

Е.В. Кантиева, С.Н. Снегирева, А.Д. Платонов

ВЛАГОПРОВОДНОСТЬ ЯДРОВОЙ ДРЕВЕСИНЫ СОСНЫ В СТВОЛЕ ДЕРЕВА

Введение. Технология переработки древесины включает обязательный процесс её высушивания или увлажнения. Данные процессы являются достаточно энергозатратными, и их трудно интенсифицировать. Процесс удаления влаги из древесины является одним из первичных [Сотникова, Соколова, 2019]. Он зависит от многих факторов. Сушка древесины повышает её качество, предупреждает формо- и размероизменяемость деталей и др. [Михайлова и др., 2020]. Реализация процессов увлажнения или сушки древесины невозможна без сведений о величине тока влаги [Арциховская, 1957; Алпаткина, 1967]. Показателем интенсивности тока влаги в древесине является коэффициент её влагопроводности. Он характеризует количество влаги, перемещаемое в единицу времени через единицу площади при разности концентрации влаги в 1 кг/м^3 на 1 м толщины [Серговский, 1952].

Исследованию влагопроводности древесины посвящены работы ряда отечественных ученых, из которых наибольший вклад внесли Н.В. Арциховская, Р.П. Алпаткина, А.В. Лыков, П.С. Серговский; из зарубежных ученых – Д.Ф. Мартлей, К. Эгнер и др. Полученные этими учеными численные значения коэффициента влагопроводности противоречивы. Последующие исследования влагопроводности древесины показали, что на перемещение влаги в древесине оказывает влияние ряд факторов. По данным ряда работ [Платонов и др., 2019; Скуратов и др., 2022; Платонов и др., 2023б] наибольшее влияние на влагопроводность древесины оказывают: её порода, плотность и твердость [Platonov et al., 2022; Snegireva et al., 2022], направление тока влаги, температура [Туукавина, Гудина, 2020], порода и структура её анатомических элементов, влажность и др. В работах [Михайлова и др., 2020; Платонов и др., 2023а; Chiniforush et al., 2019; Zhan et al., 2020; Afshari, Malek, 2022] отмечается влияние пористости древесины на её влагопроводность. Установлено, что увеличение размера полостей клеточных стенок оказывает большее влияние на повышение влагопроводности древесины, чем увеличение температуры. Большое влияние на перемещение влаги в древесине оказывает форма влаги. Так, при влажности ниже точки насыщения волокон ток влаги зависит от изменчивости плотности и структуры древесины [Платонов и др., 2023б].

В справочной литературе представлены значения коэффициента влагопроводности для большинства основных древесных пород, произрастающих на территории РФ и имеющих большое промышленное значение как в нашей стране, так и за рубежом. Эти значения коэффициента влагопроводности приведены для древесины, расположенной в нижней части ствола на высоте 1,3 м. Данные сведения о величине коэффициента влагопроводности не учитывают изменчивость плотности древесины по высоте ствола. Как показывают исследования, плотность древесины сосны, произрастающей в сухих борах лесостепной зоны РФ, понижается в среднем на 1,4% на каждый метр высоты ствола [Платонов и др., 2023а], при этом происходит повышение пористости древесины. Снижение плотности по высоте ствола оказывает одно из определяющих влияний на влагопроводность древесины.

Определение интенсивности тока влаги в древесине – процесс сложный и трудозатратный. Поэтому одним из способов определения, широко используемых в настоящее время, является моделирование. В научной литературе представлен ряд теоретических моделей диффузного переноса влаги в древесине ниже точки насыщения [Hofstetter, Eitelberger, 2011; Chiniforush et al., 2019; Zhan et al., 2020; Afshari, Malek, 2022]. Представленные модели диффузии влаги справедливы в определенных границах и имеют ряд допущений, которые лишь приближенно учитывают микро- или макроструктуру древесины, и в основе которых лежит допущение об «элементарной ячейке» трахеиды [Гостеев и др., 2003; Зарипов, Корниенко, 2021; Гороховский и др., 2022; Eitelberger, Hofstetter, 2011]. Подобное допущение не обеспечивает определение необходимой точности коэффициента влагопроводности, достаточной для проведения технологических процессов обезвоживания или увлажнения древесины. Несколько большей точностью определения коэффициента влагопроводности древесины являются методы рентгеноскопии, основанные на определении послойной влажности в древесине [Сапожников и др., 2016]. Косвенные методы определения влагопроводности древесины имеют ограничения, что существенно ограничивает их применение на практике. Исследование тока влаги вдоль волокон древесины важно при разработке и обосновании режимов сушки [Гостеев и др., 2003; Рудак, Снопков, 2010].

