при  $\varphi_c = 0,45$ ,  $T_c = 323 \text{ К}$ ,  $v_c = 0,37 \text{ м/с}$ :  $x/l_{xap} = 0,0066$  – 1а, 0,3317 – 2а, 0,6633 – 3а;  $x/l_{xap} = 1,6567$  – 1d, 1,1692 – 2d, 0,6716 – 3d; пунктирная линия соответствует коэффициенту влагопроводности, усредненному по объему образца. Величина  $a_{m0} = 1,4920 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$ .

Расчеты коэффициента влагопроводности в характерном режиме адсорбционно-контактной сушки показывают существенную разницу значений  $a_m$  в различных точках образца и посредника (рисунок 2). Кривые 3a и 3d относятся к точкам в области, принадлежащей акцептору и донору вблизи зоны контакта, 2a и 2d – в центре, и 1a и 1d – рядом с внешними границами этих тел. Особенности изменения  $a_m$  связаны с динамикой развития профиля влагосодержания (рисунок 3).

Пористая структура донора практически весь расчетный период заполнена свободной водой, которая в отсутствие массовых сил неподвижна. Обезвоживание донора происходит за счет испарения в объеме и жидкофазного переноса на границе с акцептором за счет капиллярных эффектов 1 и 2 рода. При этом жидкофазный переход в области соприкосновения плиты посредника и кирпича может происходить при наличии «мостика» жидкости – жидкого кластера [4]. В материале акцептора работают те же механизмы обезвоживания что и в доноре, а при уменьшении влажности ниже предельного гигроскопического значения добавляется механизм влагопереноса за счет градиента расклинивающего давления в смачивающих пленках. Кинетика сушки в доноре и акцепторе различна по интенсивности, так что можно ожидать, что жидкофазный контакт между ними имеет динамический характер. Изменение влагосодержания в акцепторе в зоне контакта может привести к полному отсутствию контакта с донором по жидкому кластеру или резкому снижению его интенсивности. Именно такое положение иллюстрируют немонотонные зависимости коэффициента влагопроводности от времени - кривые 2a, 3a на рисунке 2a. Замедлившийся жидкофазный перенос через границу тел может активизироваться вновь, когда концентрация жидкой фазы вырастет за счет капиллярных течений на границе, при этом коэффициент влагопроводности вновь возрастает.



