

ТЕПЛО- И МАССОПЕРЕНОС В ПОРИСТЫХ И ДИСПЕРСНЫХ СРЕДАХ

УДК 534.68+537.868.3

Н. Н. Гринчик¹⁾, П. В. Акулич¹⁾, А. Л. Адамович²⁾, П. С. Куц¹⁾, С. П. Кундас³⁾МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕИЗОТЕРМИЧЕСКОГО ТЕПЛО- И ВЛАГОПЕРЕНОСА
В КАПИЛЛЯРНО-ПОРИСТЫХ СРЕДАХ ПРИ ПЕРИОДИЧЕСКОМ
МИКРОВОЛНОВОМ НАГРЕВЕ

Сформулирована взаимосвязанная система уравнений тепловлагоденоса и электродинамики для моделирования СВЧ-сушки капиллярно-пористых материалов. Приведен пример решения задачи тепловлагоденоса при микроволновом нагреве образца древесины с учетом влияния на процесс миграции влаги поверхностных сил.

Введение. Электромагнитное поле микроволнового диапазона широко используется для сушки пористых материалов [1–5]. При микроволновой сушке происходит быстрый и равномерный нагрев материала, интенсивное испарение влаги и в ряде технологий обеспечивается высокое качество готовой продукции.

Моделирование тепловлагоденоса в пористых средах с учетом микроволнового нагрева строится на основе теоретического описания неизотермического массопереноса, разработанного нами ранее [6–8].

Математическая модель. Рассмотрим тепло-массоперенос в недеформируемой капиллярно-пористой среде, когда выполняется гипотеза локального термодинамического равновесия между фазами и неравновесный процесс сушки можно понимать как квазиравновесный. При этом справедливы соотношения Кельвина, Клапейрона—Клаузиуса и известны экспериментальные изотермы сорбции (десорбции) влажного материала. Тогда систему дифференциальных уравнений в частных производных для описания неизотермического влагоденоса в пористой среде, учитывающую двухфазную фильтрацию, взаимное влияние давлений пара и жидкости, работу поверхностных сил и энергию электромагнитного поля, можно представить в следующем виде [6–8]:

уравнение энергии

$$\begin{aligned} & \left[(1-m) c_c \rho_c + m \left(\theta_n \rho_n c_{pn} + \theta_j \rho_j c_{pj} \right) \right] \frac{\partial T}{\partial \tau} + m \theta_n \rho_n c_{pn} \left(\frac{kk_n}{\eta_n} \nabla p_n \nabla T \right) = \\ & = \operatorname{div} (\lambda \nabla T) + rI + Q - m \left(p_j - T \left(\frac{\partial p_j}{\partial T} \right)_{\theta_j} \right) \frac{\partial \theta_j}{\partial \tau}, \end{aligned} \quad (1)$$

учитывающее тепловыделение Q от микроволнового нагрева и работу поверхностных сил жидкой фазы посредством последнего члена в правой части [6];

уравнение переноса пара

$$m \frac{\partial (\rho_n \theta_n)}{\partial \tau} = \operatorname{div} \rho_n \left(\frac{kk_n}{\eta_n} \nabla p_n \right) + I; \quad (2)$$

уравнение состояния идеального газа (пара)

$$\rho_n = \frac{V_n p_n}{RT}; \quad (3)$$

изотерма сорбции (десорбции) и выражение для давления пара через обратную функцию F

$$a = f(p_n, T), \quad p_n = F(a, T); \quad (4)$$

¹⁾Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова НАН Беларуси. 220072, г. Минск, ул. П. Бровки, 15; ²⁾Полоцкий государственный университет; ³⁾Международный государственный экологический университет им. А. Д. Сахарова, г. Минск. Поступила 24.06.2005.

уравнение переноса жидкости

$$\frac{\partial u_{ж}}{\partial \tau} = \text{div} \rho_{ж} \left(\frac{k k_{ж}}{\eta_{ж}} \nabla p_{ж} \right) - I, \quad (5)$$

где $u_{ж} = m \rho_{ж} \theta_{ж}$.

В качестве замыкающих соотношений используем зависимости: давления насыщенного пара жидкости от температуры, в данном случае для воды $p_s = f(T)$, давления жидкости от влагосодержания и температуры

$$p_{ж} = p_s(T) + \frac{RT}{v'_{ж}} \ln \frac{F(a, T)}{p_s(T)}, \quad (6)$$

производной давления жидкости от температуры

$$\left(\frac{\partial p_{ж}}{\partial T} \right)_{\theta_{ж}} = \frac{\partial p_s(T)}{\partial T} + \frac{R}{v'_{ж}} \ln \frac{F(a, T)}{p_s(T)} + \frac{RT}{v'_{ж}} \left(\frac{\partial \ln F(a, T)}{\partial T} \right)_a, \quad (7)$$

удельной теплоты фазового перехода

$$r = \frac{RT^2}{v''_{ж}} \left(\frac{\partial \ln F(a, T)}{\partial T} \right)_{u_e} \quad (8)$$

