

УДК 532.72; 669.015.23

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЛАГОПРОВОДНОСТИ ОБРАЗЦОВ ИЗ СОСНЫ В ПРОДОЛЬНОМ НАПРАВЛЕНИИ ПРИ КОНВЕКТИВНОЙ СУШКЕ

Ю. А. Гостеев, Ю. Г. Коробейников, А. В. Федоров\*, В. М. Фомин

Институт теоретической и прикладной механики СО РАН, 630090 Новосибирск

\* Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет,  
630008 Новосибирск

Для исследования процесса сушки образцов из древесины измерено значение коэффициента влагопроводности образцов из сосны, обдуваемых конвективным потоком воздуха, в направлении, перпендикулярном плоскости поперечного среза дерева (вдоль волокон). Кинетические кривые процесса сушки обрабатывались по методике, основанной на приближенном решении одномерного уравнения диффузии для влагосодержания древесины с граничным условием третьего рода. Проведено тестирование методики по известному значению коэффициента влагопроводности в тангенциальном к годичным кольцам направлении. Показано, что влагопроводность сосны в продольном направлении в 17 раз больше влагопроводности в направлении, тангенциальном к годичным кольцам в поперечном срезе дерева. Путем численного моделирования процесса, основанного на решении начально-краевой задачи для двумерного линейного уравнения влагопроводности, исследовано влияние анизотропии коэффициентов влагопроводности на зависимость среднего влагосодержания от времени и на распределение локального влагосодержания.

Ключевые слова: конвективная сушка, влагопроводность древесины, анизотропия, физическое и математическое моделирование.

**Экспериментальное исследование сушки анизотропного тела.** Известно, что древесина имеет достаточно сложную капиллярно-пористую структуру, являющуюся анизотропной, т. е. различную в трех ортогональных направлениях: по нормали к годичным кольцам в плоскости поперечного среза дерева, по касательной к годичным кольцам и по направлению перпендикуляра к плоскости поперечного среза [1]. Соответственно влагопроводность древесины, от которой зависит скорость сушки, также анизотропна, т. е. зависит от выбранного направления.

В настоящее время в литературе имеются данные о коэффициентах влагопроводности древесины в двух направлениях: радиальном (перпендикулярно годичным кольцам) и тангенциальном (по касательной к годичным кольцам). Что касается третьего направления (вдоль волокон), то известно, что влагопроводность в этом направлении в 15 ÷ 20 раз больше, чем в тангенциальном [1]. Представляет интерес измерение влагопроводности древесины в продольном направлении и сравнение ее с имеющимися данными о влагопроводности в других направлениях.

Образцы из сосны вырезались таким образом, чтобы влагоперенос к их боковым поверхностям определялся продольной влагопроводностью. Характерные размеры боковых поверхностей дощечек 40 × 40 мм, толщина образцов 3,05, 3,5 и 6,3 мм. Боковые поверхности образцов совпадали с плоскостями поперечных срезов дерева.

Образцы замачивались в течение 30 ÷ 40 мин и выдерживались в закрытом термостате в течение суток для выравнивания начального профиля влажности. Затем образцы из

сосны крепились на державку и обдувались потоком комнатного воздуха от вентилятора. Скорость обдува образцов примерно 15 м/с, температура воздуха 22 °С. Через определенные промежутки времени (15 мин) образцы взвешивались на аналитических весах марки ВЛА-200-М.

Экспериментальные кривые обрабатывались по методике, изложенной в работах [2, 3]. При этом на первом этапе исследования предполагалось, что взаимовлияние перетоков вдоль различных направлений слабое.

Методика основана на приближенном решении одномерного уравнения влагопроводности для влагосодержания древесины [3]

$$\frac{\partial W}{\partial t} = a \frac{\partial^2 W}{\partial x^2}$$

с граничным условием третьего рода на боковой поверхности образца

$$q = -a\rho_0 \left( \frac{\partial W}{\partial x} \right)_n = \alpha\rho_0(W_n - W_p).$$

Здесь  $W(x, t)$  — локальное влагосодержание, равное отношению локальной массы влаги к локальной массе абсолютно сухого материала;  $a$  — коэффициент влагопроводности;  $q$  — плотность потока влаги на поверхности одномерного образца;  $\rho_0$  — плотность сухого материала; индексом  $n$  отмечены величины, вычисленные в точках боковой поверхности образца;  $\alpha$  — коэффициент влагоотдачи;  $W_p$  — равновесное (со средой) влагосодержание.

