

УДК 532.613

### МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЛАГОПЕРЕНОСА ПРИ КОНВЕКТИВНОЙ И МИКРОВОЛНОВОЙ СУШКЕ ДРЕВЕСИНЫ

канд. техн. наук, доц. А.Л. АДАМОВИЧ, канд. техн. наук, доц. Ю.Г. ГРОЗБЕРГ, О.А. КИЗИНА  
(Полоцкий государственный университет);  
д-р физ.-мат. наук, проф. Н.Н. ГРИНЧИК  
(Институт тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова, Минск);  
д-р техн. наук, проф. С.П. КУНДАС  
(Международный государственный экологический университет им. А.Д. Сахарова, Минск)

Предложена система дифференциальных уравнений, которая позволяет качественно и количественно исследовать процессы тепломассообмена при сушке капиллярно-пористых материалов, в частности при СВЧ-сушке, с учетом фильтрационного переноса жидкой и газообразной фаз, изменения диэлектрических и теплофизических характеристик материала и предусматривает взаимосвязанное и сквозное численное решение. Предложено уравнение изотермы десорбции древесины для использования в замыкающих соотношениях разработанной системы уравнений. Представлены и проанализированы результаты численного исследования конвективной сушки, СВЧ-сушки и комбинированной сушки образца древесины в одномерном случае. Дана оценка энергозатрат рассмотренных способов сушки. Представлены и проанализированы результаты численного моделирования процессов тепломассообмена при СВЧ-сушке образца толщиной, превышающей длину СВЧ-волны, а также при сушке с импульсным подводом СВЧ-энергии.

**Введение.** Тепловое воздействие электромагнитного поля СВЧ-диапазона широко используется для нагрева и сушки материалов [1 – 4]. В большинстве применений СВЧ-сушка приводит к снижению энергозатрат и улучшению качества готового продукта.

Методы моделирования нагрева и сушки материалов позволяют качественно и количественно исследовать процессы распространения тепла, влаги, электромагнитного поля в материалах, а также оптимизировать процесс обработки и конструкцию технологических камер и облучателей, исключить большое количество натуральных экспериментов.

Моделирование процессов СВЧ-сушки материалов сложная задача, находящаяся на границе нескольких наук – тепломассообмена в капиллярно-пористых материалах, законов двухфазной фильтрации, физики поверхностных явлений, электродинамики СВЧ.

**Описание физико-математической модели.** Физико-математическая модель сушки капиллярно-пористых материалов разрабатывалась на основе законов двухфазной фильтрации жидкости и газа в капиллярно-пористом материале, уравнения энергии и ряда замыкающих соотношений [5]. Система уравнений тепломассопереноса имеет вид:

$$\rho_0 \frac{\partial u}{\partial t} - \nabla \rho_l \frac{kk_l}{\mu_l} \nabla P_l = I; \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( \phi \rho_v - \frac{\rho_0}{\rho_l} u \rho_v \right) - \nabla \rho_v \frac{kk_v}{\mu_v} \nabla P_v = -I; \quad (2)$$

$$\rho C_{eff} \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla \lambda_{eff} \nabla T = LI + Q. \quad (3)$$

Для системы уравнений задавались соответствующие краевые условия:

- начальные условия:

$$u = u_0, \quad P_{v0} = P_v, \quad u_0, T_0, \quad T = T_0; \quad (4)$$

- граничные условия:

$$u = u_e(P_v, T), \quad \mathbf{n} \cdot \left( \rho_v \frac{kk_v}{\mu_v} \nabla P_v \right) = \alpha_{P_v} P_{vinf} - P_v, \quad \mathbf{n} \cdot \lambda_{eff} \nabla T = \alpha_T T_{inf} - T. \quad (5)$$

Давление пара  $P_{v0}$  в образце в начальный момент времени сушки определялось из изотермы. Давление пара в камере  $P_{vinf}$  определялось по  $id$ -диаграмме влажного воздуха по температуре и влажности воздуха в камере.