и интенсивности массообмена между фазами

$$I = \rho_{ж} \frac{\partial a}{\partial \tau} = \rho_{ж} \left[\left(\frac{\partial a}{\partial p_{п}} \right)_{T} \frac{\partial p_{п}}{\partial \tau} + \left(\frac{\partial a}{\partial T} \right)_{p_{п}} \frac{\partial T}{\partial \tau} \right]; \quad (9)$$

начальные условия

$$T_0 = T(r, 0), \quad p_{п0} = p_{п}(r, 0), \quad p_{ж0} = p_{ж}(r, 0). \quad (10)$$

Обычно в начальный момент времени известны температура образца и его влагосодержание. Тогда, используя изотерму сорбции (десорбции), с помощью обратной функции нетрудно определить давление пара, а на основе формулы (6) — начальное давление жидкости.

Граничные условия для простейшего одномерного случая (пластина) будут иметь вид

$$x = 0 : \left. \frac{\partial p_p}{\partial x} \right|_{x=0} = 0, \quad \left. \frac{\partial p_{ж}}{\partial x} \right|_{x=0} = 0, \quad \lambda \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} = 0, \quad (11)$$

$$x = 1 : \lambda \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=1} = \alpha (T_{cp} - T), \quad (12)$$

$$p_{п}(1, \tau) = \varphi(\tau) p_s(T), \quad (13)$$

$$p_{ж}(1, \tau) = p_s(T) + \frac{RT}{v'_{ж}} \ln \frac{p_{п}(\tau)}{p_s(T)}. \quad (14)$$

В отличие от классических уравнений двухфазной фильтрации в предлагаемой системе уравнений (1)–(14) для определения зависимости давления жидкости от влагосодержания и температуры нет необходимости экспериментально определять функцию Леверетта. Если даже она известна, то возникают трудности при задании давления жидкости на границе пористого тела. Действительно, функция Леверетта не зависит от изменений давления пара и температуры, поэтому для рассматриваемой задачи использование экспериментальных изотерм сорбции (десорбции), знание которых необходимо и для определения интенсивности массообмена, а также теплоты сорбции в виде соотношений (8), (9), на наш взгляд, является более предпочтительным.

Моделирование неизоэнтальпического теплопереноса в образце древесины с изолированными границами. Постановка задачи. Образец древесины толщиной $L = 0.06$ м помещается в непроницаемую для пара и влаги оболочку или пленку. В области $x < 0$ поддерживается температура камеры $T_{к|_{x<0}} = 330$ К, в области $x > L$ $T_{к|_{x>L}} = 300$ К, коэффициент теплообмена с окружающей средой $\alpha = 30$ Вт/(м²·К). Расчеты проводились для древесины с изотермой десорбции вида [9]

$$a(\varphi, T) = 10.6^{\varphi} (3.27 - 0.015(T - 273)) / 100. \quad (15)$$

В начальный момент времени ($\tau = 0$) влагосодержание древесины $u_0 = 0.3$ кг/кг, а температура $T_0 = 300$ К, внутрипоровое давление пара, определенное по изотерме сорбции, $p_{п0} = 3791$ Па, проницаемость древесины вдоль волокон $k = 10^{-14}$ м² при пористости $m = 0.5$, плотность сухой древесины $\rho_c = 470$ кг/м³. Относительные фазовые проницаемости жидкости и пара рассчитывались с некоторым приближением по формулам С. В. Аверьянова

$$k_{ж} = \left(\frac{u - u_{\min}}{u_{\max} - u_{\min}} \right)^3, \quad k_{п} = \left(\frac{u_{\max} - u}{u_{\max} - u_{\min}} \right)^3,$$

где $u_{\max} = 1$, $u_{\min} = 0.1$. В данном случае u_{\min} соответствует предельному влагосодержанию, когда жидкость при меньших влагосодержаниях находится в связанном, неподвижном состоянии.

Давление насыщенного пара в зависимости от температуры рассчитывалось по формуле с приближением 5–10% до величины 140 °С

$$p_s(T) = 10^5 (T/373)^{15}. \quad (16)$$

Требуется найти динамику распределения температуры, влаги и давления пара в образце с течением времени.

