

Определение коэффициента влагопроводности вторичного растительного сырья решением обратной задачи массопроводности

Р. Г. Сафин, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Переработка древесных материалов»

А. С. Родионов✉, аспирант кафедры «Переработка древесных материалов»

Н. Ф. Тимербаев, доктор технических наук, профессор кафедры «Переработка древесных материалов»
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский национальный исследовательский технологический университет» (ФГБОУ ВО «КНИТУ»)

420015, Российская Федерация, Республика Татарстан, Казань, ул. К. Маркса, 68

✉ rodionov2014@bk.ru

Резюме. Представлены результаты аналитических и экспериментальных исследований по определению коэффициента влагопроводности растительного сырья. Исследован вопрос использования нестационарного потока влаги для определения коэффициента влагопроводности костры льна методом решения обратной задачи дифференциального уравнения массопроводности. Исходными данными для этого служат кривые сушки высушиваемого и контрольного образца, полученные на экспериментальной установке при различной температуре сушильного агента: 50, 75, 95 °С. На этих кривых отчетливо можно выделить периоды постоянной и падающей скорости сушки, коэффициент влагопроводности в которых будет отличаться. Путем аналитической обработки кривых сушки в языковой среде программирования Python с поддержкой модуля matplotlib были получены динамические кривые сушки, отражающие локальное влагосодержание по толщине в каждый момент времени. При решении обратной задачи дифференциального уравнения массопроводности по данным динамических кривых рассчитывается коэффициент влагопроводности. Выяснено, что коэффициент влагопроводности экспоненциально зависит от влажности и температуры. Данные, полученные нестационарным дифференциальным методом, были сопоставлены с данными, полученными стационарным методом. Расхождения двух методов не превышает 15%. Для повышения точности была предложена модификация существующей методики стационарного метода определения коэффициента влагопроводности. Существенный недостаток известных методов заключается в необходимости извлечения образца из установки для взвешивания, что вносит значительную погрешность в результаты исследования. Показана возможность определения зависимости коэффициента влагопроводности от влагосодержания путем решения обратной задачи дифференциального уравнения массопроводности. Это позволяет выполнять более точные расчеты конвективных сушилок, тем самым повысить энергоэффективность процесса.

Ключевые слова: коэффициент влагопроводности, сушка, массопроводность, кривые сушки, вторичное растительное сырье, закон Фика.

Для цитирования: Сафин Р. Г., Родионов А. С., Тимербаев Н. Ф. Определение коэффициента влагопроводности вторичного растительного сырья решением обратной задачи массопроводности // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2025. № 4 (72). С. 221-228. doi:10.18286/1816-4501-2025-4-221-228

Determining the moisture conductivity coefficient of secondary plant materials by solving the inverse problem of mass conductivity

R. G. Safin, A. S. Rodionov, N. F. Timerbaev

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Kazan National Research Technological University" (KNRTU)

420015, Russian Federation, Republic of Tatarstan, Kazan, K. Marksa St., 68

rodionov2014@bk.ru

Abstract. This paper presents the results of analytical and experimental studies to determine the moisture conductivity coefficient of plant materials. The use of a transient moisture flow to determine the moisture conductivity coefficient of flax shives by solving the inverse problem of the differential equation of mass conductivity is explored. The initial data for this study are the drying curves of the dried and control samples, obtained on an experimental setup at various drying agent temperatures: 50, 75, and 95°C. These curves clearly show periods of constant and decreasing drying rates, during which the moisture conductivity coefficient differs. By analytically processing the drying curves in the Python programming language environment with the matplotlib module, dynamic drying curves were obtained, reflecting local moisture content across the thickness at each moment in time. By solving the inverse problem of the differential equation of mass conductivity, the moisture conductivity coefficient is calculated from the dynamic curves. It was found that the moisture conductivity coefficient depends exponentially on humidity and temperature. Data obtained by the non-stationary differential method were compared with data obtained by the stationary method. The discrepancy between the two methods does not exceed 15%. To improve accuracy, a modification of the existing stationary method for determining the moisture

conductivity coefficient was proposed. A significant drawback of known methods is the need to remove the sample from the weighing system, which introduces significant error into the study results. The possibility of determining the dependence of the moisture conductivity coefficient on moisture content by solving the inverse problem of the differential equation of mass conductivity is demonstrated. This allows for more accurate calculations of convective dryers, thereby increasing the energy efficiency of the process.

Keywords: moisture conductivity coefficient, drying, mass conductivity, drying curves, secondary plant materials, Fick's law.

For citation: Safin R. G., Rodionov A. S., Timerbaev N. F. Determining the moisture conductivity coefficient of secondary plant materials by solving the inverse problem of mass conductivity // Vestnik of Ulyanovsk state agricultural academy. 2025;4(72): 221-228 doi:10.18286/1816-4501-2025-4-221-228

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-26-00036,
https://rscf.ru/project/23-26-00036/

Введение

Процесс переработки вторичного растительного сырья сопровождается массообменными процессами сушки, пропитки и промывки. Повышение энергоэффективности этих процессов путем улучшения технических показателей возможно при использовании математического моделирования. Центральное значение при математическом моделировании занимает коэффициент влагопроводности, характеризующий скорость движения влаги в материале и интенсивность процесса [1]. Изучением этого вопроса занимались многие исследователи Рудобашта С.П. [2], Stamm A. J. [3], Martley I. E. [4], Stilwell S.T. [5], Ludwig K. [6], Egner K. [7], Лыков А.В. [8] и др. В их научных работах были определены коэффициенты влагопроводности для различных видов растительного сырья при различных режимах. На данном этапе развития научных исследований не проработан вопрос расчета коэффициента влагопроводности применительно ко вторичному растительному сельскохозяйственному сырью, образующемуся на предприятиях агропромышленного комплекса.