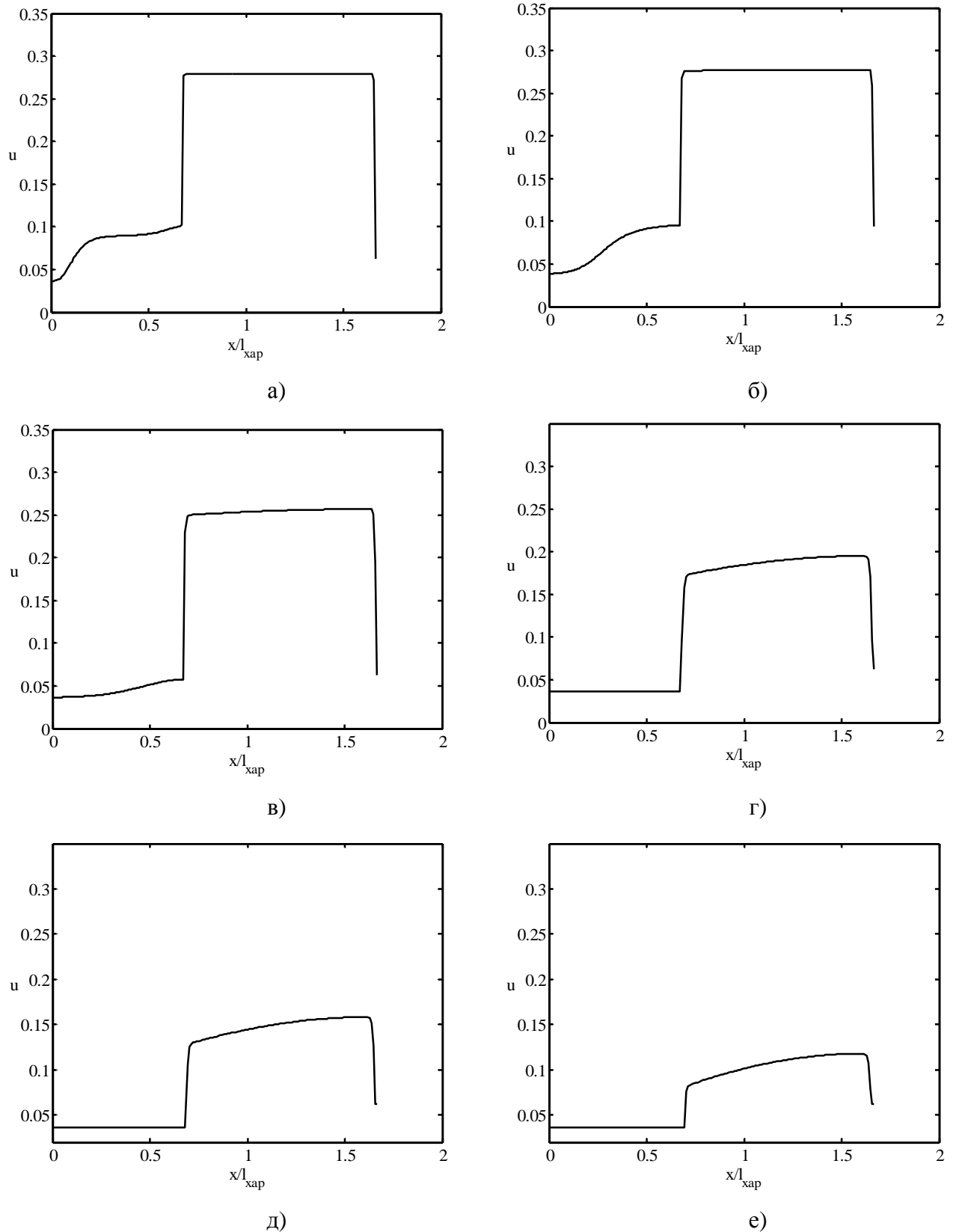


Рисунок 3. Распределение влагосодержания по сечению комплекса донор-акцептор при  $\varphi_c = 0,45$ ,  $T_c = 323 \text{ K}$ ,  $v_c = 0,37 \text{ м/с}$  для  $t/t_{\text{хар}} = 0,005$  – а);  $0,025$  – б);  $0,05$  – в);  $0,15$  – г);  $0,20$  – д)  $0,25$  – е).

Отметим, что усредненное по объему значение коэффициента влагопроводности для акцептора в рассматриваемом процессе наиболее близко к величине, отнесенной к центру подложки, но характер этого изменения и его диапазон не позволяют рекомендовать к использованию какое-то постоянное значение  $a_m$  для расчетов динамики АКС. Что касается влагопереноса в доноре при влагосодержании большем, чем максимальное гигроскопическое, как видно из рисунка 2б, усредненное значение коэффициента диффузии и его значение в центре образца практически постоянны и близки по значению. Однако вблизи границ постепенно (на внутренней существенно раньше из-за более интенсивного обезвоживания, чем на границе с парогазовой фазой под колпаком) коэффициент влагопроводности существенно возрастает, вследствие снижения влажности и вклада движения связанной влаги в граничных слоях.

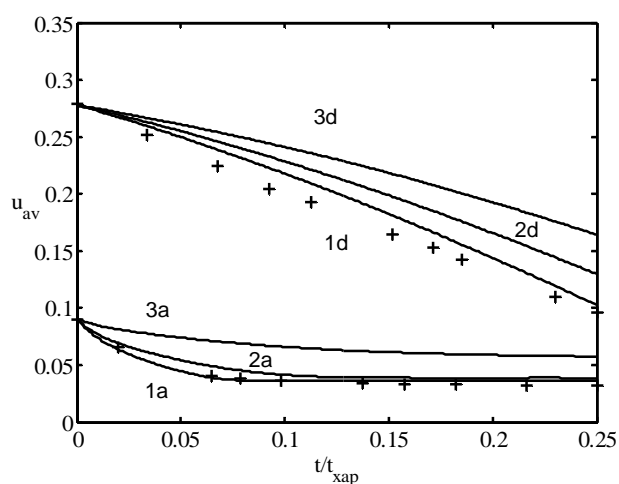


Рисунок - 4. Изменение среднего влагосодержания  $u_{av}$  ( $кг/кг$ ) в доноре (d) и акцепторе (a) со временем при  $T_c=323 K$ ,  $v_c=0,37 м/с$  для  $\phi_c= 0,45 - 1$ ;  $0,60 - 2$ ;  $0,80 - 3$ . Маркером + отмечены данные эксперимента [2].

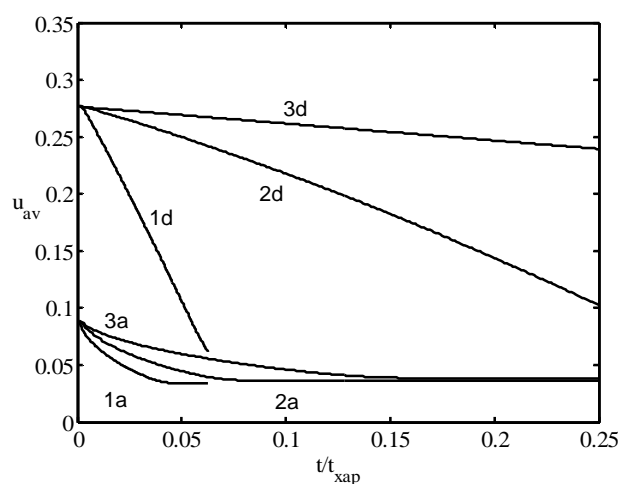


Рисунок - 5. Изменение среднего влагосодержания  $u_{av}$  ( $кг/кг$ ) в доноре (d) и акцепторе (a) со временем при  $\phi_c= 0,45$ ,  $v_c=0,37 м/с$  для  $T_c=353 K - 1$ ;  $323 - 2$ ;  $293 - 3$ .