Решение. Для решения использовалась система уравнений (1)–(5) для одномерного случая. Определяя из изотермы (4) давление пара в явном виде и используя формулы Клапейрона и Кельвина, получаем выражения для давления жидкости и теплоты сорбции как функций влагосодержания и температуры

$$p_{ж}(u, T) = \frac{RT}{v_{ж}'} \ln \left(0.4257 \ln \left(\frac{-6666.7u}{T - 491} \right) \right),$$

$$r(u, T) = \frac{RT^2}{v_{ж}''} \left(\frac{1}{(491 - T) \ln(6666.7u/(491 - T))} + \frac{15}{T} \right). \quad (17)$$

Начальные и краевые условия

$$\tau = 0 : T(x, 0) = T_0, \quad p_{п}(x, 0) = p_{п0}, \quad u(x, 0) = u_0,$$

$$\rho_{ж} \left(\frac{kk_{ж}}{\eta_{ж}} \right) \frac{\partial p_{ж}}{\partial x} \Big|_{x=0} = -\rho_{п} \left(\frac{kk_{п}}{\eta_{п}} \right) \frac{\partial p_{п}}{\partial x}, \quad \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = \alpha (T_k - T), \quad \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=L} = \alpha (T_k - T). \quad (18)$$

Они отражают равенство потоков пара и жидкости на границе, поскольку общий поток массы через границу равен нулю, т. е. $q_{п} + q_{ж} = 0$. Считаем границы непроницаемыми для суммарного массового потока. Коэффициенты теплопроводности и эффективная теплоемкость определялись по следующим эмпирическим зависимостям [4, 9]:

$$\lambda = 0.00222u(T - 273) + 10^{0.295 \lg(100u) - 1.022}, \quad (\rho c_p)_{эф} = \rho_s (4185u + 4.85T - 211).$$

Как известно, формула Дарси не учитывает конвективный перенос жидкости и газа в пористой среде для диффузионных уравнений [4]. В то же время иногда необходим учет конвективной составляющей в уравнении теплопроводности [10]. В нашем случае ее вклад является незначительным по сравнению с кондуктивной составляющей.

Система уравнений (1)–(7) с краевыми условиями (18) решалась методом конечных элементов. Результаты расчета представлены на рис. 1. Из рис. 1, а, на котором показана динамика изменения влажности образца, видно, что уже через 1000 с наблюдается заметное перераспределение влаги в пористом материале. В "холодной" части образца, где $T = 300$ К (рис. 1, б), влагосодержание возрастает до 0.32 кг/кг, а в "теплой" области уменьшается до 0.28 кг/кг. Градиенты влагосодержания еще больше увеличиваются с течением времени. Движение влаги в "холодные части" образца обусловлено не только зависимостью давления жидкости от температуры по формуле (6), но и потоком пара. Кривые для момента времени $\tau = 2 \cdot 10^4$ с

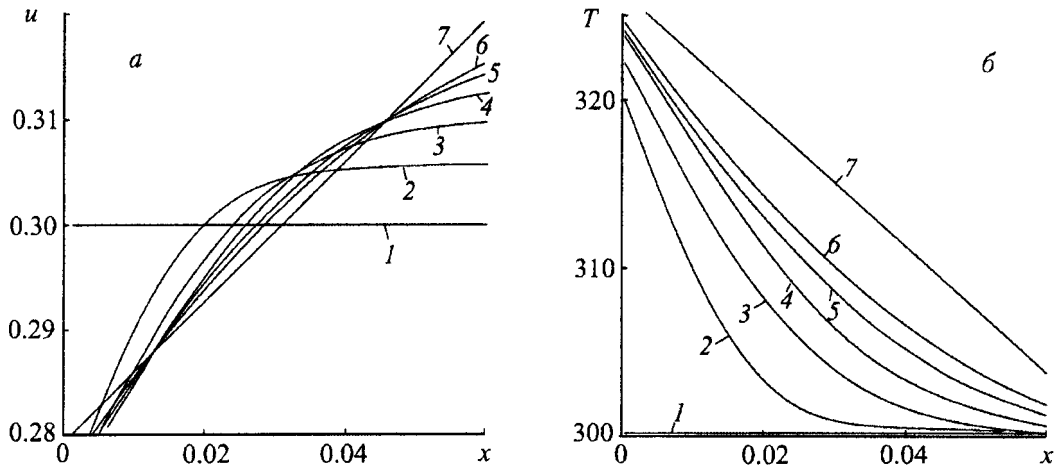


Рис. 1. Распределение влагосодержания древесины u (а), температуры T (б) в образце для различных моментов времени: 1 — 0 с; 2 — 1000; 3 — 2000; 4 — 3000; 5 — 4000; 6 — 5000; 7 — 20 000. u , кг/кг; T , К; x , м

соответствуют установившемуся состоянию, поскольку дальнейших изменений параметров в ходе численного эксперимента не наблюдалось.

Тепломассоперенос в процессе микроволнового нагрева древесины. *Постановка задачи.* Электромагнитная волна падает перпендикулярно на пластину из древесины толщиной $L = 0.06$ м в направлении волокон, вектор напряженности электрического поля $E = 1800$ В/м с круговой частотой $\omega = 15.4$ ГГц параллелен поверхности.

