



МЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ДРЕВЕСИНЫ И ДРЕВЕСИНОВЕДЕНИЕ

УДК 674.047

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2018.2.88

АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ СУШКИ ДРЕВЕСИНЫ СУЩЕСТВЕННО НЕИЗОТЕРМИЧЕСКИМИ РЕЖИМАМИ

А.Г. Гороховский, д-р техн. наук, проф.

Е.Е. Шишкина, д-р техн. наук, доц.

Е.В. Старова, асп.

А.А. Миков, асп.

Уральский государственный лесотехнический университет, Сибирский тракт, д. 37, г. Екатеринбург, Россия, 620100; e-mail: elenashishkina@yandex.ru

Развитие технологии сушки древесины в настоящее время идет в основном путем совершенствования режимов сушки на основе современных методов компьютерного моделирования и оптимизации процессов. При этом перспективным направлением является совершенствование режимов сушки в части их энергоэффективности и обеспечения требуемого потребителями качества продукции. Предмет настоящего исследования – теоретический анализ тепломассообмена при сушке пиломатериалов режимами, основанными на явлении термовлагопроводности. Подобные режимы характеризуются наличием градиента температуры по сечению сохнущего сорта-мента, что позволяет классифицировать их как существенно неизотермические. Для анализа процессов неизотермического переноса могла бы быть использована модель, базирующаяся на уравнениях двухфазной фильтрации, изотермах сорбции, термодинамических уравнениях Кельвина–Клайперона–Клаузиуса, но это сопряжено с существенными математическими затруднениями. Цель исследования – корректировка решения системы уравнений тепломассообмена в условиях существенной неизотермичности. Методологической основой исследования является физическая модель капиллярно-пористой структуры древесины, учитывающая коллоидную природу клеточной стенки, а также модель переноса влаги в капиллярах древесины. У капиллярно-пористых тел, к которым можно отнести древесину, влагообмен со средой происходит за счет удаления жидкости из капилляров, выходящих на поверхность. При равновесии жидкости в капилляре над ее мениском на стенке образуется полимолекулярная пленка толщиной, уменьшающейся вверх по определенному закону, который может быть найден, если известно расклинивающее давление или насыщенность пара пленки в функции ее толщины. Для оценки вклада пленочного механизма переноса в общий поток влаги может быть использована система уравнений Дерягина–Нерпина. На основе этого было проведено компьютерное моделирование процессов капиллярного влагопереноса в целях уточнения влияния термовлагопроводности на общий процесс тепломассообмена в коллоидном капиллярно-пористом теле – древесине. В ходе анализа процессов тепломассообмена получены формулы для определения критерия фазового перехода и термо-

Для цитирования: Гороховский А.Г., Шишкина Е.Е., Старова Е.В., Миков А.А. Анализ процессов сушки древесины существенно неизотермическими режимами // Лесн. журн. 2018. № 2. С. 88–96. (Изв. высш. учеб. заведений). DOI: 10.17238/issn0536-1036.2018.2.88

градиентного коэффициента для существенно неизотермических режимов сушки древесины. Результаты работы могут быть использованы при изучении капиллярно-пористой структуры древесины и определении параметров режимов сушки пиломатериалов. К принципиально новым выводам по итогам исследования можно отнести то, что направление градиента температуры в сечении сохнущего сортимента тормозит (или увеличивает) поток влаги в капиллярах, возникающий на основе пленочного механизма переноса, вызванного расклинивающим давлением. Это явление существенно влияет на величину критерия фазового перехода, а также вызывает некоторую асимметричность потоков влаги при изменении направления вектора градиента температуры.

Ключевые слова: термовлагопроводность, тепломассообмен, критерий фазового перехода, режимы сушки древесины, термоградиентный коэффициент.