На рисунке 4 приведены кривые кинетики адсорбционно-контактной сушки при различных значениях относительной влажности сушильного

агента. Как видно из графиков, влияние данного фактора на скорость обезвоживания, как и при других видах сушки, весьма существенно. Если акцептор высушивается недостаточно интенсивно, то влажность донора также снижается медленно. При  $\varphi_c=0.45$  акцептор приобретает равновесную влажность, соответствующую температуре окружающей среды, существенно быстрее (почти в 2 раза), чем при  $\varphi_c=0.6$ . Для упругости пара в паровоздушной смеси с  $\varphi_c=0.8$  средняя влажность акцептора в течение расчетного периода практически не снижается. Влага, заполняющая пористую структуру донора, наиболее интенсивно покидает его при  $\varphi_c=0.45$ , а при  $\varphi_c=0.8$  длительность процесса сушки образца существенно возрастает.

Графики на рисунке 5 иллюстрируют влияние температуры сушильного агента на кинетику АКС. Повышение температуры на 30 градусов приводит к значительной интенсификации процесса обезвоживания донора. Например, в жестком режиме ( $T_c=353\text{ K}$ ,  $\varphi_c=0,45$ ) заданная конечная средняя влажность высушиваемого материала сырца достигается в 5 раз быстрее, чем при  $T_c=323\text{ K}$ ,  $\varphi_c=0,45$ .

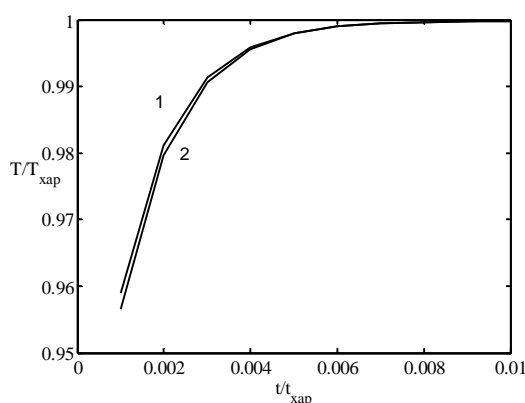


Рисунок - 6. Изменение со временем средней по объему температуры в образце донора (1) и акцептора (2) со временем при  $\varphi_c=0,45$ ,  $T_c=323\text{ K}$ ,  $v_c=0.37\text{ м/с}$ .

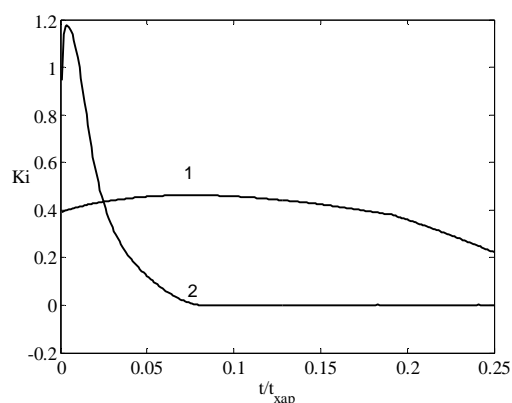


Рисунок - 7. Изменение со временем критерия Кирпичева в образце донора (1) и акцептора (2) со временем при  $\varphi_c=0,45$ ,  $T_c=323\text{ K}$ ,  $v_c=0.37\text{ м/с}$ .

Развитие температуры по сечению образцов происходит существенно быстрее, чем профиля влажности. Длительность переходного температурного процесса в характерном режиме сушки в 25 раз меньше, чем время процесса. Ввиду близких значений теплофизических параметров для выбранных материалов донора и акцептора температурное поле в них развивается практически одинаково, что отражается зависимостями усредненной температуры от времени на рисунке 6. Этот результат можно использовать при поиске приближенных аналитических решений для синтезированной математической модели тепло- и массопереноса при адсорбционно-контактной сушке.