Капиллярное давление и теплота сорбции оценивались через обратные функции из изотермы десорбции  $u_e = u(\varphi, T)$  по уравнениям Кельвина, и Клапейрона – Клаузиуса соответственно:

$$P_l = P_v - P_c \quad P_c = \frac{-RT\rho_l}{M_l} \ln \varphi(u_e, T) \quad L = r_0 + \frac{-RT^2}{M_l} \left( \frac{\partial \ln P_v}{\partial T} \right), \quad (6)$$

где  $r_0$  – удельная теплота испарения воды ( $r_0 = 2500$  кДж/кг);  $M_l$  – молярная масса воды ( $M_l = 0,018$  кг/моль).

Интенсивность фазовых превращений при равновесном режиме сушки:

$$I = \rho_0 \frac{\partial u}{\partial T} = \rho_0 \left( \frac{\partial u_e}{\partial P_v} \frac{\partial P_v}{\partial t} + \frac{\partial u_e}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial t} \right). \quad (7)$$

Относительные фазовые проницаемости воды и пара:

$$k_{rl} = \left( \frac{u - u_z}{u_{\max} - u_z} \right)^{3.5}, \quad k_{rl} = 0 \text{ при } u < u_e; \quad k_{rv} = \left( \frac{u_{\max} - u}{u_{\max} - u_z} \right)^{3.5}, \quad (8)$$

где  $u_z$  – максимальное гигроскопическое влагосодержание, кг/кг;  $u_{\max}$  – влагосодержание древесины при полном насыщении, кг/кг:

$$u_z = 0,325 - 0,001 \cdot T; \quad u_{\max} = \frac{m\rho_e}{\rho_0} = \frac{1 - \rho_0/\rho_{\text{дв}}}{\rho_0} \rho_e, \quad (9)$$

где  $m$  – пористость;  $\rho_0$  и  $\rho_e$  – плотность сухой древесины и воды соответственно, кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_{\text{дв}}$  – плотность древесного вещества ( $\rho_{\text{дв}} = 1530$  кг/м<sup>3</sup>).

В качестве изотермы сорбции принималось соотношение:

$$u_e = \frac{A}{B - C \cdot \ln \varphi} + \frac{D}{1 - E \cdot \ln \varphi}, \quad (10)$$

где  $A, B, C, D$  и  $E$  – постоянные и зависящие от температуры коэффициенты.

Первое слагаемое в (10) описывает равновесное влагосодержание в области ниже предела гигроскопичности  $u_z$  аналогично формуле Поснова [6] для древесины; второе – влагоотдачу в области от  $u_z$  до  $u_{\max}$  (при  $\varphi = 1$ ), полагая, что при  $\varphi \rightarrow 1$  происходит заполнение макропор. Непосредственное получение изотермы десорбции при  $\varphi \rightarrow 1$  практически затруднено, поэтому использовались данные ртутной порометрии и уравнение Кельвина.

Так как процесс сушки в основном проходит в направлении десорбции, при моделировании пренебрегаем гистерезисом ветвей изотермы. График изотермы десорбции древесины при  $T = \text{const} = 300$  К, полученный по выражению (10), представлен на рисунке 1.

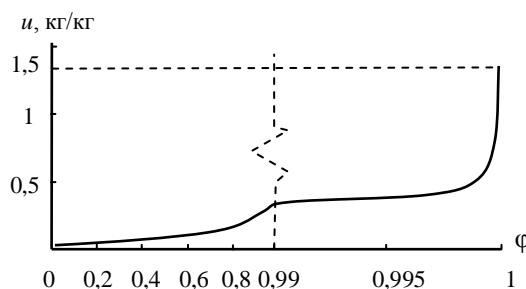


Рис. 1. Изотерма десорбции при  $u_{\max} = 1,35$  кг/кг,  $m = 0,67$ ,  $\rho_0 = 500$  кг/м<sup>3</sup>  
( $A = 1, B = 2,89, C = 12, D = 1, E = 5000$  из (10))

Все теплофизические характеристики образца принимались соответствующими древесине (сосна). В качестве физических параметров материала образца принимались параметры древесины с учетом изменения их свойств в процессе нагрева и сушки (таблица).

Распространение СВЧ-поля описывалось уравнением Гельмгольца:

$$-\Delta E - \omega^2 \mu_0 \varepsilon_0 \varepsilon E = 0. \quad (11)$$

Диэлектрические характеристики древесины  $\varepsilon$  описывались соотношениями, полученными в [7] на частоте 2,45 ГГц.