Введение

Развитие технологии сушки древесины в настоящее время идет в основном путем совершенствования режимов сушки на основе современных методов компьютерного моделирования и оптимизации процессов [2]. При этом перспективным направлением является совершенствование режимов сушки в части их энергоэффективности и обеспечения требуемого потребителями качества продукции. Особый интерес в этом отношении представляют режимы, базирующиеся на явлении термовлагопроводности и характеризующиеся наличием градиента температуры по сечению сохнущего сортимента, что позволяет классифицировать их как существенно неизотермические.

Можно выделить целый ряд теоретических работ, связанных с моделированием неизотермического тепломассообмена в капиллярно-пористых средах [1, 4, 5, 9, 11–14], в том числе и в древесине. Авторы отмечают, что в настоящее время при описании совместного тепло- и массопереноса в капиллярно-пористых средах даже для простейшего случая не существует единого феноменологического подхода, причем расхождения в физической и математической постановке подобных задач в теории сушки, сорбции и двухфазной фильтрации носят принципиальный характер. Известные подходы практически не используют достижения в области термодинамики и физики поверхностных явлений. Так, в работе [5] предпринята попытка разработать феноменологическую модель нестационарных процессов взаимосвязанного тепловлагопереноса в капиллярно-пористых средах с учетом влияния капиллярных и поверхностных сил, интенсивности массообмена между фазами и термокапиллярных течений. При этом предложена математическая модель тепловлагопереноса, базирующаяся на уравнениях двухфазной фильтрации, изотермах сорбции, термодинамических уравнениях Кельвина–Клайперона–Клаузиуса. Следует отметить, что уравнения двухфазной фильтрации для коллоидных капиллярно-пористых сред (типа древесины) не сформулированы, что значительно усложняет даже постановку и без того чрезвычайно сложной задачи, практическое решение которой сопряжено с применением метода взвешенных невязок Галеркина вкуче с квадратурной формулой Гаусса–Любатто для вычисления подынтегральных выражений в системе уравнений неизотермического влагопереноса:

$$\begin{aligned}
& \int_{\Omega} \begin{vmatrix} N_i & C_v & 0 \\ N_i & C_{hv} & N_i C_{wp} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \frac{\partial T}{\partial t} \\ \frac{\partial \theta_{liq}}{\partial t} \end{vmatrix} \partial \Omega - \int_{\Omega} \begin{vmatrix} N_i L & \frac{\partial \theta_{liq}}{\partial t} \\ 0 & \end{vmatrix} \partial \Omega + \int_{\Omega} \begin{vmatrix} N_i L \rho_{liq} \nabla v_{liq} \\ 0 \end{vmatrix} \partial \Omega - \\
& - \int_{\Omega} \begin{vmatrix} 0 \\ \nabla N_i K_w \rho_{liq} g \nabla D \end{vmatrix} \partial \Omega + \int_{\Omega} \begin{vmatrix} N_i \nabla \lambda \nabla N_i & 0 \\ N_i \nabla K_{hv} \nabla N_i & N_i \nabla K_{wv} \nabla N_i \end{vmatrix} \begin{vmatrix} T_j \\ P_{liqj} \end{vmatrix} \partial \Omega - \\
& - \int_{\Gamma} \begin{vmatrix} N_i \alpha T_{\infty} \\ 0 \end{vmatrix} \partial \Gamma + \int_{\Gamma} \begin{vmatrix} N_i \alpha N_j & 0 \\ 0 & 0 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} T_j \\ P_{liqj} \end{vmatrix} \partial \Gamma - \int_{\Gamma} \begin{vmatrix} N_i q_h \\ N_i (q_v + q_{liq}) \end{vmatrix} \partial \Gamma - \\
& - \int_{\Gamma} \begin{vmatrix} N_i \varepsilon \sigma T_{\infty}^4 \\ 0 \end{vmatrix} \partial \Gamma + \int_{\Gamma} \begin{vmatrix} N_i \varepsilon \sigma N_j^4 & 0 \\ 0 & 0 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} T_j^4 \\ P_{liqj} \end{vmatrix} \partial \Gamma = 0.
\end{aligned}$$

Совершенно очевидно, что в подобной постановке задача не может быть решена.