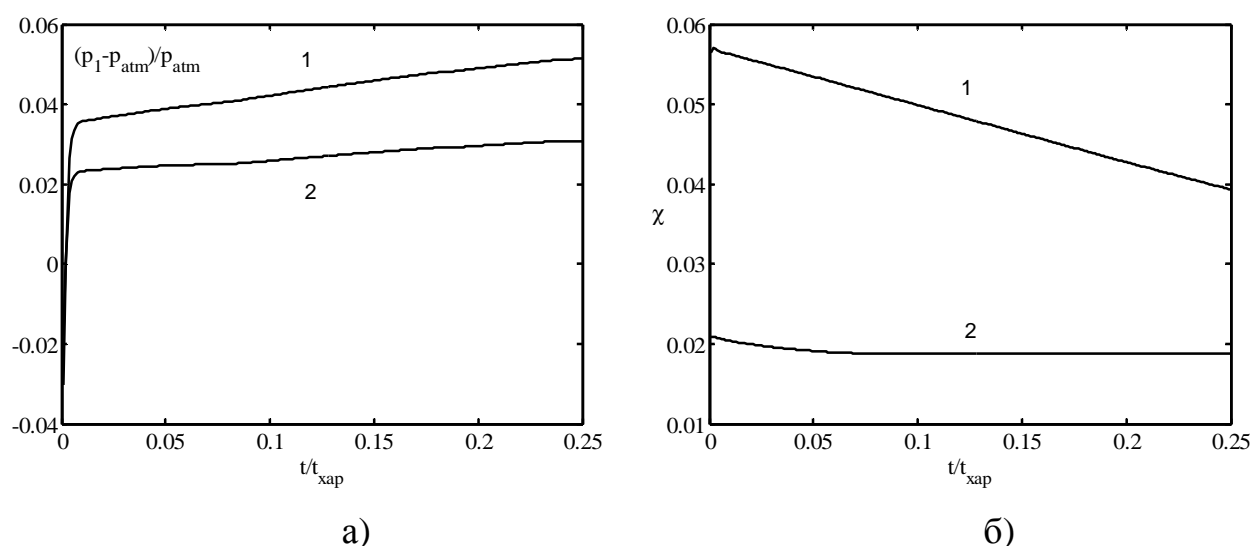


Рисунок - 8. Изменение со временем среднего по объему давления парогазовой смеси (а) и концентрации пара в парогазовой смеси в образце (б) для донора (1) и акцептора (2) со временем при  $\varphi_c = 0,45$ ,  $T_c = 323$  K,  $v_c = 0.37$  м/с.

На рисунке 8 показано, как со временем изменяются в доноре и акцепторе усредненные по координате  $x$  избыточное давление парогазовой фазы, концентрация паровой компоненты. Скачок избыточного давления в газообразной фазе материалов в окрестности нуля связан с постановкой начальных условий, отвечающих ступенчатому изменению внешних

параметров – температуры и влажности окружающей среды. Рост избыточного давления в пористой структуре донора происходит быстрее, чем в акцепторе, что связано большим сопротивлением материала сырца фильтрационному переносу и меньшей скоростью обезвоживания пор и капилляров (рисунок 8а).

Концентрация паровой компоненты снижается в течение процесса сушки, как в высушиваемом образце, так и в посреднике. Скорость снижения определяется диффузионным числом Пекле ( $Pe_D=8,1 \cdot 10^{-6}$ ) и числом Дарси. На внешних границах донора и акцептора концентрация пара не одинакова, т. к. в среде сушильного агента, содержание пара существенно ниже, чем под колпаком, где воздух постепенно приближается к состоянию насыщения (при данной температуре). Выравнивание концентрации пара в объеме  $V^A$  происходит быстрее, чем в  $V^D$ , поскольку при заданных параметрах условия сопротивления переносу газообразной фазы в доноре выше, чем в акцепторе. Для донора число Дарси  $Da_{13}$  имеет в несколько раз меньшее значение, чем для акцептора.

Отметим, что начальные распределения концентрации паровой компоненты в доноре и акцепторе обусловлены начальным влагосодержанием этих материалов. Поэтому при значениях влажности  $u_0$  меньших, чем максимальная гигроскопическая влажность каждого из материалов, доля паровой компоненты в образце сырца и подложке в начальный момент будут разными.

Рисунок 9 иллюстрирует развитые профили теплофизических переменных, соответствующих окончанию процесса АКС. Граница между донором и акцептором имеет безразмерную координату  $x/l_{\text{хар}}=0.66$ . Здесь имеют место скачки влагосодержания  $u$ , концентрации пара  $\chi$ , избыточного давления парогазовой смеси, интенсивности парообразования  $j_{12}$  и коэффициента диффузии влаги  $a_m$ . Величина разрыва связана с текстурными особенностями контактирующих материалов, в частности,

объемными концентрациями газообразной, жидкой и твердой фаз в каждом материале -  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ ,  $\alpha_3$ . (рисунок 9), а также удельными поверхностями пористой системы этих материалов  $s_{12}^A$  и  $s_{12}^D$ .