Коэффициент влагопроводности можно определить методами стационарного и нестационарного потока влаги.

Нестационарный режим характеризуется неравномерным удельным потоком влаги по сечению материала, а стационарный - равномерным и постоянным потоком влаги по сечению материала.

Метод стационарного потока основан на установлении в материале постоянного переноса влаги за счет создания постоянной разности влажностей ($\phi_0 - \phi_n$) среды на противоположных торцах испытуемого материала, где ϕ_0 — относительная влажность воздуха на одной стороне образца (обычно более влажной), а ϕ_n — относительная влажность воздуха на противоположной стороне (обычно менее влажной) (Шубин Г.С. *Физические основы и расчет процессов сушки древесины. М.: Лесная промышленность, 1973. 248 с.*)

В литературе [9, 10] приведены описания установок для определения коэффициента влагопроводности стационарным методом. Существенный недостаток известных методов заключается в необходимости извлечения образца из установки для

взвешивания, что вносит значительную погрешность в результаты исследований.

К нестационарным методам относятся методы определения темпа регулярного режима влагопереноса и исследуемый метод решения обратной задачи дифференциального уравнения массопроводности, который базируется на обработке кривых сушки.

Метод регулярного режима влагопереноса считается аналогом метода определения коэффициента температуропроводности [11]. В этом методе на основании кинетических кривых сушки строится кривая натурального логарифма влагосодержания по времени, которая носит линейный характер. Угол наклона логарифмической кривой является темпом регулярного режима влагопереноса "m", на основании которого определяется коэффициент влагопроводности a_m , по соотношению:

$$a_m = Km, \quad (1)$$

где m — темп регулярного режима влагопереноса, $1/с$; K — коэффициент формы для одномерной частицы, $м^2$,

$$K = \frac{a^2}{\pi^2}, \quad (2)$$

где a — размер частицы, $м$.

Недостатком этого метода является то, что им возможно определить только среднее значение коэффициента влагопроводности.

В исследуемом методе решения обратной задачи дифференциального уравнения массопроводности процесс влагопереноса при нестационарном режиме описывается дифференциальными уравнениями Лыкова, которые для бесконечной пластины имеют вид:

$$\frac{\partial U}{\partial \tau} = a_m \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + a_m \beta \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}; \quad (3)$$

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a_\tau \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}. \quad (4)$$

При создании краевых условий первого рода начальные и граничные условия записывают соотношениями:

$$U(x, 0) = U_n; \quad (5)$$

$$U(0, \tau) = U_p; \quad (6)$$

$$T(x, 0) = T_n; \quad (7)$$

$$T(0, \tau) = T_c. \quad (8)$$

где T , T_n , T_c – соответственно, локальная, начальная температура высушиваемого материала и температура сушильного агента, °C; U , U_n , U_p – соответственно локальное, начальное влагосодержание высушиваемого материала и равновесное влагосодержание поверхности, кг/кг; a_T – коэффициент температуропроводности, м²/с; β – термоградиентный коэффициент, кг/(кг · K) [12].

Если создать условия минимального $\text{grad}(T)$, то уравнения 3, 4 можно свести ко второму закону Фика:

$$\frac{\partial U}{\partial \tau} = a_m \frac{\partial^2 U}{\partial x^2}. \quad (9)$$

Построив на основе кинетических кривых сушки динамические кривые и решив обратную задачу при определенных условиях, можно рассчитать коэффициент влагопроводности при нестационарном потоке влаги [13].

Цель исследований – разработка метода определения коэффициента влагопроводности с учетом градиента влагосодержания по сечению высушиваемого материала. Это позволяет адекватно моделировать процессы сушки и учитывать нелинейную зависимость коэффициента влагопроводности от влажности сырья.

Материалы и методы

На рис. 1 показана экспериментальная установка для определения коэффициента влагопроводности при стационарном режиме.

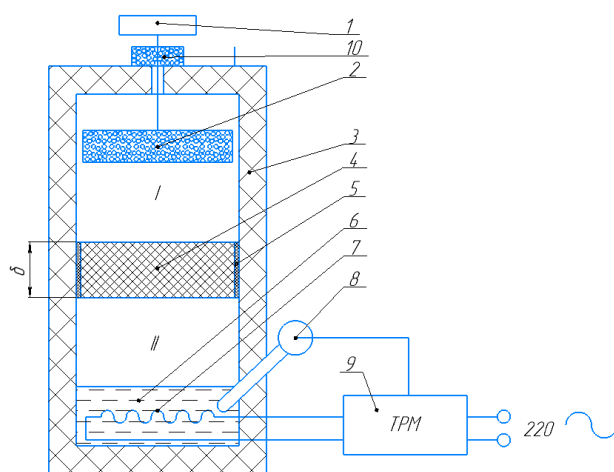


Рис. 1. Экспериментальная установка для определения коэффициента влагопроводности: 1 – весы; 2 – силикагель; 3 – теплоизолированный корпус; 4 – испытуемый образец; 5 – уплотнитель; 6 – дистиллированная вода; 7 – нагреватель; 8 – термопара; 9 – терморегулятор; 10 – влагоизолятор; I – зона нулевой влажности; II – зона с максимальной влажностью