В начальный момент времени ($\tau = 0$) влагосодержание древесины $u_0 = 0.3$ кг/кг, температура $T_0 = 300$ К, внутрисоровое давление пара, определенное по изотерме сорбции, $p_{п0} = 3791$ Па. Для сравнения параметры расчета те же, что и в задаче из предыдущего раздела. Образец помещается в камеру с давлением $p_k = 3240$ Па и относительной влажностью $\phi = 85\%$. Диэлектрическая проницаемость древесины ϵ , являющаяся функцией температуры и влагосодержания, определяется по формулам [4]

$$\epsilon'' = 9.7 + 9.2u - 0.056T - 0.17u^2 + 0.0000826T^2 - 0.0183uT,$$

$$\epsilon' = -17.2 - 48.6u + 0.1145T + 12.8u^2 - 0.00017T^2 + 0.19uT,$$

где $\epsilon = \epsilon' - i\epsilon''$.

Температура в камере $T_k = 300$ К, пористость древесины $m = 0.5$, ее проницаемость вдоль волокон $k = 10^{-14}$ м², плотность сухой древесины $\rho_c = 470$ кг/м³. Требуется найти распределение полей давления пара, влагосодержания образца для различных моментов времени.

Решение. Распределение напряженности электромагнитного поля определяется векторным уравнением Гельмгольца

$$\nabla E - \epsilon_0 \mu_0 \omega^2 \epsilon E = 0. \tag{19}$$

Источник электромагнитной волны должен беспрепятственно пропускать волну, отраженную от образца, а волна, прошедшая через образец, не должна отражаться обратно (рис. 2, а). Имеем два граничных условия, соответствующих отсутствию отражения волны с напряженностью E_0

$$\nabla E + k_B i E = 2k_B i E_0 \tag{20}$$

и поглощению на выходе из образца

$$\nabla E + k_B i E = 0.$$

Коэффициент отражения S определяется отношением удельной отраженной мощности (потока) к мощности источника

$$S = \sqrt{\frac{P_{отр}}{P_{ист}}}, \quad P_{ист} = 0.5 \frac{E_0^2}{Z_H}, \quad P_{отр} = P_{ист} = 0.5 \operatorname{Re}(EH^*), \quad H = \frac{1}{\omega \mu_0} \frac{\partial E}{\partial x}. \tag{21}$$

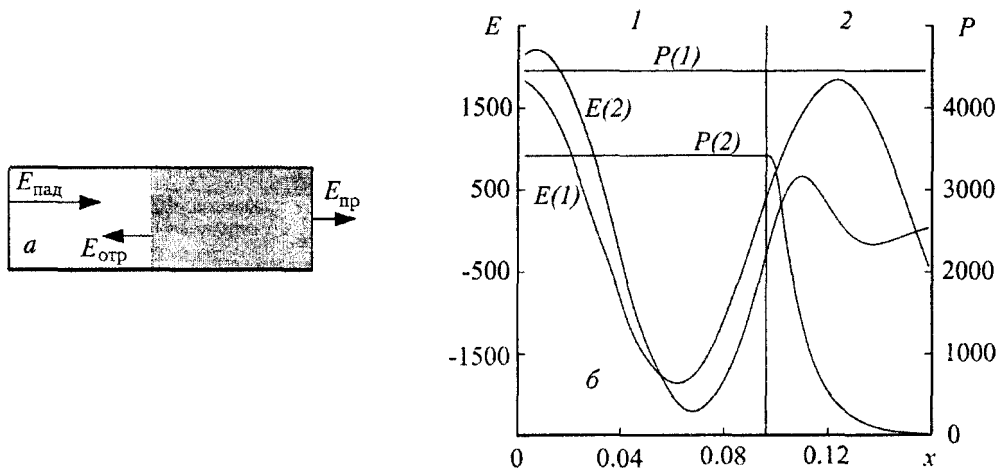


Рис. 2. Геометрия задачи (а) и результаты решения уравнения Гельмгольца (б). E , В/м; P , Вт/м²; x , м

Рассмотрим результаты решения электродинамической задачи (19), (20) в системе свободное пространство (область 1) — образец (область 2), как показано на рис. 2, б. Кривые $E(1)$ и $P(1)$ соответствуют напряженности поля и потоку мощности при отсутствии образца (т. е. ϵ в области 2 определяется как $\epsilon = 1 - i(0)$). Кривая напряженности синусоидальна, напряженность в максимумах соответствует заданной напряженности источника $E_0 = 1800$ В/м, а длина волны — частоте $\omega = 15.4$ ГГц. Как видно из рис. 2, б, мощность источника равна $P_{ист} = 4400$ Вт/м², что соответствует формуле (21).

Кривые $E(2)$ и $P(2)$ соответствуют напряженности поля и мощности при наличии образца с коэффициентом диэлектрической проницаемости $\epsilon = 4 - 4i$. Распространяясь ($x = 0$), волна отражается от границы образца ($x = 0.1$ м) и, интерферируя с падающей, образует стоячую волну $E(2)$. Прошедшая волна, осциллируя, затухает. Поскольку $P(2)$ является результатом разности падающей волны и отраженной, нетрудно подсчитать коэффициент отражения S . С учетом соотношения (20) величина S для образца с $\epsilon = 4 - 4i$ равна 0.47.