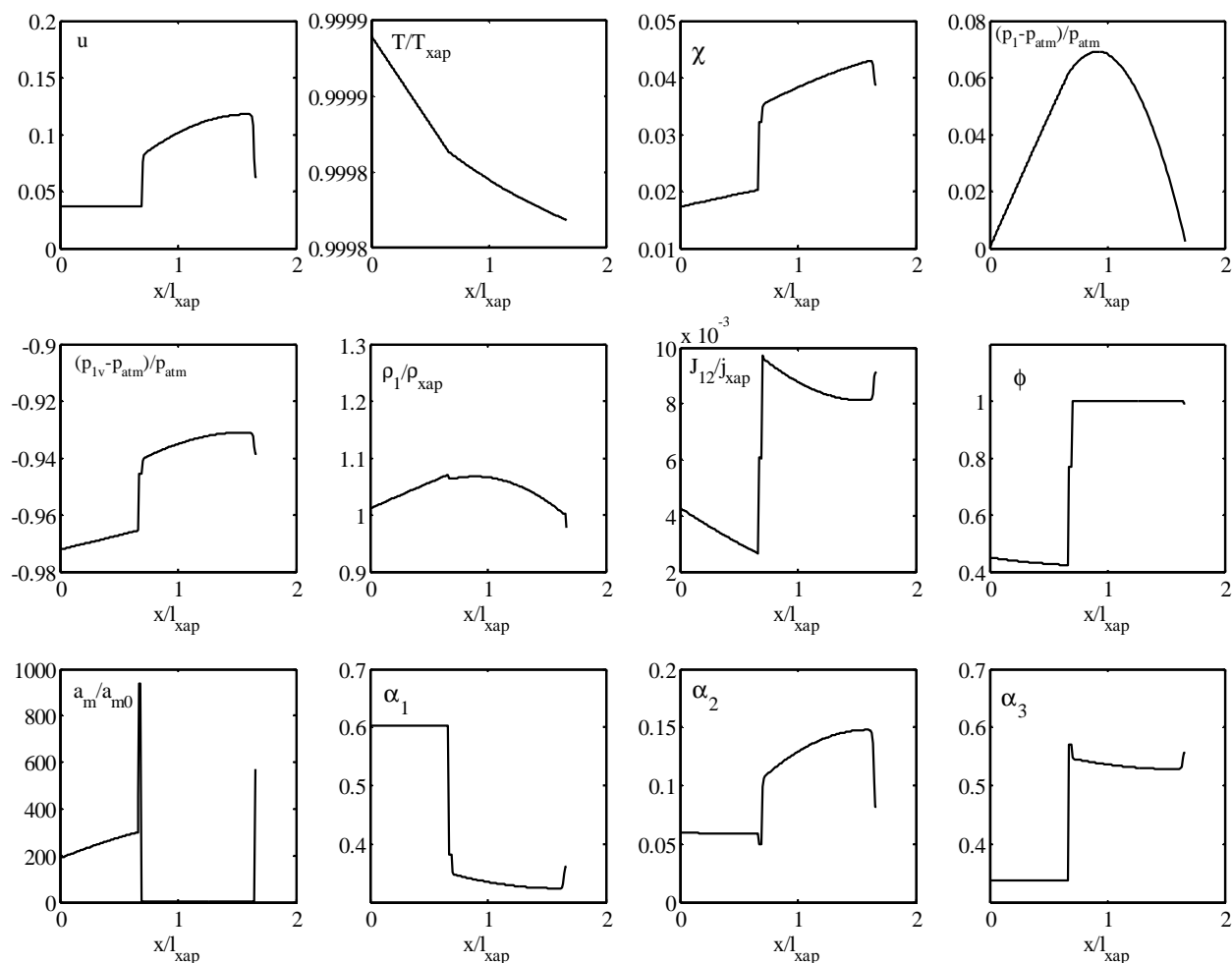


Рисунок - 9. Распределение по сечению комплекса донор-акцептор безразмерных теплофизических параметров при  $\phi_c = 0,45$ ,  $T_c = 323 \text{ K}$ ,  $v_c = 0.37 \text{ м/с}$  для  $t/t_{\text{хар}} = 0.25$ : влагосодержания  $u$ ; температуры  $T$ ; концентрации пара  $\chi$ ; избыточного давления газовой фазы и пара -  $p_1 - p_{\text{atm}}$  и  $p_{1v} - p_{\text{atm}}$ ; плотности парогазовой среды  $\rho_1$ ; интенсивности парообразования  $j_{12}$ ; относительной влажности  $\phi$ ; коэффициента влагопроводности  $a_m$ ; объемного содержания газообразной, жидкой и твердой фазы -  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ ,  $\alpha_3$ .