Для значений  $t > 0,54R^2/a$  приближенное решение задачи сушки образца, описываемое третьей краевой задачей для уравнения влагопроводности, имеет вид

$$\frac{W(x, t)}{\langle W_0 \rangle} = 1 - \int_0^t \frac{a \text{Ki}(\tau)}{R^2} d\tau + \text{Ki}(t) \frac{R^2 - 3x^2}{6R^2}.$$

Здесь  $R$  — полутолщина пластины;  $\text{Ki} = qR/(a\rho_0\langle W_0 \rangle)$  — критерий Кирпичева;  $\langle W_0 \rangle$  — среднее начальное влагосодержание. Среднее по сечению влагосодержание определяется выражением

$$\langle W \rangle = \frac{1}{R} \int_0^R W(x, t) dx.$$

После ряда несложных преобразований уравнение для  $\langle W \rangle$  принимает вид

$$-\frac{\langle W \rangle - W_p}{R d\langle W \rangle/dt} = \frac{R}{3a} + \frac{1}{\alpha}. \quad (1)$$

В случае двумерной влагопроводности в бруске задача описывается уравнением диффузии с анизотропной влагопроводностью. Решение соответствующей краевой задачи было выписано в рядах [4]. После ряда несложных преобразований данного решения и его анализа можно получить уравнение для среднего влагосодержания

$$\frac{\langle W \rangle - W_p}{d\langle W \rangle/dt} = -\frac{R_1 R_2 (3a_1 + \alpha R_1)(3a_2 + \alpha R_2)}{3\alpha [3a_1 a_2 (R_1 + R_2) + \alpha (a_1 R_1^2 + a_2 R_2^2)]}.$$

Здесь  $R_1, R_2$  — полутолщины бруска в направлениях  $x$  и  $y$  соответственно. Отметим, что при  $R_2 \rightarrow \infty$  данное уравнение сводится к одномерному уравнению (1), что позволяет использовать (1) для описания результатов опытов по определению анизотропного коэффициента влагопроводности.

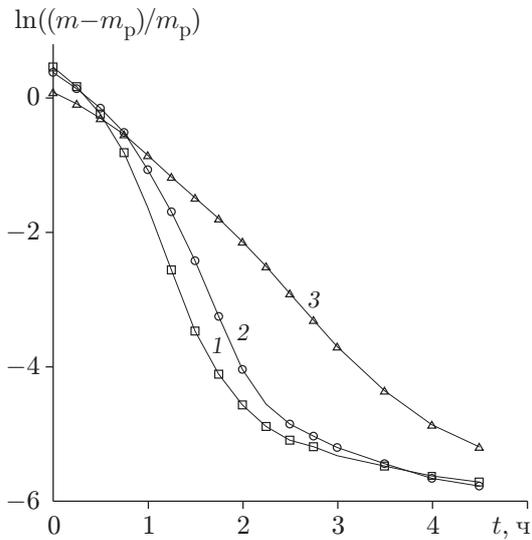


Рис. 1

Рис. 1. Скорость сушки образцов различной толщины:  
 1 —  $2R = 3,0$  мм; 2 —  $2R = 3,5$  мм; 3 —  $2R = 6,3$  мм

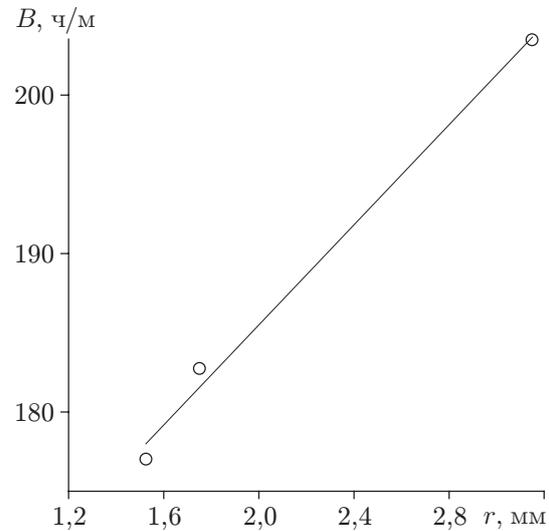


Рис. 2

Рис. 2. Зависимость левой части уравнения (1) от полутолщины образца:  
 точки — экспериментальные данные; линия — аппроксимирующая функция

Из уравнения (1) следует, что если по оси ординат отложить величину, стоящую в левой части уравнения, для одних и тех же значений влагосодержания, но для образцов разной толщины, то получим прямую, которая отсечет на этой оси отрезок  $1/\alpha$  под углом  $1/(3a)$ . Таким образом, можно получить коэффициенты влагоотдачи и влагопроводности. Строго говоря, эта методика применима при влагосодержаниях, меньших предела гигроскопичности (менее 30 %), когда справедливо уравнение влагопроводности.