Для данной геометрии задачи коэффициент отражения можно определить также без расчетов потоков мощностей, используя соотношения для напряженностей поля в интерференционных максимуме и минимуме стоячей волны $E(2)$, точнее, абсолютное значение комплексной величины $E(2)$. По указанной выше методике $S = 0.46$.

Для решения задачи используется система уравнений теплопереноса (1) — (14) с дополнительным слагаемым Q , определяющим внутренние источники тепла за счет действия микроволн:

$$Q = 0.5\omega\epsilon_0\epsilon''E^2.$$

Рассмотрим два случая:

1. *Теплоперенос при микроволновом нагреве образца с изолированными границами.* Образец помещен в непроницаемую для влаги и пара оболочку. Граничные условия те же, что и выше, но без микроволнового источника. Исключение составляет температура в камере, которая со всех сторон образца одинакова — $T_k = 300$ К. Результаты расчета представлены на рис. 3.

Вследствие микроволнового нагрева происходит несимметричный нагрев образца с максимумом температуры на глубине $\sim 2-3$ см (рис. 3, а), при этом существенно повышается внутрипоровое давление пара от $1 \cdot 10^4$ до $5 \cdot 10^5$ Па (рис. 3, б). Влагосодержание образца при этом же значении координаты уменьшается и происходит перемещение влаги в холодные части образца. При этом кривые $u(x)$ слева и справа от максимальной зоны нагрева пересекаются приблизительно в одних и тех же сечениях: слева от зоны нагрева на глубине $x \approx 1$ см и справа — $x \approx 4.5-5$ см; местоположение точки пересечения с течением времени практически не изменяется (рис. 3, а). Отметим, что согласно классической теории А. В. Лыкова для моделирования указанных задач требуется задание коэффициента термовлагопроводности и критерия фазового перехода, который равен $|q_{пл}| / (|q_{пл}| + |q_{жк}|)$, а в случае микроволнового нагрева неизвестен. Использование классической теории двухфазной фильтрации [1–5] без учета термодинамики поверхностных явлений также не позволяет моделировать явления термовлагопроводности в пористых материалах при наличии микроволнового нагрева.