Основной проблемой, которую решает использование АКС при высушивании сырца из высокочувствительной глины, является проблема снижения трещинообразования. Экспериментальное исследование [2]

позволило авторам обосновать критерий прочности образца из глиняного сырца при сушке. Для прогноза трещиностойкости выбрано число Кирпичева  $Ki$  [20]:

$$Ki = \frac{q_m h}{a_m r_0 u_0}.$$

где  $q_m$  – плотность массового потока влаги на поверхности плиты  $кг/м^2ч$ ;  $h$  – половина толщины пластины, м;  $u_0$  – начальное влагосодержание,  $кг/кг$ ;  $a_m$  – коэффициент влагопроводности,  $м^2/ч$ ;  $\rho_m$  – средняя плотность сухого материала,  $кг/м^3$ . Оценивая градиент влагосодержания как разность влагосодержаний между центральным и поверхностным слоем, получаем выражение вида

$$Ki = 2 \frac{u_{ц} - u_{п}}{u_0}.$$

Экспериментально установлено, что при  $Ki < 0.58$  растрескивания высушиваемого глиняного сырца не происходит [2]. На рисунке 7 показано изменение числа Кирпичева, вычисленного на основе рассматриваемой математической модели для режима АКС, с параметрами сушильного агента  $\varphi_c = 0,45$ ,  $T_c = 323$  К,  $v_c = 0.37$  м/с. Данный режим, как установлено опытами [2], обеспечивает допустимый интервал изменения критерия Кирпичева для донора. Что касается материала подложки, то он находится в условиях жесткого режима сушки и его усадочные напряжения могут превысить предельный уровень, что допустимо в исследуемом технологическом процессе. Результаты вычислительного эксперимента полностью согласуются с выводами [2].

**Заключение.** Предложена математическая модель тепло- и влагопереноса в процессе адсорбционно-контактной сушки капиллярно-пористых материалов на примере керамического кирпича, изготовленного из высокочувствительной глины. Модель численно исследована на основе конечно-разностного метода. Результаты численных расчетов с

удовлетворительной точностью совпадают с данными опытов.

Математическая модель и результаты ее исследования могут быть использованы при выборе эффективных режимов адсорбционно-контактной сушки строительных материалов.

#### Список обозначений

$a_m$  – коэффициент влагопроводности,  $m^2/c$ ;  $a$  – коэффициент температуропроводности,  $m^2/c$ ;  $a = \frac{l}{c\Gamma}$ ;  $B$  – индивидуальная газовая постоянная,  $Дж/(кгK)$ ;  $c$  – теплоемкость,  $Дж/(кгK)$ ;  $D$  – коэффициент бинарной диффузии,  $m^2/c$ ;  $i$  – энтальпия,  $Дж/кг$ ;  $j$  – поток массы пара, обусловленный фазовыми переходами, отнесенный к единице времени и единице площади,  $кг/(m^2 \cdot c)$ ;  $H = H_a + H_d$  – координата верхней границы донора,  $m$ ;  $H_a$  – высота акцептора,  $m$ ;  $H_d$  – высота донора,  $m$ ;  $K_{jз}$  – коэффициент проницаемости  $j$ -ой фазы при полном насыщении пористой системы,  $m^2$ ;  $L$  – удельная теплота фазовых переходов  $Дж/кг$ ;  $l$  – длина,  $m$ ;  $M$  – масса,  $кг$ ;  $m$  – массовый расход,  $кг/c$ ;  $n$  – внешняя нормаль к поверхности;  $p$  – давление,  $Па$ ;  $R$  – универсальная газовая постоянная,  $Дж/(мольK)$ ;  $s_{ij}$  – удельная поверхность раздела фаз  $i$  и  $j$ ,  $m^{-1}$ ;  $S$  – площадь поверхности,  $m^2$ ;  $T$  – температура,  $K$ ;  $t$  – время,  $c$ ;  $q$  – тепловой поток,  $Дж/c$ ;  $V$  – объем,  $m^3$ ;  $v$  – скорость,  $m/c$ ;  $\bar{v}$  – объем моля воды;  $u$  – влагосодержание,  $кг/кг$ ;  $w$  – диффузионная скорость,  $m/c$ ;  $x, y, z$  – декартовы координаты,  $m$ ;  $\alpha$  – объемное содержание фазы;  $a^{\Gamma A}$  – коэффициент теплоотдачи от акцептора к сушильному агенту,  $Вт/(m^2K)$ ;  $a^{\Gamma D}$  – коэффициент теплоотдачи от донора к газообразной фазе под влагонепроницаемым колпаком,  $Вт/(m^2K)$ ;  $a^k, a^A, a^D$  – коэффициент теплоотдачи от паровоздушной среды под колпаком к сушильному агенту, акцептору и донору соответственно,  $Вт/(m^2K)$ ;  $\mu$  – вязкость,  $Па \cdot c$ ;  $\varepsilon$  –



критерий фазовых переходов;  $\kappa$  - коэффициент аккомодации;  $\kappa_1, \kappa_2$  - коэффициенты;  $\chi$  - концентрация пара;  $\lambda$  - коэффициент теплопроводности,  $Вт/(мК)$ ;  $\theta$  - насыщенность;  $\rho$  - плотность,  $кг/м^3$ ;  $\Psi$  - относительная фазовая проницаемость;  $\phi$  - относительная влажность воздуха.