Экспериментальная установка работает следующим образом: испытуемый образец 4 с уплотнителем 5 помещают в теплоизолированный корпус 3, создавая две зоны. В нижней зоне II находится дистиллированная вода 6, подогреваемая нагревателем 7. Температура дистиллированной воды поддерживается на заданном уровне терморегулятором 9

и термопарой 8. В верхней зоне I находится емкость с силикагелем 2, масса которой измеряется весами 1. Влагоизолятор 10, состоящий из силикагеля, препятствует проникновению окружающей влаги в изолированную зону I.

Физическая картина эксперимента: нагретая дистиллированная вода 6, испаряясь в зоне II, создает 100%-ную влажность воздушной среды. Влага, проходя через испытуемый материал 4, в зоне I поглощается силикагелем 2. Масса поглощенной влаги фиксируется весами 1 [14].

Измерения фиксируют с наступлением стационарного потока влаги через материал, характеризующимся равномерным увеличением массы силикагеля. В зависимости от температуры продолжительность установления стационарного потока менялась от 32 до 90,5 ч [9].

Коэффициент влагопроводности для стационарного режима рассчитывают, исходя из первого закона Фика:

$$J = -a_m \text{grad}(U) \approx -a_m \frac{\Delta U}{\delta}, \quad (10)$$

где J – удельный поток влаги, кг/(м²·с); δ – толщина образца, м; ΔU – разность влагосодержаний на гранях образца, расположенных во влажной нижней зоне II и в сухой верхней зоне I, % [15].

$$\Delta U = U_{II} - U_I. \quad (11)$$

С другой стороны, удельный поток J определяют как количество вещества Δm , пройденного через единицу площади S в единицу времени $\Delta \tau$.

$$J = \frac{\Delta m}{S \Delta \tau}. \quad (12)$$

Из совместного решения (10) и (12) получаем соотношение для расчета коэффициента влагопроводности:

$$a_m = \frac{\Delta m \delta}{S \Delta \tau (U_{II} - U_I)} \quad (13)$$

Влагосодержание поверхности образца в нижней зоне U_{II} определяется максимальным гигроскопическим влагосодержанием U_r .

Влагосодержание поверхности образца в верхней зоне U_I рассчитывают по уравнению Фрейндлиха [16]:

$$U_I = a \varphi_I^n, \quad (14)$$

где a , n – экспериментальные коэффициенты; φ_I – относительная влажность воздуха в сухой зоне I, %.

Среднее влагосодержание образца определяли соотношением:

$$\bar{U} = \frac{U_{II} + U_I}{2} \quad (15)$$

Если влажность воздуха в первой зоне равна нулю, что достигается установкой в зону I силикагеля, то U_I будет равно нулю, и среднее влагосодержание образца будет равно:

$$\bar{U} = \frac{U_{II}}{2}. \quad (16)$$

Образцы для исследования получены прессованием отходов костры льна при давлении 52,5 МПа. В результате прессования получены образцы диаметром 60 мм и толщиной 2 мм и 0,5 мм. После

размещения образцов на длительное время в 100%-ной влажной среде определяли их максимальное гигроскопичное влагосодержание, которое составило $\approx 60\%$. Определение коэффициента влагопроводности происходило при температурах 50, 75, 95 °C [17].

Для определения коэффициента влагопроводности при нестационарном режиме была создана опытная установка. На рис. 2 изображены принципиальная схема установки (а) и опытный образец толщиной 0,0045 м (б).

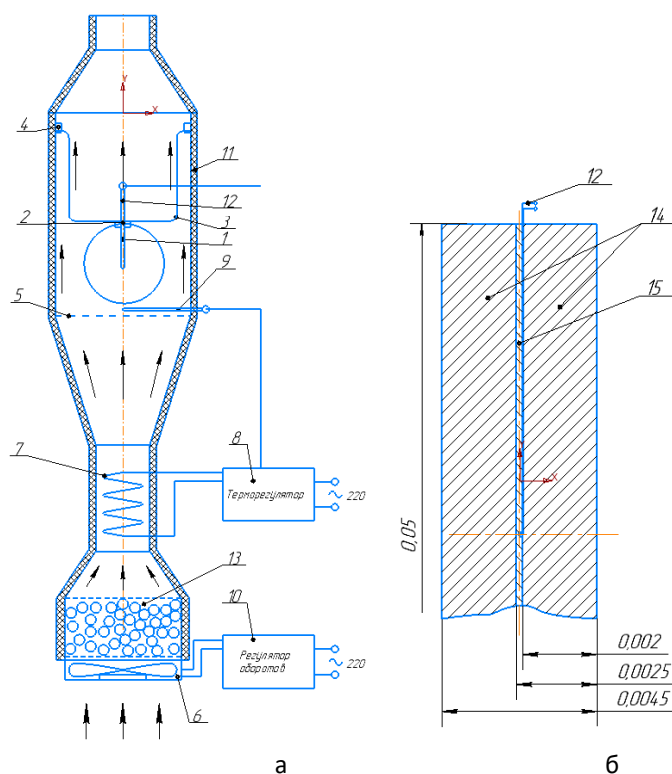


Рис. 2. Опытная установка: 1 – исследуемый материал; 2 – держатель; 3 – пруток; 4 – захваты; 5 – перфорированное дно; 6 – вентилятор; 7 – электронагреватель; 8 – терморегулятор; 9, 12 – термопары; 10 – регулятор частоты вращения лопастей вентилятора; 11 – теплоизоляция; 13 – зона осушения; 14 – высушиваемые слои; 15 – контрольный слой