В то же время для анализа процессов сушки древесины с использованием явления термовлагопроводности может быть использован подход, реализованный в работе [3].

Объекты и методы исследования

Для наиболее простого случая, когда градиенты общего давления отсутствуют (процессы тепломассобмена при низкотемпературной конвективной сушке), при анализе процессов обычно используют следующую систему дифференциальных уравнений в частных производных [6]:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \nabla^2 t + \frac{\varepsilon \rho}{c} \frac{\partial u}{\partial \tau}; \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} = a_m \nabla^2 u + a_m \delta \nabla^2 t. \quad (2)$$

Начальные и граничные условия III рода для неограниченной пластины:

$$t(x, 0) = f(x);$$

$$u(x, 0) = \varphi(x);$$

$$-\lambda \frac{\partial t(R, \tau)}{\partial x} + \alpha [t_c - t(R, \tau)] - (1 - \varepsilon) \rho \alpha_m [u(R, \tau) - u_p] = 0;$$

$$a_m \frac{\partial u(R, \tau)}{\partial x} + a_m \delta \frac{\partial t(R, \tau)}{\partial x} + \alpha_m [u(R, \tau) - u_p] = 0.$$

Условие симметрии:

$$\frac{\partial t(0, \tau)}{\partial x} = \frac{\partial u(0, \tau)}{\partial x} = 0.$$

В вышеприведенных формулах использованы следующие обозначения:

- t – температура древесины;
- τ – время;
- a – коэффициент температуропроводности;
- ε – критерий фазового перехода;
- ρ – плотность древесины;
- c – удельная теплоемкость;
- u – влажность древесины;
- a_m – коэффициент влагопроводности;

δ – термоградиентный коэффициент;
 λ – коэффициент теплопроводности;
 R – половина толщины доски;
 α – коэффициент теплообмена;
 t_c – температура среды;
 u_p – равновесная влажность древесины;
 α_m – коэффициент влагообмена.

Очевидно, что для корректного решения системы уравнений (1)–(2) в случае неизотермического тепломассообмена необходимо знать значения ε и δ в функции текущей влажности при различном направлении вектора градиента температуры в сохнувшем сортименте [10].

В ходе ранее проводимых исследований нами была предложена модель капиллярно-пористой структуры древесины с учетом коллоидной природы клеточной стенки и модели переноса влаги в капиллярах древесины.

У капиллярно-пористых тел, каким является древесина, влагообмен со средой происходит за счет удаления жидкости из капилляров, выходящих на поверхность.

При равновесии жидкости в капилляре над ее мениском на стенке образуется полимолекулярная пленка толщиной, уменьшающейся вверх по определенному закону, который может быть найден, если известно расклинивающее давление или насыщенность пара пленки в функции ее толщины.

Для оценки вклада пленочного механизма переноса в общий поток влаги может быть использована система уравнений Дерягина–Нерпина [7]:

$$\left. \begin{aligned} -\eta \frac{\partial^2 V_x}{\partial z^2} &= \frac{\partial \Pi}{\partial x} - \frac{\partial P_c}{\partial x} \\ -\eta \frac{\partial^2 V_y}{\partial z^2} &= \frac{\partial \Pi}{\partial y} - \frac{\partial P_c}{\partial y} \end{aligned} \right\},$$

где η – вязкость жидкости;

V_x, V_y – скорость перемещения слоев жидкости по осям x, y, z , последняя из которых направлена по нормали к одной из поверхностей раздела;

Π – расклинивающее давление, являющееся функцией толщины слоя;

P_c – внешнее давление на слой.