*Нижние индексы* относятся: 1,2,3 – к газообразной, жидкой и твердой фазам; с – сушильный агент; g – газовая компонента; k – паровоздушная среда под влагоизолирующим колпаком; v – пар; sat – состояние насыщения;  $\Gamma$  - принадлежность к внешним границам образца; 0 – начальное значение; хар – характерное значение параметра; atm – атмосферное.

*Верхние индексы:*  $^\circ$  - истинное значение физической величины; \* - безразмерное значение; А – акцептор; D – донор.

*Безразмерные комплексы:*  $Pe_T = \frac{l_{хар}^2}{t_{хар} a_{хар}}$  - тепловое число Пекле;

$Pe_m = \frac{l_{хар}^2}{t_{хар} a_{m,хар}}$  - массообменное число Пекле;  $Pe_D = \frac{l_{хар}^2}{t_{хар} D}$  - диффузионное число Пекле;

$Ku = \frac{L}{T_{хар} c_{хар}}$  - число Кутателадзе;

$Ko = \frac{Lu_{хар}}{c_{хар} T_{хар}}$  - число Коссовича;  $M_g = gM^2 = \frac{T_{хар} B_{хар}}{v_{хар}^2}$ ;  $Re_m = \frac{V_{хар} l_{хар} r_{хар}}{m_m}$  - число Рейнольдса;

$Da_{i3} = \frac{K_{i3}}{l_{хар}^2}$  - число Дарси;  $Kl_2 = \frac{RT_{хар}}{V_2' p_{хар}}$  - число Кельвина;  $Nu^i = \frac{a^i l_{хар}}{l_{хар}}$ ,  $i = D, A, k$  - число Нуссельта;  $Bi^{\Gamma A} = \frac{a^{\Gamma A} l_{хар}}{l^A}$ ;

$Bi^{\Gamma D} = \frac{a^{\Gamma D} l_{хар}}{l^D}$  - числа Био.

### Литература

1. Шмитько Е.И., Суслов А.А., Усачев А.М. Новый способ повышения эффективности процессов сушки керамических изделий // Строительные материалы – 2006. - №5. – С. 20-22.

2. Усачев А. М. Повышение эффективности процесса сушки сырца керамического кирпича пластического формования. - автореф. Дис. ... Канд. Техн. Наук : 05.23.05 / Воронеж, 2006. - 24 с.
3. Хейфец Л.И., Неймарк А.В. Многофазные процессы в пористых средах. – М. : Химия, 1982. – 320 с.
4. Современные подходы к исследованию и описанию процессов сушки пористых тел / Под ред. В. Н. Пармона. – Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2001. – 300 с.
5. Лыков А. В. Тепломассообмен. – М. : Энергия, 1971. – 560 с.
6. Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. - М.: Наука, 1987. Ч. 1. - 464 с.; Ч. 2. - 360 с.
7. Гринчик Н.Н. Процессы переноса в пористых средах, электролитах и мембранах. - АНК "Институт тепло- и массообмена" АН Беларуси, г. Минск, 1991г. – 251 с.
8. Дорняк О. Р. Тепломассоперенос в ненасыщенных коллоидных капиллярно-пористых анизотропных материалах. - автореф. Дис. ... Д-ра техн. Наук : 01.04.14 / Воронеж, 2007. - 32 с.
9. Дорняк О. Р. Уравнение общего давления в математической модели диффузионно-фильтрационного влаготеплопереноса в коллоидных капиллярно-пористых телах // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2011. Т. 7. № 12-1. С. 68-71.
10. Исаченко В. П. Теплообмен при конденсации. – М. : Энергия, 1977. – 240 с.
11. Светлов Ю. В. Термовлажностные процессы в материалах и изделиях легкой промышленности. – М. : Издательский центр академия, 2006. – 272 с.
12. Рид Р., Праусниц Дж., Шервуд. Т. Свойства газов и жидкостей. - Л. : Химия, 1982, 463 с.
13. Дорняк О. Р., Аль Сарраджи С. Х. М. Математическая модель температурно-влажностного состояния парогазовой смеси в негерметичной камере с границами различной степени проницаемости // Лесотехнический журнал. - 2012. № 4. С. 7-14.
14. Дейч М. Е. Гидродинамика двухфазных сред. - М. : Энергоатомиздат, 1981. - 472 с.
15. Кремлевский П. П. Расходомеры и счетчики количества: Справочник. — Л. : Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1989. — 701 с.
16. Крутов В. Н. Исаев С. И., Кожин И. А. Техническая термодинамика. – М.: Высш. Шк., 1991. – 384 с.
17. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. - М. : Энергоатомиздат, 1984. - 149 с.
18. Цимерманис Л.-Х. Б. Сорбция, структурообразование, массоперенос (термодинамика влажного тела) - М. : «Алекс», 2006. – 232 с.
19. Языков, Н.А. Механизм массопереноса в процессе адсорбционно-контактной сушки материалов / Н.А. Языков, А.Д. Симонов, В.Б. Фенелонов // Теоретические основы химической технологии. 1997. - Т.31. - №4. - с. 409 - 415.
20. Колодежнов В. Н. Безразмерные комплексы и критерии подобия в гидроаэромеханике : Справочник. Воронеж : Воронежский госпедуниверситет, 2011. - 580 с.