## Тепло- и электрофизические характеристики древесины и процесса сушки

Наименование показателей	Обозначение	Единицы измерения	Значение
Пористость	$\phi$	–	0,67
Плотность сухой древесины	$\rho_0$	кг/м <sup>3</sup>	500
Удельная эффективная теплоемкость	$C$	Дж/(кг·К)	$3,5 \cdot T + 3200 - 2,18 \cdot 10^2 \cdot 130 - 100 \cdot u^{2,28}$
Коэффициент теплопроводности	$\lambda$	Вт/(м·К)	$0,00222u(T + 273) + 10^{0,295 \lg 100u} - 1,022$
Абсолютная проницаемость вдоль (поперек) волокон	$k_l$	м <sup>2</sup>	$10^{-14}$ ( $10^{-17}$ )
Коэффициент динамической вязкости воды	$\mu_l$	кг/(м·с)	$5,5 \cdot 10^{-4}$
Коэффициент динамической вязкости пара	$\mu_v$	кг/(м·с)	$1,6 \cdot 10^{-5}$
Давление пара в камере	$P_{vinf}$	Па	из <i>id</i> -диаграммы
Температура в камере	$T_{vinf}$	К	300
Коэффициент парообмена	$\alpha_{pv}$	кг/(м <sup>2</sup> ·с·Па)	$10^{-6}$
Коэффициент теплообмена	$\alpha_T$	Вт/(м <sup>2</sup> ·К)	20
Начальное влагосодержание	$u_0$	кг/кг	0,8
Начальная температура	$T_0$	К	300
Напряженность падающего СВЧ-поля	$E_0$	В/м	950

Система дифференциальных уравнений с краевыми условиями решалась для одномерного случая сушки пластины толщиной 10 см методом конечных элементов, когда СВЧ-волна падает по нормали к поверхности образца. В процессе моделирования дополнительно рассчитывалась затрачиваемая энергия СВЧ-поля и тепла на сушку тем или иным способом.

**Конвективная сушка пластины.** При моделировании температура в камере принималась равной 90 °С. Результаты моделирования, представленные на рисунке 2, показывают классический пример конвективной сушки, когда происходит постепенное углубление зоны испарения, сопровождающееся прогревом высушенных участков [6]. Во влажных центральных областях температура медленно падает, что обусловлено расходом энергии на парообразование. Расчетная затраченная энергия на сушку пластины до влагосодержания 10 % составила 27 кВт·ч при продолжительности сушки  $2,2 \cdot 10^5$  с.

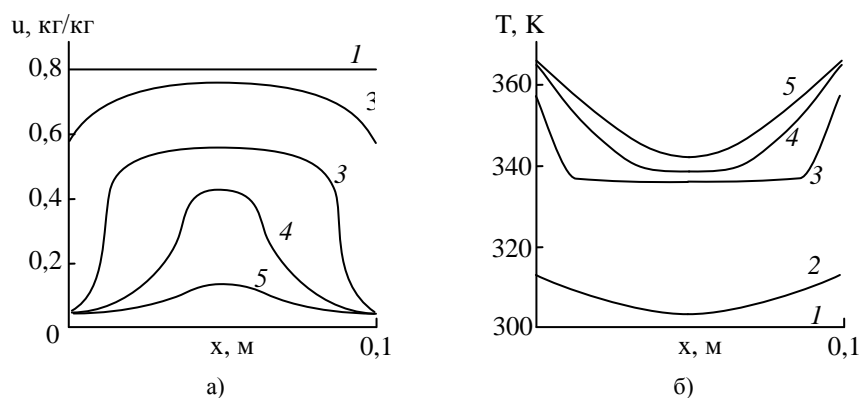


Рис. 2. Распределение влагосодержания (а) и температуры (б) в пластине при конвективной сушке: 1 –  $t = 0$  с; 2 –  $5 \cdot 10^3$ ; 3 –  $5 \cdot 10^4$ ; 4 –  $1,5 \cdot 10^5$ ; 5 –  $2,2 \cdot 10^5$

**СВЧ-сушка пластины.** Предварительно подбиралась напряженность падающего СВЧ-поля так, чтобы не вызывать перегрева пластины выше 100 °С. Согласно результатам моделирования, представленным на рисунке 3, СВЧ-сушка протекает с меньшими градиентами влагосодержания по сравнению с конвективной. Происходит нагрев и интенсивное испарение влаги из центральной части пластины и ее движение к краям под действием давления пара и эффекта конденсации на холодных участках. Расчетная затраченная энергия на СВЧ-сушку составила 60 кВт·ч при продолжительности сушки  $2,74 \cdot 10^5$  с. Значительная затраченная мощность на сушку обусловлена стоком тепла в окружающую среду от образца (33 кВт·ч).