Представленные в литературных источниках модели не позволяют с заданной точностью описывать процессы влагопереноса в древесине. В основу этих моделей положено допущение об упрощенном строении древесины различных древесных пород. Ни одна из моделей не учитывает биологическую изменчивость структуры анатомических элементов, их размеров, наличие пороков, положение в стволе дерева и другие факторы, оказывающие влияние на перемещение диффузной влаги в древесине. Поэтому в

настоящее время задача моделирования процесса тока влаги в древесине, даже для отдельной группы пород, представляется крайне сложной.

Наиболее простым и точным решением задачи определения величины коэффициента влагопроводности древесины является экспериментальный метод стационарного тока влаги.

Цель и задачи исследования. Целью настоящего исследования является экспериментальное определение величины коэффициента влагопроводности ядровой древесины сосны с учетом местоположения по высоте ствола дерева.

Материалы и методы исследования. Исследование коэффициента влагопроводности выполняли на древесине сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.), произрастающей на территории учебно-опытного лесхоза Воронежского государственного лесотехнического университета им. Г.Ф. Морозова (УОЛ ВГЛТУ) в Воронежской области. Для исследования были выбраны деревья одной возрастной группы.

Предмет исследования составил коэффициент влагопроводности образцов из древесины *P. sylvestris* в тангенциальном и радиальном направлениях по высоте ствола.

Из свежесрубленной древесины ствола были выпилены диски толщиной 40 мм на высоте 0,5 м, 9 м и 18 м. Затем из каждого диска на расстоянии $0,5R$ были выпилены по 16 образцов размером 30×30 мм для определения тока влаги в радиальном и тангенциальном направлениях. Схема выпилки образцов на поперечном срезе ствола представлена на рис. 1. После этого все образцы были высушены до абсолютно сухого состояния.

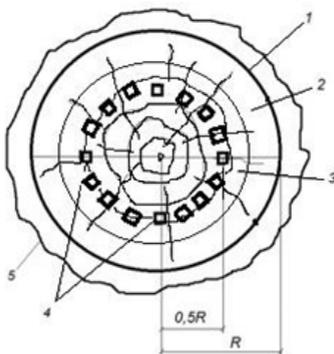


Рис. 1. Схема выпилки образцов:

1 – места отбора образцов; 2 – заболонь; 3 – ядро; 4 – кора

Fig. 1. Sample sawing scheme:

1 – sampling sites; 2 – sapwood; 3 – core; 4 – bark

Коэффициент влагопроводности ядровой древесины сосны в радиальном и тангенциальном направлениях на различной высоте ствола был определен методом стационарного тока влаги по методике, предложенной В.Н. Арциховской [1957].

Боковые стенки каждого из образцов изолировали от контакта с окружающей средой (рис. 2). Это обеспечивало ток влаги в образцах в заданном направлении. После этого каждый образец закрепляли в стеклянном стакане на крышке из тонкой жести. Все зазоры были обработаны герметиком. Часть стакана была заполнена дистиллированной водой. Интенсивность тока влаги в образце зависит от величины постоянного давления водяного пара у нижней части образца. Это было достигнуто за счет установки на дно стакана треноги из медной проволоки сечением 0,8 мм, обернутой в четыре слоя марли, и позволило поддерживать постоянное расстояние между его нижней частью и уровнем поверхности марли. Затем стаканы с образцами помещали в эксикаторы. Для обеспечения влажности воздуха, близкой к абсолютно сухому состоянию, в эксикаторы была налита серная кислота, которая поглощала пары влаги. Эксикаторы с образцами были помещены в шкафы при температуре 20 и 60 °С.