Для создания низкой влажности сушильного агента в экспериментальную установку внедрена зона осушения воздуха 13, состоящая из насыпного слоя силикагеля. Для исключения влияния градиента температуры испытываемые образцы перед сушкой оборачивали фольгой и нагревали до температуры сушильного агента [12].

Исходные данные эксперимента: температура сушильного агента T_c – 50, 75 и 90 °C; относительную влажность сушильного агента φ_c принимали равной нулю; скорость потока сушильного агента – 2 м/с. Испытуемый образец прессованной костры льна состоит из двух пластин толщиной $b = 2$ мм и контрольного слоя из прессованной костры льна толщиной 0,5 мм между ними.

Используя теорию подобия, дифференциальное уравнение (9) можно заменить соотношением [18]:

$$\frac{\Delta U_x}{\Delta \tau} = a_m \frac{\Delta U_x}{\Delta x^2} \quad (17)$$

Используя метод конечных разностей, можно получить соотношение для расчета локального значения влагосодержания U_x^t :

$$U_x^t = U_x^{t-1} + a_m \frac{U_{x=0}^{t-1} - 2U_x^{t-1} + U_{x=b}^{t-1}}{\Delta x^2} \Delta \tau, \quad (18)$$

из которого можно выразить коэффициент влагопроводности a_m :

$$a_m = \frac{(U_x^t - U_x^{t-1}) \Delta x^2}{(U_{x=0}^{t-1} - 2U_x^{t-1} + U_{x=b}^{t-1}) \Delta \tau} \quad (19)$$

Для вычисления коэффициента влагопроводности a_m предлагаемым методом необходимо знать влагосодержание материала в трёх точках на поверхности материала $U_{x=0}^{t-1}$, в глубине U_x^{t-1} , и в центре материала $U_{x=b}^{t-1}$, где x – текущая координата, а τ – текущее время. Эти значения вычисляют при аналитической обработке кривых сушки, построенных по результатам экспериментальных исследований на опытной установке [19, 20].

Результаты

Коэффициент влагопроводности прямо пропорционально зависит от температуры (табл.).

Таблица. Коэффициенты влагопроводности, определенные стационарным методом

Температура образца, °C	50	75	90
Коэффициент влагопроводности, м ² /с	$6,45 \cdot 10^{-9}$	$7,7 \cdot 10^{-9}$	$1,07 \cdot 10^{-8}$

Это связано со скоростью фазовых превращений на поверхности материала в верхней зоне и увеличением кинетической энергии молекул воды.

На рис. 3 приведены экспериментальные кривые сушки высушиваемых образцов при температурах теплоносителя: 50, 75 и 95 °С.

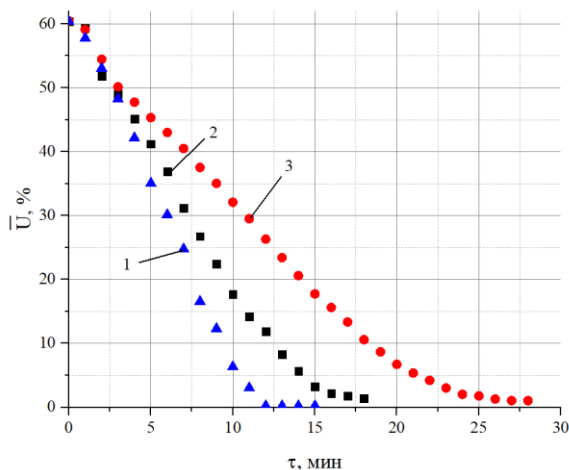


Рис. 3. Экспериментальные кривые сушки высушиваемых образцов при температурах $T_c = 95$ °С; 2 - $T_c = 75$ °С; 3 - $T_c = 50$ °С

Проанализировав рис. 3, отчетливо можно выделить периоды постоянной и падающей скорости сушки. Соответственно, для каждого из этих участков коэффициент влагопроводности будет отличаться.

На рис. 4 приведены кинетические данные процесса сушки контрольных слоев, отражающие локальные влагосодержания в центре образца $U_{x=b}$. Влагосодержание на поверхности образца $U_{x=0}$

принимается равной нулю. Для построения динамических кривых мы имеем локальные значения влагосодержания: $U_{x=0}$, $U_{x=b}$ и среднее влагосодержание в любой момент времени.