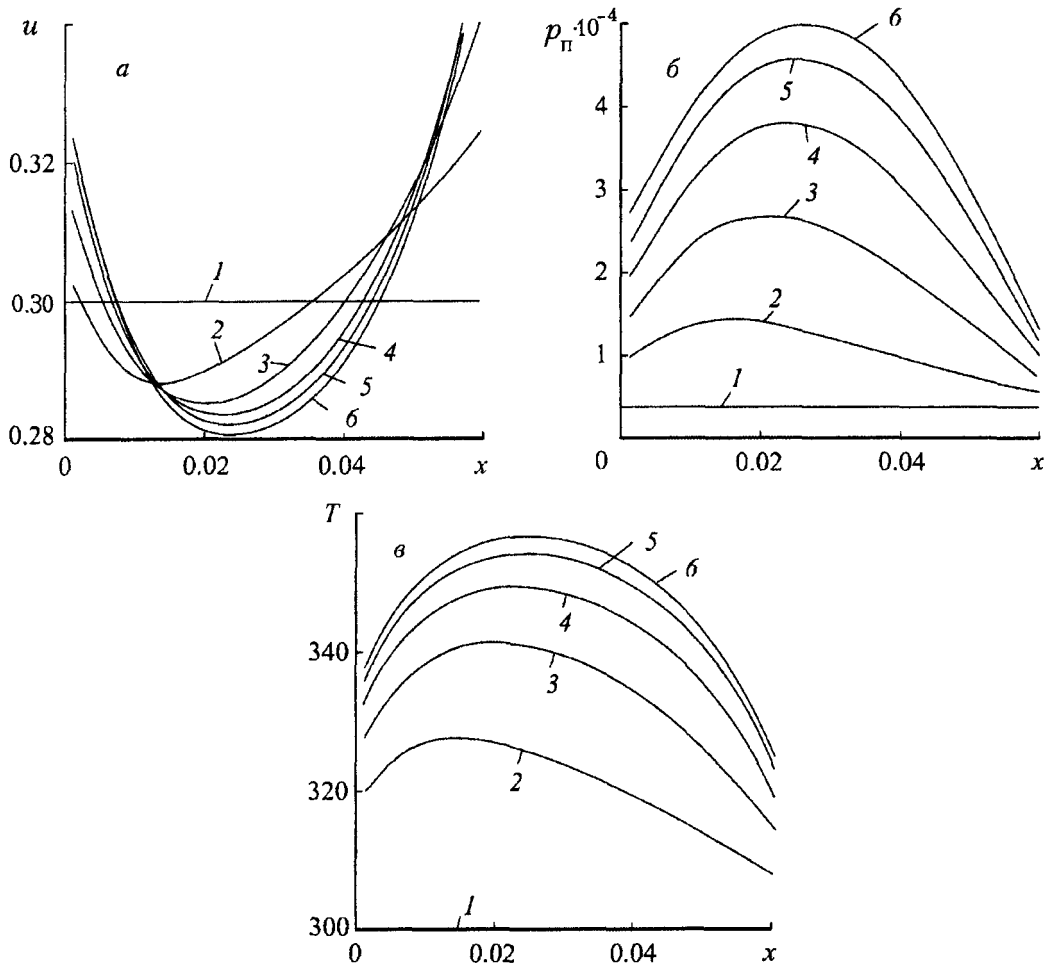


Рис. 3. Профили влагосодержания древесины u (а), давления пара p_n (б) и температуры T (г) в образце для различных моментов времени: 1 — 0 с; 2 — 1000; 3 — 2000; 4 — 3000; 5 — 4000; 6 — 5000. u , кг/кг; p_n , Па; T , К; x , м

2. *Тепломассоперенос в процессах сушки при микроволновом нагреве древесины.* Образец древесины толщиной $L = 0.06$ м помещается в камеру с определенной фиксированной относительной влажностью ϕ и соответственно с фиксированным парциальным давлением пара ($\phi = 85\%$, $p_n = 3240$ Па). На поверхность образца действует электромагнитное поле с характеристиками, которые были указаны выше, температура в камере $T_k = 300$ К. В этом случае краевые условия для образца можно записать как

$$u \Big|_{x=0, x=L} = u_{\text{ср}}(p_{\text{ср}}, T), \quad p_n \Big|_{x=0, x=L} = p_{\text{ср}} = \phi p_s(T), \quad \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0, x=L} = \alpha (T_k - T). \quad (22)$$

Характер изменения влажности, парциального давления пара и температуры в целом такой же, как и для тепломассопереноса с изолированными границами (рис. 3). Расчеты показывают, что среднее влагосодержание образца в начале процесса убывает линейно, т. е. существует период постоянной скорости сушки, что соответствует многочисленным экспериментальным данным.

К особенностям микроволновой сушки следует отнести тот факт, что в отличие, например, от конвективного удаления влаги периоду постоянной скорости сушки не соответствует период постоянной температуры образца. При этом не наблюдается пересыхания его поверхностного слоя. В результате уменьшения образования микротрещин высушенный материал является более качественным и однородным.

Периодический режим нагрева. Исследуем процесс сушки при дискретном СВЧ нагреве плоского образца толщиной 0.06 м, теплофизические и диэлектрические свойства которого определены выше. Напряженность падающего СВЧ поля $E_0 = 3000$ В/м. Расчет кинетики сушки проводился для трех режимов нагрева: с непрерывным источником СВЧ излучения, периодическим включением и выключением источника с периодами $\tau_{\text{вкл}} = \tau_{\text{выкл}} = 200, 500$ с (рис. 4). Как видно из графиков, на начальном этапе непрерывного