Тестирование методики проводилось по известному значению коэффициента влагопроводности в тангенциальном к годичным кольцам направлении. Отличие полученных результатов ( $3,3 \cdot 10^{-6}$  см<sup>2</sup>/с) от известных в литературе для заболони сосны [3] не превышает 12 %.

Описанные выше опыты повторялись четыре раза. На рис. 1 приведены результаты одного из опытов для образцов различной толщины ( $m_p$  и  $m - m_p$  — текущая и равновесная со средней масса образцов соответственно). На рис. 2 приведена зависимость левой части уравнения (1), обозначенной через  $B$ , от полутолщины пластины  $R$  ( $B(R) = 15,79R + 153,91$ ). В экспериментах получено среднее значение коэффициента влагопроводности в продольном направлении  $6,2 \cdot 10^{-5}$  см<sup>2</sup>/с ( $\langle W \rangle \simeq 20$  %), в то время как влагопроводность заболони сосны в тангенциальном направлении равна  $3,7 \cdot 10^{-6}$  см<sup>2</sup>/с при температуре 20 °С [3]. Тем самым показано, что влагопроводность сосны в продольном направлении почти в 17 раз превышает влагопроводность в тангенциальном направлении.

**Математическое моделирование экстракции влаги из анизотропного образца.** После проведения экспериментальных исследований коэффициента влагопроводности представляет интерес оценка погрешности определения полей влагосодержаний по математическим моделям, не учитывающим анизотропию физических свойств образца. Проведено исследование влияния анизотропии коэффициента влагопроводности на кинетические кривые процесса сушки двумерных образцов. Математическая модель, описывающая перенос жидкости в образце при конвективной сушке, представляет собой двумерное линейное

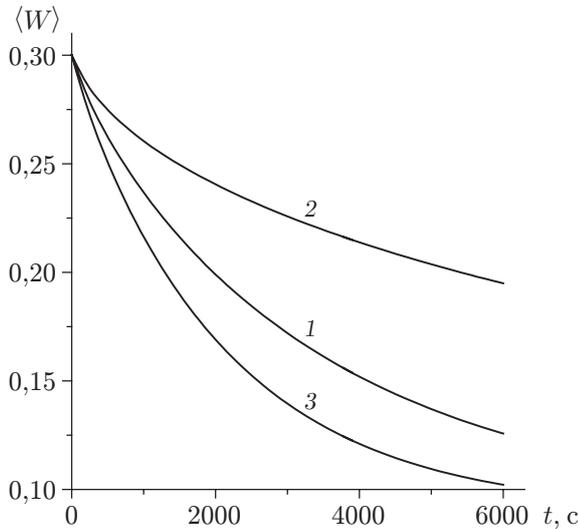


Рис. 3. Влияние анизотропии влагопроводности на изменение во времени среднего влагосодержания в образце:

1 —  $a_1 = 6,2 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2/\text{с}$ ,  $a_2 = 3,7 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2/\text{с}$ ;  
 2 —  $a_1 = a_2 = 3,7 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2/\text{с}$ ; 3 —  $a_1 = a_2 = 6,2 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2/\text{с}$

уравнение влагопроводности для образцов с квадратным сечением ( $1 \times 1 \text{ см}$ ):

$$\frac{\partial W}{\partial t} = a_1 \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} + a_2 \frac{\partial^2 W}{\partial y^2}.$$

Решение данного уравнения  $W(x, y, t)$  должно удовлетворять граничным условиям третьего рода на боковых гранях образца

$$q_x = -a_1 \rho_0 \frac{\partial W}{\partial x}(R, y, t) = \alpha \rho_0 (W(R, y, t) - W_p),$$

$$q_y = -a_2 \rho_0 \frac{\partial W}{\partial y}(x, R, t) = \alpha \rho_0 (W(x, R, t) - W_p),$$

условию однородности начального влагосодержания в образце

$$W(x, y, 0) = W_0$$

и условию симметрии при значениях абсциссы и ординаты, равных нулю. Здесь  $q_x, q_y$  — плотности потоков влаги на поверхностях в направлениях  $x$  и  $y$  соответственно.