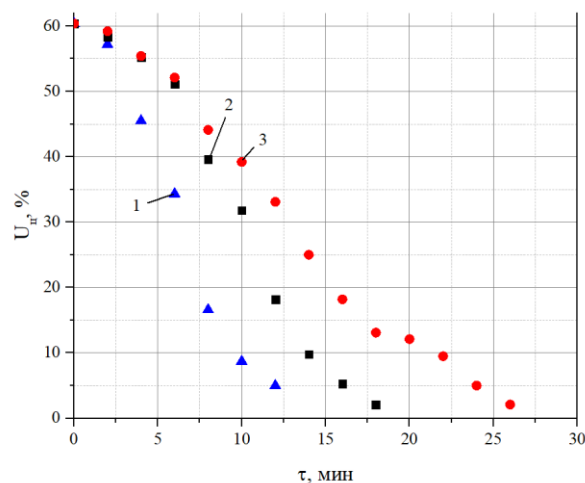


Рис. 4. Кинетические данные по влагосодержанию контрольных образцов при температурах $T_c = 95$ °С; 2 - $T_c = 75$ °С; 3 - $T_c = 50$ °С

Путем аналитической обработки полученных экспериментальных данных в языковой среде программирования Python с поддержкой модуля matplotlib были получены динамические кривые сушки, отражающие локальные влагосодержание высушиваемого материала по толщине в каждый момент времени (рис 5).

Значения влагосодержания, представленные на рис. 4, подставляли как влагосодержание в центре моделируемой частицы в каждый момент времени (рис. 5).

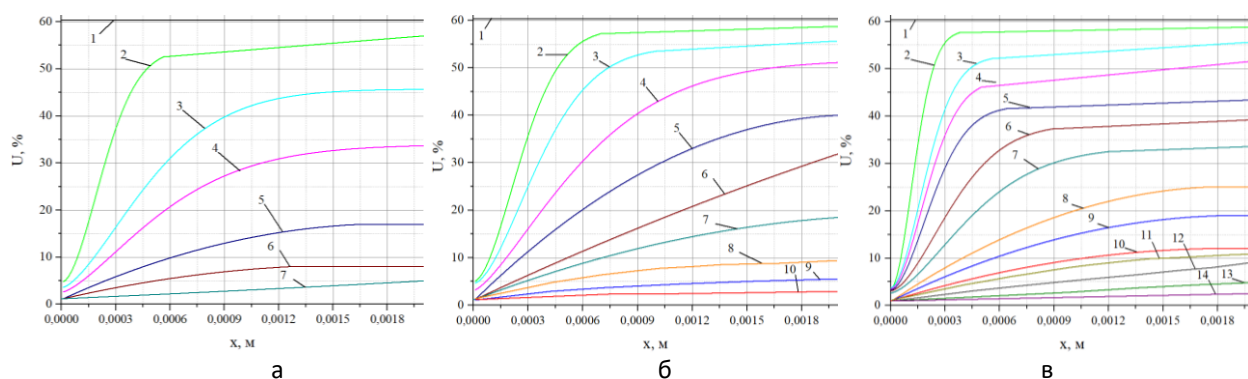


Рис 5. Динамическая кривая сушки по глубине слоя материала при температуре сушильного агента T_c : а – 95 °С; б – 75 °С; в – 50 °С. Текущее время, мин.: 1 - $\tau = 0$; 2 - $\tau = 2$; 3 - $\tau = 4$; 4 - $\tau = 6$; 5 - $\tau = 8$; 6 - $\tau = 10$; 7 - $\tau = 12$; 8 - $\tau = 14$; 9 - $\tau = 16$; 10 - $\tau = 18$; 11 - $\tau = 20$; 12 - $\tau = 22$; 13 - $\tau = 24$; 14 - $\tau = 26$.

При подстановке локальных значений влагосодержания U_x^t в уравнение (19) были получены зависимости коэффициента влагопроводности от влагосодержания при различных температурах (рис. 6).

Анализ кривых показал, что зависимости носят экспоненциальный характер, и со снижением влагосодержания коэффициент влагопроводности

уменьшается. Из этого можно сделать вывод, что коэффициент влагопроводности зависит от формы связи влаги с материалом. Полученные значения коэффициента влагопроводности не противоречат литературным данным [22].

После обработки динамических кривых (рис. 5) при различных температурах получены зависимости

коэффициента влагопроводности от температуры при различных значениях среднего влагосодержания (рис. 7).

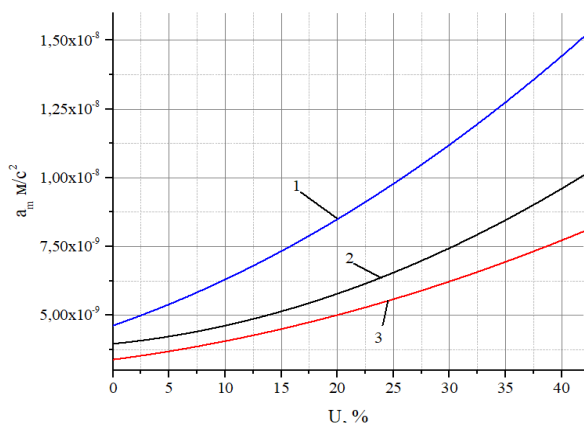


Рис. 6. Зависимость коэффициента влагопроводности от влагосодержания при разных температурах сушильного агента: 1 - $T_c = 95^\circ\text{C}$; 2 - $T_c = 75^\circ\text{C}$; 3 - $T_c = 50^\circ\text{C}$