**Комбинированная сушка пластины.** Дополнительно проводилось моделирование комбинированного способа сушки, совмещающего нагрев пластины сушильным агентом и СВЧ-полем. Затраченная энергия на сушку: 17 кВт·ч – СВЧ-поле; 10,6 кВт·ч – конвективный нагрев, при значительно меньшем времени сушки – в 3 раза по сравнению с конвективной сушкой, или  $7,2 \cdot 10^4$  с, в 3,8 раза при СВЧ-сушке.

**Электродинамические и тепломассообменные процессы при СВЧ-сушке в сверхразмерной пластине  $d \gg \lambda$ .** Особый интерес представляет СВЧ-сушка материалов толщиной больше длины волны воздей-

ствующего поля. Исследовалась кинетика и закономерности внутреннего переноса тепла, воды, пара и электромагнитной энергии в материалах толщиной 0,5 м. Анализ полученных результатов (рис. 4) показывает, что в процессе прогрева в течение  $t = 3000$  с СВЧ-поле затухает, не достигая границы образца, поэтому в этот период времени нагрев происходит без локализации зон нагрева, связанных с образованием стоячей волны.

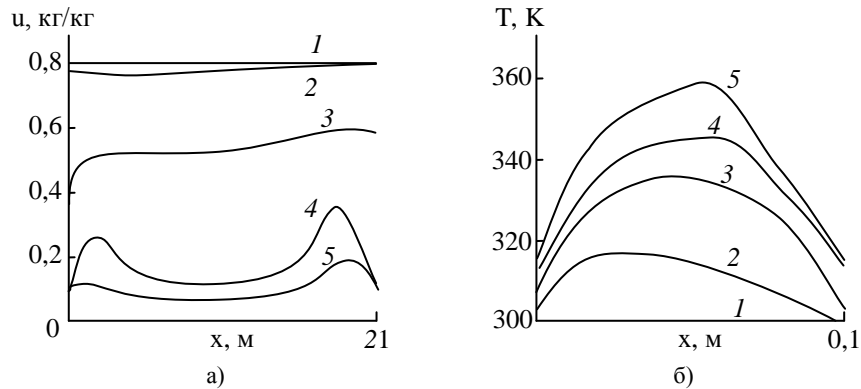


Рис. 3. Распределение влагосодержания (а) и температуры (б) в пластине при СВЧ-сушке:  
 1 –  $t = 0$  с; 2 –  $5 \cdot 10^3$ ; 3 –  $5 \cdot 10^4$ ; 4 –  $2 \cdot 10^5$ ; 5 –  $2,7 \cdot 10^5$