Необходимо отметить, что все исследования с использованием модели коллоидной капиллярно-пористой структуры древесины ранее проводились для изотермических условий. Поэтому нами был выполнен вычислительный эксперимент по определению влияния термовлагопроводности на общий процесс тепломассообмена в коллоидном капиллярно-пористом теле, для оценки влияния термовлагопроводности – компьютерное моделирование процессов капиллярного влагопереноса с использованием расчетных формул Н.В. Чураева [8].

Результаты исследования и их обсуждение

На рис. 1 приведены расчетные зависимости критерия фазового перехода от градиента температуры.

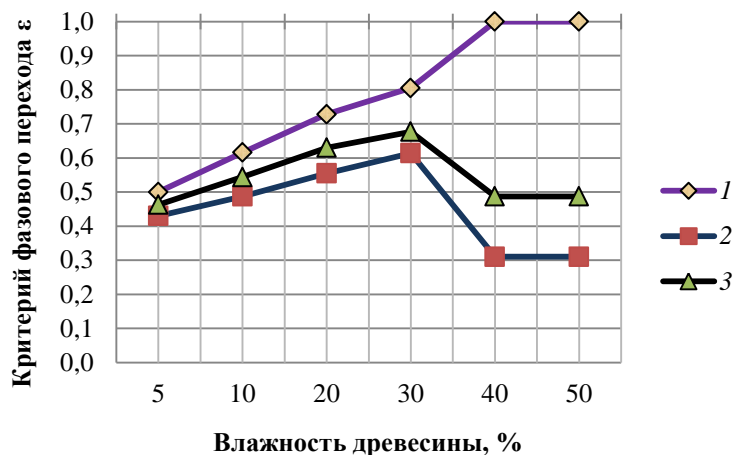


Рис. 1. Зависимость критерия фазового перехода от градиента температуры: 1 – градиент температуры положителен; 2 – отрицателен; 3 – изотермический перенос

При этом можно отметить, что свободная влага при положительном направлении градиента температуры удаляется в виде пара ($\varepsilon = 1,0$), т. е. тормозящее влияние положительного градиента температуры оказывается настолько значительным, что перекрывает поток жидкостной влаги. С другой стороны, это полностью подтверждает гипотезу А.И. Фоломина об удалении в парообразном виде свободной влаги [11].

При решении системы уравнений тепломассообмена необходимо представить критерий фазового перехода в виде

$$\varepsilon = k_1(\Delta t)\varepsilon_1(u) + k_2(\Delta t)\varepsilon_2(u),$$

где $k_1(\Delta t)$, $k_2(\Delta t)$ – температурные коэффициенты, зависящие от направления градиента температуры;

$\varepsilon_1(u)$, $\varepsilon_2(u)$ – критерии фазового перехода.

Коэффициенты $k_1(\Delta t)$ и $k_2(\Delta t)$ зависят от влажности древесины (рис. 2).

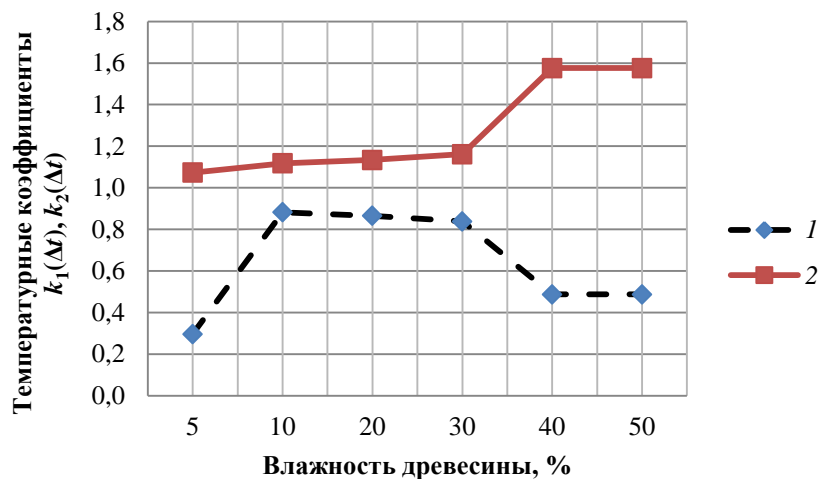


Рис. 2. Зависимость температурных коэффициентов $k_1(\Delta t)$ и $k_2(\Delta t)$ от градиента температуры: 1 – градиент температуры положителен; 2 – отрицателен