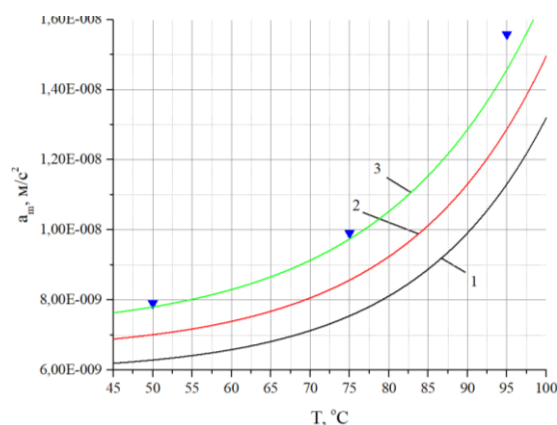


Рис. 7. Зависимость коэффициента влагопроводности от температуры при различных влагосодержаниях: 1 - $\bar{U} = 30\%$; 2 - $\bar{U} = 35\%$; 3 - $\bar{U} = 45\%$

На рис. 7 линиями показаны значения коэффициента влагопроводности, рассчитанные исследуемым методом решения обратной задачи дифференциального уравнения массопроводности, а точками – экспериментальные данные из таблицы, полученные стационарным методом. Результаты расходятся не более, чем на 15%. Таким образом можно говорить о возможности определения коэффициента влагопроводности предложенным методом – решением обратной задачи уравнения Фика.

Обсуждение

Рудак О. Г., Платонов А. Д. и Сапожников И.В. [10, 11, 21] в своих исследованиях определили коэффициент влагопроводности для таких распространенных древесных пород, как сосна и берёза. Согласно их данным, этот коэффициент варьируется в диапазоне от $0,65 \cdot 10^{-10}$ до $3,5 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2/\text{с}$, что обусловлено различиями в анатомическом строении древесины, её плотности, начальной влажности, а также условиями

проведения экспериментов (температура, градиент влажности и др.).

Получены значения коэффициента влагопроводности для прессованной костры льна, которые находятся в пределах от $3,45 \cdot 10^{-9}$ до $1,5 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2/\text{с}$. Эти результаты свидетельствуют о том, что прессованная костра льна обладает более высокой способностью к переносу влаги, чем исследованные образцы древесины. Такое различие можно объяснить рядом факторов:

- пористой и волокнистой структурой костры льна, которая, особенно после прессования, формирует развитую капиллярную систему, способствующую интенсивному движению влаги;
- более низкой плотностью по сравнению с древесиной, что снижает сопротивление диффузионному и капиллярному переносу влаги.

Более высокий коэффициент влагопроводности напрямую указывает и на более высокую скорость сушки прессованной костры льна по сравнению с древесиной сосны и берёзы при сопоставимых условиях. Это имеет важное практическое значение: сокращается продолжительность сушки, снижаются энергозатраты, уменьшается риск возникновения внутренних напряжений и дефектов, связанных с неравномерным удалением влаги.

Заключение

Разработанный метод определения коэффициента влагопроводности учитывает не только общий темп снижения влагосодержания, но и максимальный градиент концентрации в перерабатываемом сырье.

В результате аналитического и экспериментального исследования показана возможность определения зависимости коэффициента влагопроводности от влагосодержания путем решения обратной задачи уравнения Фика. Это позволит выполнять более точные расчеты конвективных сушилок, тем самым повысить энергоэффективность процесса.

Определенные численные значения коэффициента влагопроводности прессованной костры льна, которые составили от $3,45 \cdot 10^{-9}$ до $1,5 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2/\text{с}$ в диапазоне влажности 0...40%, температуре 45...100 $^\circ\text{C}$, и сравнение их с данными, полученными по классическому стационарному методу, показало, что расхождение результатов не превышает 12...15%, что подтверждает достоверность разработанного подхода. Это позволяет рекомендовать разработанный метод для оценки влагопроводности волокнистых растительных материалов, а также использовать полученные значения коэффициента влагопроводности при моделировании и оптимизации технологических процессов сушки, хранения и термовлажностной обработки костры льна.

Литература

1. Автоматизация технологических процессов при переработке сырья растительного происхождения / Ю. А. Максименко, Э. П. Дяченко, Ю. С.

Феклунова и др. // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. 2014. № 3. С. 21-29. doi:10.24143/2073-5529

2. Рудобашта С. П. Современное состояние и направления развития теории и практики сушки // Современные энергосберегающие тепловые технологии (сушка и тепловые процессы) СЭТТ - 2020: Сборник научных трудов Седьмой Международной научно-практической конференции, посвященной 110-летию со дня рождения Академика А.В. Лыкова, Москва, 13–15 октября 2020 года. Москва: Общество с ограниченной ответственностью "Мегаполис". 2020. С. 13-22.

3. Water in wood: A review of current understanding and knowledge gaps / E. E. Thybring, M. Fredriksson, S. L. Zelinka, et al. // Forests. 2022. Vol. 13. No. 12. P. 2051. doi:10.3390/f13122051.

4. Keey R. B., Langrish T. A. G., Walker J. C. F. Kiln-drying of Lumber // Springer Science & Business Media. 2012. Berlin. P. 325. doi:10.1007/978-3-642-59653-7.