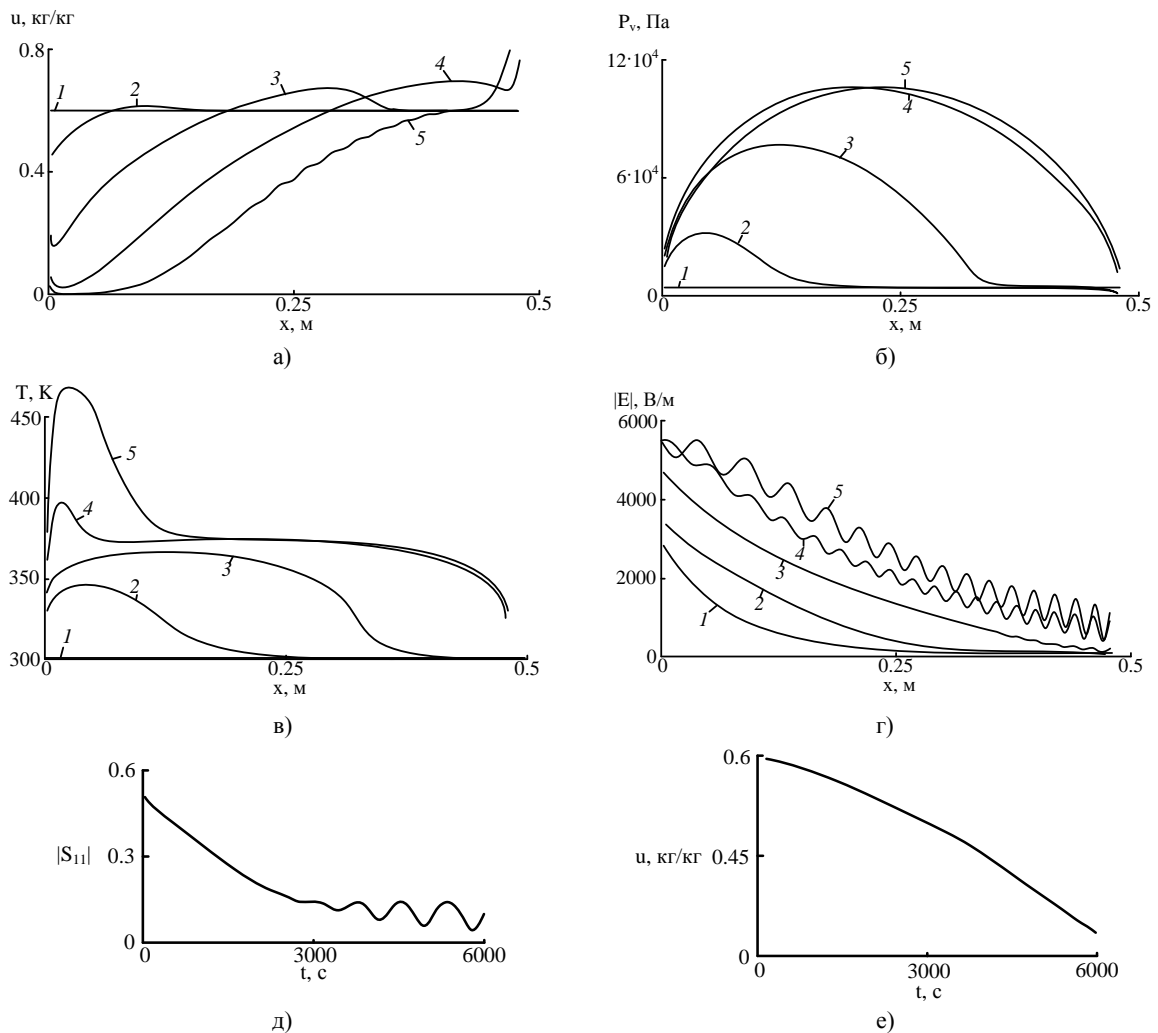


Рис. 4. Распределение влагосодержания (а), давления пара (б), температуры (в), напряженности  $|E|$  СВЧ-поля (г) в образце в различные моменты времени:  
 1 –  $t = 0$  с; 2 –  $t = 500$  с; 3 –  $t = 2000$  с; 4 –  $t = 4000$  с; 5 –  $t = 6000$  с;  
 изменение модуля коэффициента отражения (д) и кривая сушки (е)

В течение всего периода нагрева влага перемещается под действием градиента давления и явлений конденсации в удаленные участки материала. Из-за большого сопротивления переносу пара в направлении прогрева происходит значительное увеличение и дальнейшая стабилизация давления пара. Одновременно происходит повышение температуры до 375 К и удержание ее на этом уровне в результате интенсивного парообразования. Начиная с  $t = 3000$  с происходит образование стоячей волны в результате отражения ее от противоположной границы образца. Напряженность СВЧ-поля и удельная мощность тепловыделения имеют максимумы и минимумы, а характер коэффициента отражения говорит о резонансных явлениях в диэлектрическом образце. Начиная с  $t = 4000$  с, происходит спонтанное увеличение температуры в сухих участках, а также локальный перегрев материала в результате того, что скорость роста температуры на этом участке превосходит скорость стока тепла в окружающую среду. Рост температуры в сухих участках обусловлен наличием диэлектрических потерь сухой древесины. Практически это явление происходит с тлением и обугливанием внутренних участков материала. На этом этапе необходимо использовать импульсный режим сушки.