Расчетные формулы для определения температурных коэффициентов и критериев фазового перехода:

$$k_1(\Delta t) = -5 \cdot 10^{-3} \Delta t^3 + 1,018 \cdot 10^{-3} \Delta t^2 + 0,55 \Delta t + 0,399 ;$$

$$k_2(\Delta t) = 5 \cdot 10^{-3} \Delta t^3 + 1,018 \cdot 10^{-3} \Delta t^2 - 0,55 \Delta t + 0,399 ;$$

$$\varepsilon_1(u) = 42,054u^5 - 94,787u^4 + 75,965u^3 - 27,191u^2 + 5,229u + 0,298 ;$$

$$\varepsilon_2(u) = -78,103u^5 + 170,324u^4 - 125,386u^3 + 34,667u^2 - 2,778u + 0,506 .$$

При решении системы уравнений теплообмена (1)–(2) необходимо учитывать следующее.

1. Существует некоторая асимметричность потоков влаги при изменении направления вектора градиента температуры.

2. Уравнение влагопроводности (2) в таком случае приобретает следующий вид:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = a_m \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + a_m \delta k_\delta \frac{\partial^2 t}{\partial x^2},$$

где k_δ – коэффициент, учитывающий асимметричность потоков влаги,

$$k_\delta = k_1(\Delta t)k_{\delta 1}(u) + k_2(\Delta t)k_{\delta 2}(u);$$

$$k_{\delta 1}(u) = -84,154u^5 + 185,116u^4 - 139,868u^3 + 42,552u^2 - 5,434u + 1,112;$$

$$k_{\delta 2}(u) = 98,812u^5 - 217,104u^4 + 163,626u^3 - 49,458u^2 + 6,208u + 0,862.$$

Данные, полученные нами в результате теоретических исследований, позволили в дальнейшем внести корректировки в методику анализа процессов сушки при неизотермичности используемых режимов [9].

Выводы

1. Для анализа процессов неизотермического переноса могла бы быть использована модель, базирующаяся на уравнениях двухфазной фильтрации, изотермах сорбции, термодинамических уравнениях Кельвина–Клайперона–Клаузиуса, но это сопряжено с существенными математическими затруднениями.

2. В зависимости от направления градиента температуры термовлагопроводность может ускорять (или тормозить) процесс влагоудаления. Тормозящий эффект может существенно уменьшить и даже полностью остановить поток влаги.

3. Наиболее существенно термовлагопроводность влияет на удаление свободной влаги. При влажности древесины менее 20 % влияние термовлагопроводности становится несущественным, что необходимо учитывать при разработке режимов сушки древесины.

4. Термовлагопроводность существенно влияет на величину критерия фазового перехода. Это связано с тем, что изменение направления градиента температуры приводит к существенному изменению плотности потока влаги.

5. Вся свободная влага при положительном направлении градиента температуры удаляется в виде пара, т. е. тормозящее влияние положительного градиента температуры оказывается настолько значительным, что перекрывает поток влаги, вызываемый расклинивающим давлением.