#### References

1. Shmit'ko E.I., Suslov A.A., Usachev A.M. Novyj sposob povysheniya jeffektivnosti processov sushki keramicheskikh izdelij // Stroitel'nye materialy – 2006. - №5. –

S. 20-22.

2. Usachev A. M. Povyshenie jeffektivnosti processa sushki syrca keramicheskogo kirpicha plasticheskogo formovanja. - avtoref. Dis. ... Kand. Tehn. Nauk : 05.23.05 / Voronezh, 2006. - 24 s.

3. Hejfec L.I., Nejmark A.V. Mnogofaznye processy v poristyh sredah. – M. : Himija, 1982. – 320 s.

4. Sovremennye podhody k issledovaniju i opisaniju processov sushki poristyh tel / Pod red. V. N. Parmona. – Novosibirsk : Izd-vo SO RAN, 2001. – 300 s.

5. Lykov A. V. Teplomassoobmen. – M. : Jenergija, 1971. – 560 s.

6. Nigmatulin R.I. Dinamika mnogofaznyh sred. - M.: Nauka, 1987. Ch. 1. - 464 s.; Ch. 2. - 360 s.

7. Grinchik H.H. Processy perenosa v poristyh sredah, jelektrolitah i membranah. - ANK "Institut teplo- i massooobmena" AN Belarusi, g. Minsk, 1991g. - 251s.

8. Dornjak O. R. Teplomassoperenos v nenasyshhennyh kolloidnyh kapilljarno-poristyh anizotropnyh materialah. - avtoref. Dis. ... D-ra tehn. Nauk : 01.04.14 / Voronezh, 2007. – 32 s.

9. Dornjak O. R. Uravnenie obshhego davlenija v matematicheskoj modeli diffuzionno-fil'tracinnogo vlagoteploperenosa v kolloidnyh kapilljarno-poristyh telah // Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta. 2011. T. 7. № 12-1. S. 68-71.

10. Isachenko V. P. Teploobmen pri kondensacii. – M. : Jenergija, 1977. – 240 s.

11. Svetlov Ju. V. Termovlazhnostnye processy v materialah i izdelijah legkoj promyshlennosti. – M. : Izdatel'skij centr akademija, 2006. – 272 s.

12. Rid R., Prausnic Dzh., Shervud. T. Svoystva gazov i zhidkostej. - L. : Himija, 1982, 463 s.

13. Dornjak O. R., Al' Sarradzhi S. H. M. Matematicheskaja model' temperaturno-vlazhnostnogo sostojanija parogazovoj smesi v negermetichnoj kamere s granicami razlichnoj stepeni pronicaemosti // Lesotehničeskij zhurnal. - 2012. № 4. S. 7-14.

14. Dejch M. E. Gidrodinamika dvuhfaznyh sred. - M. : Jenergoatomizdat, 1981. - 472 s.

15. Kremlevskij P. P. Rashodomery i schetchiki kolichestva: Spravochnik. — L. : Mashinostroenie. Leningr. otd-nie, 1989. — 701 s.

16. Krutov V. N. Isaev S. I., Kozhinov I. A. Tehničeskaja termodinamika. – M.: Vyssh. Shk., 1991. – 384 s.

17. Patankar S. Chislennye metody reshenija zadach teploobmena i dinamiki zhidkosti. - M. : Jenergoatomizdat, 1984. - 149 s.

18. Cimermanis L.-H. B. Sorbcija, strukturoobrazovanie, massoperenos (termodinamika vlazhnogo tela) - M. : «Aleks», 2006.

19. Jazykov, N.A. Mehanizm massoperenosa v processe adsorbcionno-kontaktnoj sushki materialov / N.A. Jazykov, A.D. Simonov, V.B. Fenelonov // Teoreticheskie osnovy himicheskoj tehnologii. 1997. - T.31. - №4. - s. 409 - 415.

20. Kolodezhnov V. N. Bezrazmernye komplekсы i kriterii podobija v gidroajeromehanike : Spravochnik. Voronezh : Voronezhskij gospeduniversitet, 2011. - 580 s.