С практической точки зрения использование СВЧ-энергии для термообработки влажных дисперсных материалов достаточной толщины позволяет значительно интенсифицировать процессы прогрева, переноса тепла и влаги в результате теплового действия, проникающего во влажный материал СВЧ-поля. Кроме того, создается значительный градиент давления пара, направленный к поверхности, что приводит к резкой интенсификации переноса свободной влаги к поверхности материала и снижению затрат энергии на внутреннее парообразование.

**Тепловлагоперенос при импульсном режиме СВЧ-сушки.** Режим импульсного нагрева широко используется в различных областях технологии интенсивной термообработки материалов с применением конвективных источников тепла благодаря возможности значительного снижения градиентов температур и затрат энергоресурсов. До настоящего времени исследования процессов внутреннего переноса массы и энергии при термообработке влажных пористых материалов СВЧ-энергией в импульсном режиме работы источника СВЧ досконально не проводились.

Исследуем влияние дискретного СВЧ-нагрева плоского образца толщиной 0,06 м влажного материала, теплофизические и диэлектрические свойства которого определены выше, на кинетику сушки. Напряженность падающего СВЧ-поля  $E_0 = 3000$  В/м. Дискретность СВЧ-облучения в модели задавалась с использованием логических функций для удельной мощности внутренних источников тепла в уравнении энергии. Расчет кинетики сушки производился для 3-х режимов нагрева: непрерывной подачи СВЧ-излучения, импульсного нагрева с длительностью импульсов  $t_{\text{вкл}} = 200$  с, скважностью  $\Pi = 2$  и с  $t_{\text{вкл}} = 500$  с, скважностью  $\Pi = 2$ . Результаты исследований иллюстрирует рисунок 5.

На начальном этапе непрерывного режима СВЧ-нагрева влагосодержание в приповерхностном слое увеличивается, а затем, по мере прогрева образца, резко уменьшается (см. рис. 5). Однако из-за конденсации в конце процесса сушки влагосодержание в приповерхностных слоях 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 становится постоянной в течение всего периода сушки. Однако, начиная с  $t = 3000$  с, температура резко возрастает, а давление пара и влагосодержание снижается с постоянной скоростью. Указанный рост температуры вызван, во-первых, поддержанием термодинамического равновесия при испарении и разрушении связи гигроскопической влаги и материала при  $u < 0,3$  кг/кг, во-вторых, наличием собственных диэлектрических потерь и низкой теплопроводностью сухого материала.

Дискретный режим тепловыделения характеризуется меньшей скоростью нагрева и сушки в сравнении с непрерывным режимом нагрева. Влагосодержание в поверхностном слое в обоих случаях дискретного режима нагрева имеет периодическую форму, 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. При отключении СВЧ-энергии происходит обратный процесс релаксации температуры (за счет теплопроводности) и 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, направленного к поверхности, что ускоряет перенос влаги к поверхностным слоям. Использование дискретного режима может снизить степень участия градиента давления пара в переносе жидкости, а в результате и скорость сушки. Оценить снижение затрат энергии при сушке материала в дискретном режиме  $P_{\text{дискр}}$  по сравнению с непрерывным режимом  $P_{\text{непр}}$  можно, определив общее время высыхания  $T_{\text{дискр}}$  и  $T_{\text{непр}}$  при соответствующих режимах исходя из результатов расчета (рис. 5, к):

$$P_{\text{дискр}} = P \frac{T_{\text{дискр}}}{\Pi}, P_{\text{непр}} = P T_{\text{непр}}, \frac{P_{\text{дискр}}}{P_{\text{непр}}} \approx 0,89 = 89 \%. \quad (12)$$