5. Hameury S. Moisture buffering capacity of heavy timber structures directly exposed to an indoor climate: a numerical study // Building and Environment. 2005. Vol. 40. No. 10. P. 1400-1412. doi:10.1016/j.buildenv.2004.10.017

6. Egner K. Ermittlung von Wasserabgabe und Wasseraufnahme, Schwinden und Quellen der Hölzer // Die Prüfung nichtmetallischer Baustoffe. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013. P. 38-42. doi:10.1007/978-3-642-90989-4_5

7. Kollmann F. Härte und Abnutzungswiderstand // Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe: Erster Band: Anatomie und Pathologie, Chemie, Physik, Elastizität und Festigkeit. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013. P. 909–935. doi:10.1007/978-3-642-49758-2_27

8. Лыков А.В. Теория сушки. М., «Энергия», 1968. 472 с.

9. Рудак О.Г., Снопков В.Б. Исследование влагопроводности древесины сосны в различных структурных направлениях // Труды БГТУ. Лесная и деревообрабатывающая промышленность. 2010. №. 2. С. 180-183.

10. Влагопроводность ядровой древесины сосны, поврежденной сильным низовым и беглым верховым пожаром / А. Д. Платонов, С. Н. Снегирева, Е. В. Кантиева и др. // Лесотехнический журнал. 2023. Т. 13. № 4.1(52). С. 191-208. doi: 10.34220/issn.2222-7962/2023.4/12. EDN DKAPGJ.

11. Патент № 2649082 С1 Российская Федерация, МПК G01N 15/08. Способ определения коэффициента диффузии жидкости в капиллярно-пористом теле при воздействии ультразвуком: № 2016150288: заявл. 20.12.2016: опубл. 29.03.2018 / В. Н. Ковальногов, Т. В. Карпухина, Р. В. Федоров и др.; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Ульяновский государственный технический университет".

12. Моделирование процесса сушки вторичного сырья в технологической линии производства активированного угля / Р. Г. Сафин, А. С. Родионов, В. Г. Сотников и др. // Лесной вестник. Forestry Bulletin. 2023. Т. 27. № 4. С. 117-127.

13. Шадманов И. У. Математическая модель и эффективный численный алгоритм для исследования процессов тепло-влажноперевода в пористых средах // Проблемы вычислительной и прикладной математики. 2021. № 2(32). С. 117-134. EDN BFKMIR

14. Патент № 2152966 С1 Российская Федерация, МПК C08L 97/02, B27K 9/00, B27N 3/04. Пресс-композиция, способ ее получения и способ получения композиционных материалов на ее основе / Б.Н. Салин, О.В. Старцев, Ю.Г. Скурыдин: № 99102827/04: заявл. 15.02.1999: опубл. 20.07.2000.

15. Скуратов Н. В., Усов Д. В., Сергеев И. Г. Паропроницаемость и влагопроводность термически модифицированной древесины ясеня // Ежегодная национальная научно-техническая конференция профессорско-преподавательского состава, аспирантов и студентов Мытищинского филиала МГТУ им. Н.Э. Баумана по итогам научно-исследовательских работ за 2021 г.: Материалы конференции, Мытищи, Московская обл., 31 января 02 2022 года / Под общей редакцией В.Г. Санаева. Красноярск: Общество с ограниченной ответственностью "Научно-инновационный центр", 2022. С. 113-115. EDN NJKCDJ.

16. Архинчеев В. Е. Обобщенный закон Фика для аномальной диффузии в многомерной гребешковой модели // Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. 2007. Т. 86, № 7-8. С. 580–583.

17. Смирнова О. Е., Пичугин А. П. Технологические закономерности формирования гранулированного лигносодержащего заполнителя // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2025. № 4(796). С. 71-80. doi: 10.32683/0536-1052-2025-796-4-71-80. EDN NAICRV

18. Моделирование процесса термохимического разложения растительных отходов в технологической линии производства активированного угля / Р. Г. Сафин, А. С. Родионов, В. Г. Сотников и др. // Вестник Технологического университета. 2023. Т. 26. № 6. С. 50-56. doi: 10.55421/1998-7072_2023_26_6_50

19. Усков И. А. Сравнение метода конечных разностей и метода коллокаций по определению критических сил стержней переменного сечения // Colloquium-Journal. Голопристанский мисьяркий центр зайнятості = Голопристанский районный центр занятости, 2019. № 16-2. С. 99-101.

20. Горбунов А. Д., Уклеина С. В. Решение задачи конвективно-радиационного нагрева (охлаждения) тел простой геометрической формы методом конечных разностей // Математическое моделирование. 2017. № 1. С. 40-43.

21. Определение коэффициентов влагопроводности при низкотемпературной сушке древесины / И. В. Сапожников, Н. В. Скуратов, И. И. Алексеева и др.

// Вестник Московского государственного университета леса – Лесной вестник. 2016. Т. 20. № 4. С. 34-39. EDN WRJTCF. doi: 10.34220/issn.2222-7962/2023.4/12