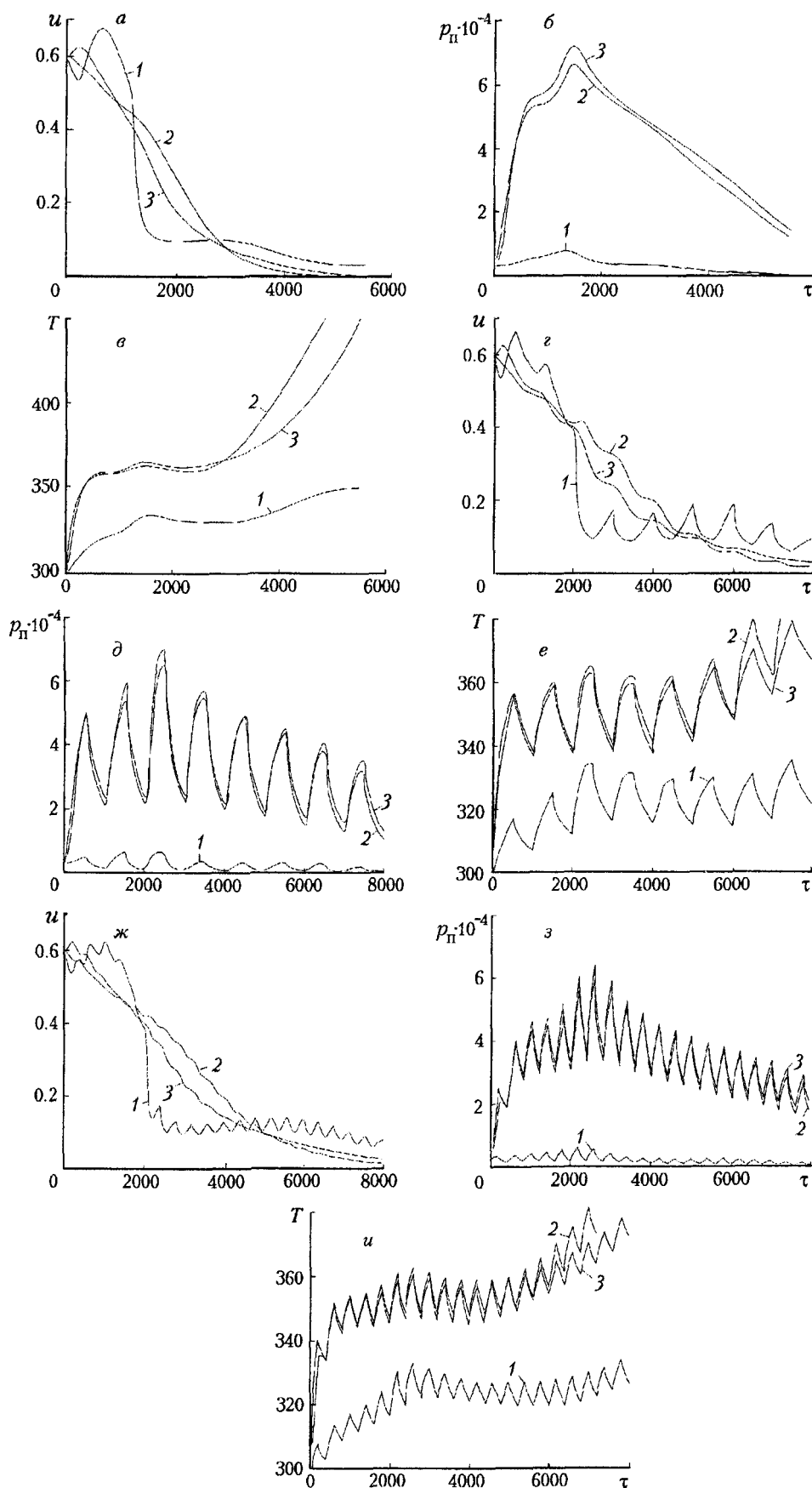


Рис. 4. Влагосодержание, давление пара и температура в приповерхностной области $x = 0.001$ м (1), на расстоянии $x = 0.02$ м (2) и $x = 0.03$ м (3) от поверхности образца при непрерывном режиме нагрева (а, б, в), дискретных режимах $\tau_{\text{вкл}} = \tau_{\text{выкл}} = 200$ с (г, д, е), 500 с (ж, з, и). u , кг/кг; p_n , Па; T , К; τ , с

режима СВЧ нагрева влагосодержание в приповерхностном слое увеличивается, а затем по мере прогрева образца резко уменьшается. Однако из-за конденсации в конце процесса сушки в приповерхностных слоях оно несколько больше, чем во внутренних. Пиковое значение давления пара для внутренних контрольных точек образца составляет 70–75 кПа. После прогрева образца до 360 К температура остается постоянной в течение всего периода сушки. Однако, начиная с $\tau = 3000$ с, она резко возрастает при снижающихся с постоянной скоростью давлении пара и влагосодержании.

Осциллирующий режим характеризуется меньшей скоростью нагрева и сушки по сравнению с непрерывным. Влагосодержание в поверхностном слое в обоих случаях периодического режима нагрева имеет максимум и минимум, что связано с постоянной переконденсацией влаги. В отличие от непрерывного режима средние значения температуры и давления пара в контрольных точках меньше, а прогрев осуществляется медленнее. Таким образом, при включении источника СВЧ происходит разогрев образца, увеличение давления пара, перемещение свободной влаги в холодные зоны и конденсация связанной влаги. При отключении СВЧ энергии имеет место процесс релаксации температуры – за счет теплопроводности, а давления пара – за счет проницаемости материала. Следует отметить, что в отличие от конвективного нагрева, где теплопередача происходит от поверхности к внутренним слоям материала и создающийся градиент давления, направленный к центру, препятствует перемещению влаги к поверхности и замедляет сушку, при СВЧ нагреве возникает значительный градиент внутреннего давления пара, направленный к поверхности, что ускоряет перенос влаги к поверхностным слоям. При дискретном подводе СВЧ энергии наблюдались более низкие градиенты температуры, давления пара и влагосодержания.

Заключение. Сформулирована взаимосвязанная система уравнений тепловлагопереноса и электродинамики для моделирования СВЧ сушки капиллярно-пористых материалов. Это позволяет с единых позиций описывать процессы сушки, сорбции и фильтрации жидкости в образце при неполном его насыщении с учетом СВЧ нагрева. Показана динамика изменения влажности, температуры, парциального давления пара, средней влажности и других параметров при вариации граничных условий, в том числе при импульсном микроволновом нагреве.

Работа выполнена при поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований, грант Ф06Р-111.