Для решения начально-краевой задачи использовался метод прямых. Для его тестирования проведены расчеты на последовательности сгущающихся равномерных по обоим направлениям сеток. Результаты, полученные с шагом по пространству  $h = h_x = h_y$  и шагом  $h/2$ , различаются не более чем на 1 % начиная с  $h \approx 5 \cdot 10^{-5} \text{ м}$ . Поэтому в дальнейших расчетах выбиралось именно это значение  $h$ .

После проведения тестовых расчетов рассматривалось три варианта исходных данных. В первом варианте начальных данных в двух направлениях коэффициенты влагопроводности различны (брались приведенные выше экспериментальные значения коэффициентов влагопроводности в продольном и тангенциальном направлениях). Во втором варианте коэффициенты были одинаковы и равны меньшему из них. В третьем оба коэффициента равны большему значению коэффициента влагопроводности. Результаты расчетов приведены на рис. 3, где представлены зависимости среднего влагосодержания, определенного по формуле

$$\langle W \rangle = \frac{1}{R^2} \int_0^R \int_0^R W(x, y, t) dx dy,$$

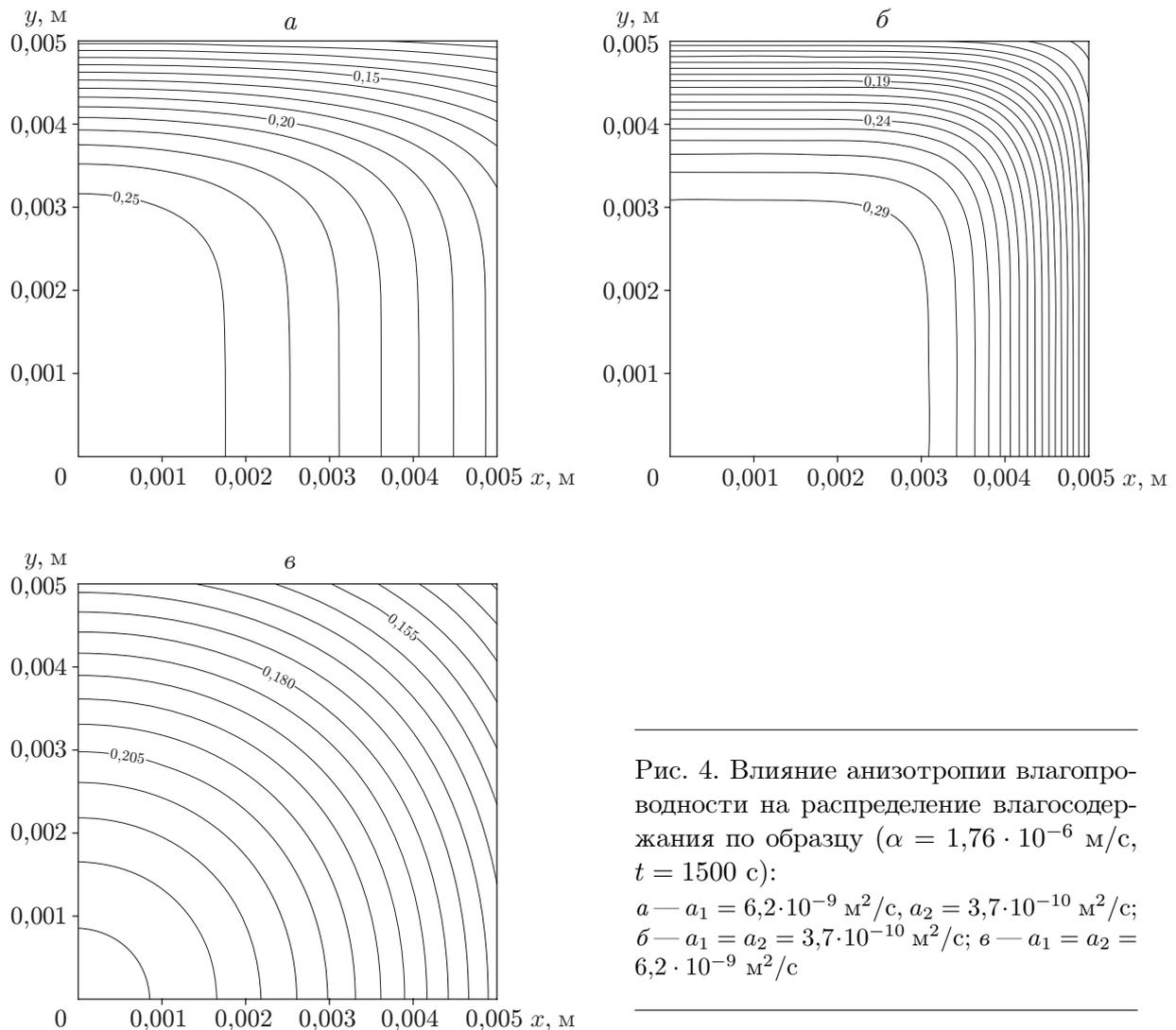


Рис. 4. Влияние анизотропии влагопроводности на распределение влагосодержания по образцу ( $\alpha = 1,76 \cdot 10^{-6}$  м/с,  $t = 1500$  с):

$a - a_1 = 6,2 \cdot 10^{-9}$  м<sup>2</sup>/с,  $a_2 = 3,7 \cdot 10^{-10}$  м<sup>2</sup>/с;  