References

1. Automation of technological processes in processing of plant-based raw materials / Yu. A. Maksimenko, E. P. Dyachenko, Yu. S. Fekunova, et al. // Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Control, Computer Engineering, and Informatics. 2014. No. 3. P. 21-29. doi:10.24143/2073-5529
2. Rudobashta S. P. Current state and directions of development of the theory and practice of drying // Modern energy-saving thermal technologies (drying and thermal processes) SETT - 2020: Collection of scientific papers of the Seventh International scientific and practical conference dedicated to the 110th anniversary of the birth of Academician A.V. Lykov, Moscow, October 13-15, 2020. Moscow: OOO "Megapolis", 2020. P. 13-22.
3. Water in wood: A review of current understanding and knowledge gaps / E. E. Thybring, M. Fredriksson, S. L. Zelinka, et al. // Forests. 2022. Vol. 13. No. 12. P. 2051. doi:10.3390/f13122051.
4. Keey R. B., Langrish T. A. G., Walker J. C. F. Kiln-drying of Lumber // Springer Science & Business Media. 2012. Berlin. P. 325. doi:10.1007/978-3-642-59653-7.
5. Hameury S. Moisture buffering capacity of heavy timber structures directly exposed to an indoor climate: a numerical study // Building and Environment. 2005. Vol. 40.No. 10. P. 1400-1412. doi: 10.1016/j.buildenv.2004.10.017
6. Egner K. Ermittlung von Wasserabgabe und Wasseraufnahme, Schwinden und Quellen der Hölzer // Die Prüfung nichtmetallischer Baustoffe. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013, P. 38-42. doi:10.1007/978-3-642-90989-4_5
7. Kollmann F. Härte und Abnutzungswiderstand // Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe: Erster Band: Anatomie und Pathologie, Chemie, Physik, Elastizität und Festigkeit. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013. P. 909–935. doi:10.1007/978-3-642-49758-2_27
8. Lykov A.V. Drying Theory. Moscow, Energia, 1968. 472 p.
9. Rudak O.G., Snopkov V.B. Study of pine wood moisture conductivity in different structural directions // Proceedings of BSTU. Forestry and Woodworking Industry. 2010. No. 2. P. 180–183.
10. Moisture conductivity of pine heartwood damaged by severe ground and fleeting crown fires / A. D. Platonov, S. N. Snegireva, E. V. Kantieva, et al. // Forest Engineering Journal. 2023. Vol. 13. No. 4.1(52). P. 191-208. doi: 10.34220/issn.2222-7962/2023.4/12. EDN DKAPGJ.
11. Patent No. 2649082 C1 Russian Federation, IPC G01N 15/08. Method for specification of the diffusion coefficient of a liquid in a capillary-pore body when exposed to ultrasound: No. 2016150288: applied 20.12.2016: published 29.03.2018 / V. N. Kovalnogov, T. V. Karpushina, R. V. Fedorov, et al.; applicant: Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Ulyanovsk State Technical University".
12. Modeling the drying process of secondary raw materials in an activated carbon production line / R. G. Safin, A. S. Rodionov, V. G. Sotnikov, et al. // Forestry Vestnik. 2023. Vol. 27. No. 4. P. 117-127.
13. Shadmanov I. U. Mathematical model and efficient numerical algorithm for studying heat and moisture transfer processes in porous media // Problems of Computational and Applied Mathematics. 2021. No. 2 (32). P. 117-134. EDN BFKMIR
14. Patent No. 2152966 C1 Russian Federation, IPC C08L 97/02, B27K 9/00, B27N 3/04. Press composition, method for producing it and method for producing composite materials based on it / B. N. Salin, O. V. Startsev, Yu. G. Skurydin: No. 99102827/04: applied 15.02.1999: published 20.07.2000.
15. Skuratov N. V., Usov D. V., Sergeev I. G. Vapor permeability and moisture conductivity of thermally modified ash wood // Annual national scientific and technical conference of the faculty, graduate students and students of the Mytishchi branch of Bauman Moscow State Technical University on the results of research work for 2021: Conference Proceedings, Mytishchi, Moscow region, January 31, 2022 / General editor V. G. Sanaev. Krasnoyarsk: OOO "Scientific Innovation Center", 2022. P. 113-115. EDN NJKCDJ.
16. Arkhincheev V. E. Generalized Fick's law for anomalous diffusion in a multidimensional comb model // Letters to the Journal of Experimental and Theoretical Physics. 2007. Vol. 86. No. 7-8. P. 580–583.
17. Smirnova O. E., Pichugin A. P. Technological patterns of formation of granulated lignin-containing filler // Vestnik of higher educational institutions. Construction. 2025. No. 4(796). P. 71-80. doi: 10.32683/0536-1052-2025-796-4-71-80. EDN NAICRV
18. Modeling of the process of thermochemical decomposition of plant waste in the technological line for the production of activated carbon / R. G. Safin, A. S. Rodionov, V. G. Sotnikov et al. // Vestnik of the Technological University. 2023. Vol. 26, No. 6. P. 50-56. doi: 10.55421/1998-7072_2023_26_6_50
19. Uskov I. A. Comparison of the finite difference method and the collocation method for determining the critical forces of rods with variable cross-section // Colloquium-Journal. Golopristsansky municipal employment center -Golopristsansky district employment center, 2019. No. 16-2. P. 99-101.
20. Gorbunov A. D., Ukleya S. V. Solution of the problem of convective-radiation heating (cooling) of bodies of simple geometric shape by the finite difference method // Mathematical modeling. 2017. No. 1. P. 40-43.
21. Determination of moisture conductivity coefficients during low-temperature wood drying / I. V. Sapozhnikov, N. V. Skuratov, I. I. Alekseeva, et al. // Vestnik of Moscow State Forest University - Forest Vestnik. 2016. Vol. 20, No. 4. P. 34-39. EDN WRJTCF. doi: 10.34220/issn.2222-7962/2023.4/12