Обозначения

a – масса сорбируемой жидкости в единице объема, кг/м³; c_c – теплоемкость сухого образца, Дж/(кг·К); c_p , $c_{пл}$ и $c_{рж}$ – теплоемкость образца, пара и жидкости при постоянном давлении, Дж/(кг·К); E – напряженность электрического поля, В/м; \vec{E} – вектор напряженности электрического поля, В/м; F – функция, обратная к f ; H – напряженность магнитного поля, А/м; \vec{H} – комплексно-сопряженная величина магнитного поля; i – мнимая единица; I – сток массы, кг/(м³·с); k – проницаемость образца вдоль волокон, м²; $k_{п}$ и $k_{ж}$ – относительная фазовая проницаемость пара и жидкости; k_b – волновое число в свободном пространстве; L – толщина образца, м; m – пористость образца; $P_{отр}$ и $P_{ист}$ – мощности отраженного сигнала и источника, Вт/м²; P_s – давление насыщенного пара, Па; $p_{п}$ и $p_{ж}$ – давление пара и жидкости в образце, Па; $p_{ср}$ – давление пара в окружающей среде, Па; Q – сток тепла, Дж/(м³·с); $q_{п}$ и $q_{ж}$ – поток массы пара и жидкости, Дж/(м³·с); R – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К); r – удельная теплота фазового перехода, Дж/кг; Re – число Рейнольдса; S – коэффициент отражения электромагнитной волны; T , T_k и T_0 – температура в образце, камере и в начальный момент времени, К; $T_{ср}$ – температура среды, К; u – влагосодержание образца, кг/кг; $u_{ср}$ – влагосодержание на поверхности образца; x – координата, м; Z_H – характеристическое импеданное сопротивление; α – коэффициент теплообмена с окружающей средой, Вт/(м²·К); ϵ – диэлектрическая проницаемость, Ф/м; ϵ' и ϵ'' – действительная и мнимая части диэлектрической проницаемости; $\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12}$ – электрическая постоянная, Ф/м; $\eta_{ж}$ и $\eta_{п}$ – коэффициенты динамической вязкости жидкости и пара, Па·с; $\theta_{п}$ и $\theta_{ж}$ – насыщенность пара и жидкости в пористом теле; λ – коэффициент теплопроводности образца, Вт/(м·К); $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ – магнитная постоянная, Гн/м; ∇ – дифференциальный оператор; v' – молярный объем, м³/моль; v'' – молярная масса, кг/моль; ρ – плотность образца, кг/м³; ρ_c , ρ_s , $\rho_{п}$ и $\rho_{ж}$ – плотность сухой, насыщенной древесины, пара и жидкости, кг/м³; τ – время, с; φ_a – относительная влажность воздуха, %; φ – относительная влажность образца, %; ω – круговая частота, ГГц. Индексы: в – волновой; вкл – включение; выкл – выключение; е – равновесный; ж – жидкость; ист – источник; к – камера; отр – отраженный; п – пар; пад – падающий; пр – проходящий; с – сухой; ср – среда; эф – эффективное значение; s – насыщенный; 0 – начальный; max – максимальный; min – минимальный.

Литература

1. **Perré P. and Turner I. W.** A 3-D version of TransPore: a comprehensive heat and mass transfer computational model for simulating the drying of porous media//Int. J. Heat Mass Transfer. 1999. Vol. 42. Pp. 4501–4521.

2. **Ni H., Datta A. K., and Torrance K. E.** Moisture transport in intensive microwave heating of biomaterials: a multiphase porous media model//Int. J. Heat Mass Transfer. 1999. Vol. 42. Pp. 1501–1512.
3. **Zhang Zhe, Yang Shiming, and Liu Dengying.** Mechanism and mathematical model of heat and mass transfer during convective drying of porous materials//Heat Transfer. Asian Res. 1999. Vol. 28. Pp. 337–351.
4. **Perre P. and Turner I. W.** The use of numerical simulation as a cognitive tool for studying the microwave drying of softwood in an over-sized wavesuide//Wood Sci. Technol. 1999. Vol. 33. Pp. 445–446.
5. **Ratanadecho P., Aoki K., and Avagori M.** Influence of irradiation time, particle sizes, and initial moisture content during microwave drying of multi-layered capillary porous materials//J. Heat Transfer. 2002. Vol. 124, No. 1. Pp. 151–161.
6. **Адамович А. Л., Гринчик Н. Н., Кундас С. П., Терехов В. И.** Моделирование неізотермічного тепло- і вологопереноса в капілярно-пористих середовищах при мікрохвильовому нагріву//Теплофізика і аеромеханіка. 2004. Т. 11, № 2. С. 257–272.
7. **Гринчик Н. Н., Акуліч П. В., Куц П. С., Павлюкевіч Н. В., Терехов В. И.** К проблеме неізотермічного масопереноса в пористих середовищах//ИФЖ. 2003. Т. 76, № 6. С. 129–141.
8. **Гринчик Н. Н.** Процессы переноса в пористых средах, электролитах и мембранах. Минск: ИТМО им. А. В. Лыкова АН БССР, 1991.
9. **Шубин Г. С.** Сушка и тепловая обработка древесины. М.: Лесная промышленность, 1990.
10. **Баренблатт Г. И., Ентов Е. М., Рыжик В. Ю.** Теория нестационарной фильтрации жидкости и газа. М.: Недра, 1972.