 $б - a_1 = a_2 = 3,7 \cdot 10^{-10}$  м<sup>2</sup>/с;  $в - a_1 = a_2 = 6,2 \cdot 10^{-9}$  м<sup>2</sup>/с

от времени для трех вариантов начальных данных. Кривая средней влагопроводности, рассчитанная при анизотропии коэффициента влагопроводности, лежит между кривыми, соответствующими максимальному и минимальному значениям коэффициента влагопроводности.

Рассмотрим динамику влаговыделения из образца при конвективной сушке. На рис. 4, 5 приведены распределения влагосодержания по четверти образца (в силу пространственной симметрии) для  $t = 1500, 6000$  с. Из рис. 4, 5 следует, что влияние анизотропии влагопроводности на поля влагосодержания существенно. Действительно, на рис. 4, *а* изолинии влагосодержания ближе расположены друг к другу вдоль оси ординат, чем вдоль оси абсцисс. Это обусловлено влиянием пограничного слоя из-за достаточно малой влагопроводности вдоль оси  $y$ . Для этого варианта процесс сушки в направлении  $x$  происходит более интенсивно, приводя к асимметричному распределению влагосодержания. Для вариантов  $a_1 = a_2$ , представленных на рис. 4, *б, в*, наблюдается симметричная картина расположения изолиний. Из рис. 4, *б* следует, что в этом случае образец осушается медленнее, чем в случае, представленном на рис. 4, *а*. На рис. 4, *а* изолиния  $W = 0,25$  расположена ближе к центру образца, чем на рис. 4, *б*.