6. При решении задач теплообмена в процессе сушки древесины необходимо учитывать некоторую асимметричность потоков влаги при изменении направления вектора градиента температуры.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Веретельник Т.И.* Математическая модель неизоэтермического массопереноса в пористых средах // Вісник Сумського державного університету. Сер. «Технічні науки». 2003. № 12(58). С. 153–158.
2. *Гороховский А.Г.* Технология сушки пиломатериалов на основе моделирования и оптимизации процессов тепломассопереноса в древесине: дис. ... д-ра техн. наук. Екатеринбург, 2008. 263 с.
3. *Гороховский А.Г., Шишкина Е.Е.* Модели влагопереноса в коллоидной капиллярно-пористой структуре древесины // Тр. III междунар. евразийского симп. «Деревообработка: технологии, оборудование, менеджмент XXI века». Екатеринбург: УГЛТУ, Уралтехнопарк, 2008. С. 41–46.
4. *Гринчик Н.Н., Акулич П.В., Куц П.С., Павлюкевич Н.В., Терехов В.И.* К проблеме неизоэтермического массопереноса в пористых средах // Инж.-физ. журн. 2003. Т. 76, № 6. С. 129–141.
5. *Гринчик Н.Н., Гишкелюк И.А., Кундас С.П.* Моделирование тепло-массопереноса и поверхностных явлений в капиллярно-пористых средах на основе уравнений двухфазной фильтрации и изотерм сорбции // Современная наука: сб. ст. 2011. № 2(7). С. 146–150.
6. *Лыков А.В.* К теории миграции влаги в капиллярно-пористых телах // Коллоид. журн. 1947. Т. IX, № 2. С. 117–124.
7. *Нертин С.В., Дерягин Б.В.* Кинетика течения и устойчивость тонких слоев жидкости на твердой подкладке с учетом сольватной оболочки как особой фазы // Докл. АН СССР. 1955. Т. 100, № 1. С. 17–20.
8. *Чураев Н.В.* Механизм переноса влаги в капиллярно-пористых телах // Докл. АН СССР. 1963. Т. 148, № 6. С. 1361–1364.
9. *Шишкина Е.Е.* Энергосберегающая технология конвективной сушки пиломатериалов на основе управляемого влагопереноса в древесине: дис. ... д-ра техн. наук. Екатеринбург, 2016. 336 с.
10. *Шишкина Е.Е., Гороховский А.Г.* О влиянии эффекта Жамена на термовлагопроводность древесины // Вестн. технол. ун-та. 2015. Т.18, № 12. С. 92–94.
11. *Шишкина Е.Е., Гороховский А.Г.* Определение параметров неизоэтермического влагообмена при сушке древесины с учетом ее капиллярной проводимости // Вестн. технол. ун-та. 2015. Т.18, № 19. С. 104–106.
12. *Goodman J.* Ambient Temperature Stratification Effects in Laminar Free Convection // International Journal of Heat and Mass Transfer. 1973. Vol. 16, iss. 10. Pp. 1949–1950.
13. *Jaluria Y.* Natural Convection Heat and Mass Transfer. Oxford: Pergamon Press, 1980. 326 p.
14. *Wilde K.* Wärme- und Stoffübergang in Strömungen. Band 1. Erzwungene und Freie Strömung. Darmstadt: Steinkopff-Verlag Heidelberg, 1978. 300 p.

Поступила 23.09.17

УДК 674.047

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2018.2.88

Wood Drying Processes under Essentially Nonisothermal Conditions*A.G. Gorokhovskiy, Doctor of Engineering Sciences, Professor**E.E. Shishkina, Doctor of Engineering Sciences, Associate Professor**E.V. Starova, Postgraduate Student**A.A. Mikov, Postgraduate Student*

For citation: Gorokhovskiy A.G., Shishkina E.E., Starova E.V., Mikov A.A. Wood Drying Processes under Essentially Nonisothermal Conditions. *Lesnoy zhurnal* [Forestry journal], 2018, no. 2, pp. 88–96. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2018.2.88

Ural State Forest Engineering University, Sibirskiy trakt, 37, Yekaterinburg, 620100, Russian Federation; e-mail: elenashishkina@yandex.ru