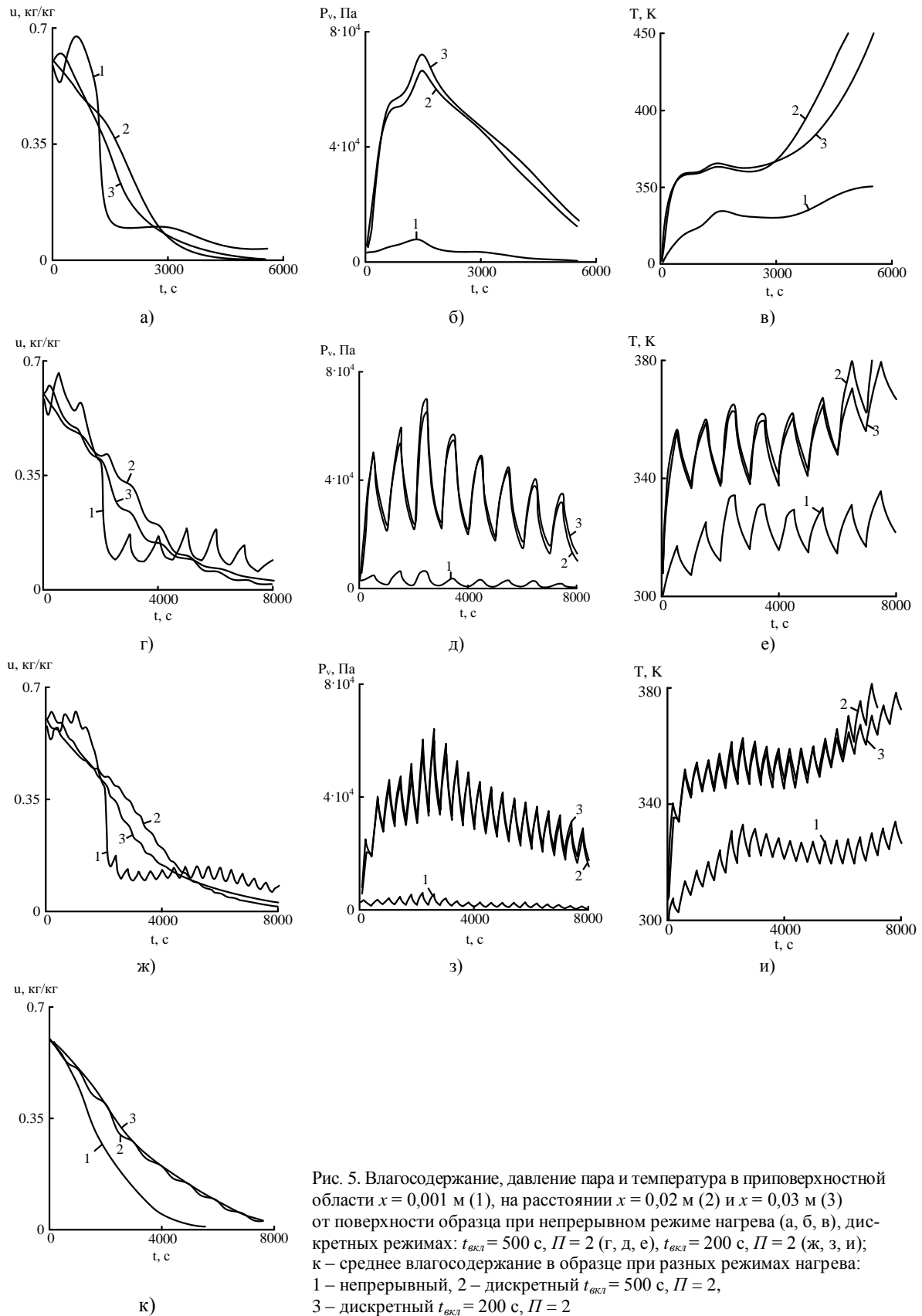


Рис. 5. Влагосодержание, давление пара и температура в приповерхностной области  $x = 0,001$  м (1), на расстоянии  $x = 0,02$  м (2) и  $x = 0,03$  м (3) от поверхности образца при непрерывном режиме нагрева (а, б, в), дискретных режимах:  $t_{вкл} = 500$  с,  $\Pi = 2$  (г, д, е),  $t_{вкл} = 200$  с,  $\Pi = 2$  (ж, з, и); к – среднее влагосодержание в образце при разных режимах нагрева: 1 – непрерывный, 2 – дискретный  $t_{вкл} = 500$  с,  $\Pi = 2$ , 3 – дискретный  $t_{вкл} = 200$  с,  $\Pi = 2$

Несмотря на увеличение времени сушки при дискретном подводе СВЧ-энергии будут иметь место более низкие градиенты температуры, пара и влагосодержания при одновременном снижении энергозатрат около 11...12 % по сравнению с непрерывным режимом СВЧ-термообработки. Также значительно

снижается возможность локального перегрева в конце цикла сушки. Кроме того, дискретный режим нагрева позволяет снизить электрические и тепловые нагрузки на источники СВЧ-энергии.