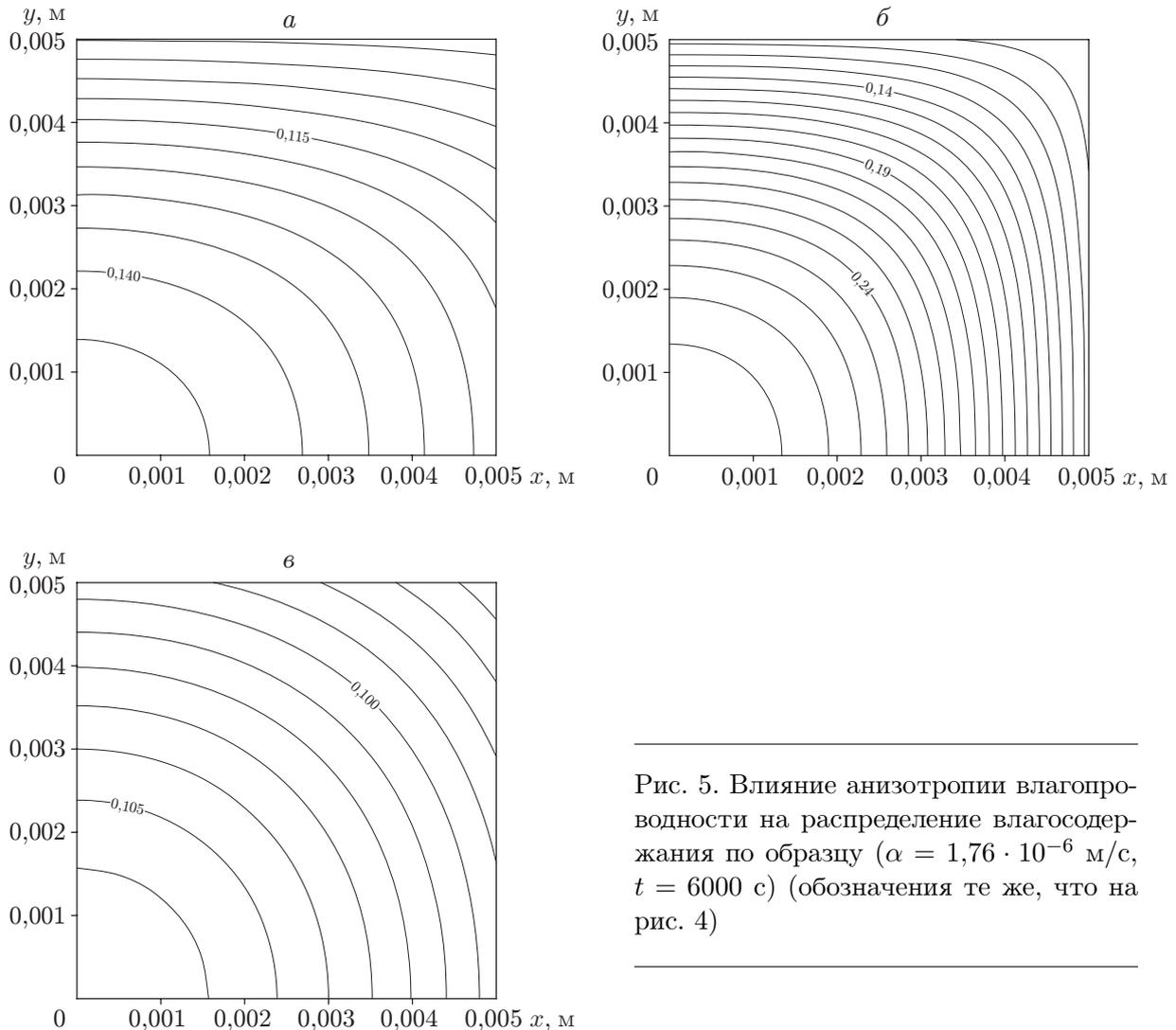


Рис. 5. Влияние анизотропии влагопроводности на распределение влагосодержания по образцу ( $\alpha = 1,76 \cdot 10^{-6}$  м/с,  $t = 6000$  с) (обозначения те же, что на рис. 4)

На рис. 4, *а, б* видно ядро с высоким влагосодержанием в центральной области образца. При увеличении влагопроводности образца до максимальной ядро уменьшается. Это следует из сравнения положения линий постоянной влажности  $W = 0,29$  (рис. 4, *а, б*). На рис. 4, *в* данная изолиния отсутствует. При увеличении времени сушки этот эффект ослабевает из-за уменьшения интегрального влагосодержания в образце (ср. рис. 4 и рис. 5).

Следует отметить, что при сушке досок влияние двумерности процесса проявляется на их концах в области, протяженность которой примерно в  $\sqrt{17}$  раз больше толщины доски. Значительная влагопроводность в продольном направлении может обусловить растрескивание на концах досок.

**Выводы.** Таким образом, экспериментально показано, что коэффициент влагопроводности в образце из древесины является тензором. Определено его значение в направлении, перпендикулярном плоскости поперечного среза дерева (вдоль волокон) в плоском образце.

В рамках линейной математической модели влагопереноса в образце из древесины дано обобщение формулы Лыкова для случая плоских анизотропных образцов и разработана математическая модель, позволившая выявить влияние анизотропии влагопроводности на процесс сушки.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Уголев В. И.** Древесиноведение с основами лесного товароведения. М.: Лесн. пром-сть, 1975. С. 40–106.
2. **Лыков А. В.** Тепло- и массообмен в процессах сушки М.: Госэнергоиздат, 1956. С. 156–172.
3. **Шубин Г. С.** Физические основы и расчет процессов сушки древесины. М.: Лесн. пром-сть, 1973. С. 54–57.
4. **Лыков А. В.** Теория теплопроводности. М.: Высш. шк., 1967. С. 263–265.

*Поступила в редакцию 25/XI 2002 г.*

---