The wood drying technology is being developed mainly by improving the wood drying schedule based on modern methods of computer simulation and process optimization. A promising direction is the improvement of drying schedules in terms of their energy efficiency and ensuring the required quality of products. The scope of research is a theoretical analysis of heat and mass transfer when wood drying by schedules on the basis of the phenomenon of thermal moisture conductivity. Such regimes are characterized by the presence of a temperature gradient along the section of the drying assortment, which classifies them as essentially nonisothermal. A model based on the two-phase filtration equations, sorption isotherms, the Kelvin–Cliperon–Clausius thermodynamic equations could be used to analyze nonisothermal transfer processes, but it is associated with significant mathematical difficulties. The goal of research is to adjust solve simultaneous equations of heat and mass transfer under the essentially nonisothermal conditions. The methodological basis of the study is the physical model of the capillary-porous wood structure, taking into account the colloidal nature of the cell wall and moisture transfer model in wood capillaries. In capillary-porous bodies, to which wood can be referred, moisture exchange with the medium occurs due to the removal of liquid from the capillaries on the surface. When the liquid in the capillary is in the equilibrium over its meniscus, a polymolecular film is formed on the wall. Its thickness decreases upwards according to a definite law, which can be found if the disjoining pressure or saturation of the film vapor is known in the function of its thickness. To evaluate the contribution of the film transfer mechanism to the total moisture flow the Deryagin–Nerpin system of equations can be applied. On this basis we carried out computer simulation of the processes of capillary moisture transfer in order to clarify the influence of thermal moisture conductivity on the overall process of heat and mass transfer in the colloidal capillary-porous body, which is wood. In the analysis of heat and mass transfer processes, the authors have obtained the formulas for determining the phase transformation number and the thermal-gradient coefficient for essentially nonisothermal wood drying schedules. The results of the work can be used in studying the wood capillary – porous structure and determining the parameters of wood drying schedules. The fundamentally new conclusions of the study include the fact that the direction of the temperature gradient in the section of drying assortment inhibits (or increases) the flow of liquid moisture in the capillaries occurring on the basis of a film transfer mechanism, caused by the disjoining pressure. This phenomenon significantly affects the value of the phase transition number and causes some asymmetry of moisture flows when the direction of the temperature gradient vector changes.

Keywords: thermal moisture conductivity, heat-and-mass transfer, phase transformation number, wood drying schedule, thermal-gradient coefficient.

REFERENCES

1. Veretel'nik T.I. Matematicheskaya model' neizotermicheskogo massoperenosa v poristyx sredakh [Mathematical Model of Non-Isothermal Mass Transfer in Porous Media]. *Visnik Sums'kogo derzhavnogo universitetu. Seriya: Tekhnichni nauki*, 2003, no. 12(58), pp. 153–158.
2. Gorokhovskiy A.G. *Tekhnologiya sushki pilomaterialov na osnove modelirovaniya i optimizatsii protsessov teplomassoperenosa v drevesine*: dis. ... d-ra tekhn. nauk [Technology of Lumber Drying Based on Modeling and Optimization of Heat and Mass Transfer in Wood: Dr. Eng. Sci. Diss.]. Yekaterinburg, 2008. 263 p.
3. Gorokhovskiy A.G., Shishkina E.E. Modeli vlagoperenosa v kolloidnoy kapillyarno-poristoy strukture drevesiny [Models of Moisture Transfer in a Colloidal Capillary-Porous Structure of Wood]. *Tr. III mezhdunar. evraziyskogo simp. «Derevoobrabotka: tekhnologii, oborudovanie, menedzhment XXI veka»* [Proc. 3d Intern.

Eurasian Acad. Conf. “Woodworking: Technologies, Equipment, Management of the 21st Century”). Yekaterinburg, 2008, pp. 41–46. (In Russ.)