**Заключение.** Обобщена и сформулирована система дифференциальных уравнений, описывающая процессы СВЧ-нагрева влажных недеформируемых капиллярно-пористых материалов во взаимосвязи с законами СВЧ-электродинамики с учетом фильтрационного переноса жидкой и газообразной фаз, изменения диэлектрических и теплофизических характеристик материала. В отличие от известных работ по описанию процессов термообработки дисперсных материалов СВЧ-энергией предложенная модель в большей степени соответствует нелинейной природе изучаемого явления, поскольку в общем виде включает уравнения теплового переноса и электродинамики и предусматривает взаимосвязанное и сквозное решение. Предложенная система уравнений позволяет качественно и количественно исследовать процессы тепло-массообмена при сушке капиллярно-пористых материалов.

Проведенные расчеты показывают, что наибольшую скорость сушки обеспечивает комбинированный метод. Очевидно, что увеличение скорости сушки обусловлено быстрым прогревом образца и созданием температурного градиента, направленного к краям пластины. В дальнейшем для оценки реальных затрат электросетевой энергии на сушку материалов тем или иным способом необходимо учесть КПД конвективного процесса сушки (0,4...0,5), КПД СВЧ-магнетрона (0,7...0,75), а также расходы на электромеханическую энергию вентиляторов.

При использовании импульсного подвода СВЧ-энергии в материале снижаются градиенты температуры, пара, влагосодержания и вероятность внутреннего перегрева при одновременном снижении энергозатрат на 11...12 %, а также облегчаются тепловые и электрические режимы работы источников СВЧ-энергии.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Морозов, Г.А. Микроволновые технологии в промышленности и сельском хозяйстве: современные достижения и новые подходы / Г.А. Морозов // Антенны. – 1998. – № 1(40). – С. 88 – 96.
2. Tuery, J. Microwave: industrial, scientific, and medical applications / J. Tuery. – Boston: Artech House Publishers, 1992. – 475 p.
3. Microwave processing of materials / National Materials Advisory Board. – Washington: National Academy Press, 1994. – 150 c.
4. СВЧ-энергетика: в 3 т. / под ред. Э. Окресса. – М.: Мир, 1971. – Т. 2: Применение энергии сверхвысоких частот в промышленности. – 272 с.
5. Моделирование процессов термовлагопереноса в капиллярно-пористых средах / С.П. Кундас [и др.]. – Ин-т тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова НАН Беларуси, 2007. – 292 с.
6. Лыков, А.В. Теория сушки / А.В. Лыков. – 2-е изд. – М.: Энергия, 1968. – 470 с.
7. Определение комплексной диэлектрической проницаемости древесины в СВЧ-диапазоне / А.Л. Адамович // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. С. Фундаментальные науки. – 2005. – № 10. – С. 37 – 43.

Поступила 10.07.2010

#### SIMULATION OF HEAT AND MOISTURE TRANSFER DURING CONVECTIVE AND MICROWAVE DRYING OF WOOD

A. ADAMOVICH, Y. GROZBERG, O. KIZINA, N. GRINCHIK, A. LYKOV, S.P. KUNDAS

*The system of differential equations is proposed, which can qualitatively and quantitatively investigate the processes of heat and mass transfer during drying of capillary-porous materials, in particular in the microwave drying in the light of filtration transport of liquid and gaseous phases, the changes of dielectric and thermal characteristics of the material and providing an interconnected and a through numerical solution. An equation of desorption isotherms of wood for use in the closure relations developed system of equations. Presented and analyzed the results of numerical studies of convective drying, microwave drying and combined drying of the sample timber in one-dimensional case. Evaluation of energy considered methods of drying is given. Presented and analyzed the results of numerical simulation of heat and mass transfer in microwave drying of the sample with a thickness greater than the length of the microwave wavelength, and drying with a pulsed supply of microwave energy.*