4. Grinchik N.N., Akulich P.V., Kuts P.S., Pavlyukevich N.V., Terekhov V.I. K probleme neizotermicheskogo massoperenosa v poristyykh sredakh [On the Problem of Nonisothermal Mass Transfer in Porous Media]. *Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal* [Journal of Engineering Physics and Thermophysics], 2003, vol. 76, no. 6, pp. 129–141.

5. Grinchik N.N., Gishkelyuk I.A., Kundas S.P. Modelirovanie teplomassoperenosa i poverkhnostnykh yavleniy v kapillyarno-poristyykh sredakh na osnove uravneniy dvukhfaznoy fil'tratsii i izoterm sorbsii [Modelling of Heat and Mass Transfer and Surface Phenomena in Capillaryporous Media Based on Equations of Two-Phase Filtration and Sorption Isotherms]. *Sovremennaya nauka: issledovaniya, idei, rezul'taty, tekhnologii* [Modern Science: Researches, Ideas, Results, Technologies], 2011, no. 2(7), pp. 146–150.

6. Lykov A.V. K teorii migratsii vlagi v kapillyarno-poristyykh telakh [To the Theory of Moisture Migration in Capillary-Porous Bodies]. *Kolloidnyy zhurnal* [Colloid journal], 1947, vol. IX, no. 2, pp. 117–124.

7. Nerpin S.V., Deryagin B.V. Kinetika techeniya i ustoychivost' tonkikh sloev zhidkosti na tverдой podkladke s uchedom sol'vatnoy obolochki kak osoboy fazy [Kinetics of Flow and Stability of Thin Liquid Layers on a Solid Bearing, Taking into Account the Solvate Shell as a Special Phase]. *Doklady Akademii nauk SSSR* [Proceedings of the USSR Academy of Sciences], 1955, vol. 100, no. 1, pp. 17–20.

8. Churaev N.V. Mekhanizm perenosa vlagi v kapillyarno-poristyykh telakh [The Mechanism of Moisture Transfer in Capillary-Porous Bodies]. *Doklady Akademii nauk SSSR* [Proceedings of the USSR Academy of Sciences], 1963, vol. 148, no. 6, pp. 1361–1364.

9. Shishkina E.E. *Energoberegayushchaya tekhnologiya konvektivnoy sushki pilomaterialov na osnove upravlyaemogo vlagoperenosa v drevesine: dis. ... d-ra tekhn. nauk* [Energy-Saving Technology of Convective Lumber Drying Based on Controlled Moisture Transfer in Wood: Dr. Eng. Sci. Diss.]. Yekaterinburg, 2016. 336 p.

10. Shishkina E.E., Gorokhovskiy A.G. O vliyaniy efekta Zhamena na termovlagoprovodnost' drevesiny [On the Jamin Effect on the Thermal Moisture Conductivity of Wood]. *Vestnik Kazanskogo Tekhnologicheskogo Universiteta* [Herald of Kazan Technological University], 2015, vol. 18, no. 12, pp. 92–94.

11. Shishkina E.E., Gorokhovskiy A.G. Opredelenie parametrov neizotermicheskogo vlagooobmena pri sushke drevesiny s uchedom ee kapillyarnoy provodimosti [Determination of the Parameters of Nonisothermal Moisture Exchange when Lumber Drying Taking into Account Its Capillary Conductivity]. *Vestnik Kazanskogo Tekhnologicheskogo Universiteta* [Herald of Kazan Technological University], 2015, vol. 18, no. 19, pp. 104–106.

12. Goodman J. Ambient Temperature Stratification Effects in Laminar Free Convection. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1973, vol. 16, iss. 10, pp. 1949–1950.

13. Jaluria Y. *Natural Convection Heat and Mass Transfer*. Oxford, Pergamon Press, 1980. 326 p.

14. Wilde K. *Wärme- und Stoffübergang in Strömungen. Band 1. Erzwungene und Freie Strömung*. Darmstadt, Steinkopff-Verlag Heidelberg, 1978. 300 p.

Received on September 23, 2017