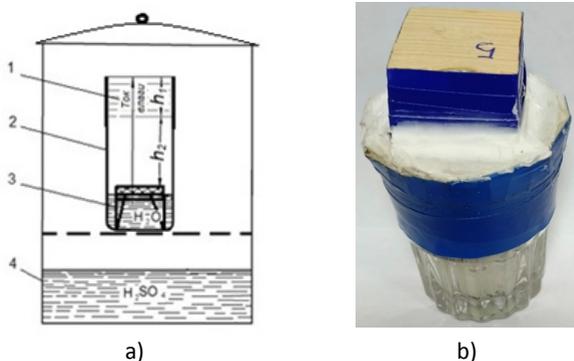


Рис. 2. Схема установки (а) и внешний вид стакана с образцом древесины (б):
1 – образец древесины; 2 – стакан; 3 – тренога; 4 – серная кислота

Fig. 2. Installation diagram (a) and appearance of a glass with a sample of wood (b):
1 – a sample of wood; 2 – a glass; 3 – a tripod; 4 – sulfuric acid

В результате разности парциальных давлений пара над образцом древесины и под ним происходит движение влаги. Каждые двое суток производили взвешивание образцов вместе со стаканами и определяли убыль массы. Прошедшую через образцы влагу поглощала серная кислота. По

мере поглощения влаги в эксикаторы добавляли серную кислоту для поддержания необходимой её концентрации. После установления постоянной убыли влаги через образцы их извлекали из стаканов и раскалывали на тонкие пластины толщиной 2–3 мм. Толщину каждой пластины измеряли в её средней части штангенциркулем. Суммарную разницу толщины всех пластин и первоначального размера образца равномерно распределяли между всеми пластинами. Затем каждую пластину взвешивали и определяли влажность весовым методом. Градиент влажности du/dx в образцах определяли графическим методом.

Численные значения коэффициента влагопроводности $D \cdot 10^{-10}$, $\text{м}^2/\text{с}$ определяли по формуле:

$$D = \frac{M}{F \cdot \rho_o \frac{du}{dx}}, \quad (1)$$

где M – количество влаги, прошедшей через древесину за 1 с, кг; F – площадь поверхности образца, перпендикулярная к направлению тока влаги, м^2 ; ρ_o – плотность древесины в абсолютно сухом состоянии, $\text{кг}/\text{м}^3$; du/dx – градиент влажности, м^{-1} .

Результаты исследований. На рис. 3-6 представлены экспериментальные значения величины коэффициента влагопроводности ядровой древесины сосны в радиальном и тангенциальном направлениях тока влаги по высоте ствола в зависимости от её влажности.

Величина коэффициента влагопроводности в радиальном направлении у древесины сосны по высоте ствола при температуре 20 °С изменяется достаточно существенно. В комлевой части ствола коэффициент влагопроводности древесины изменяется в интервале $2,9\text{--}3,4 \cdot 10^{-10}$ $\text{м}^2/\text{с}$. Понижение влажности древесины до 17% не оказывает существенного влияния на коэффициент влагопроводности, его величина составляет около $3,4 \cdot 10^{-10}$ $\text{м}^2/\text{с}$. Повышение влажности древесины выше 17% приводит к снижению величины коэффициента влагопроводности до $2,9 \cdot 10^{-10}$ $\text{м}^2/\text{с}$. Понижение влажности древесины в средней части ствола до 10% не оказывает существенного влияния на величину коэффициента влагопроводности, величина которого составляет в среднем $5,7 \cdot 10^{-10}$ $\text{м}^2/\text{с}$, а при повышении влажности выше 10% она постепенно снижается до $3,5 \cdot 10^{-10}$ $\text{м}^2/\text{с}$. В вершинной части ствола изменение величины коэффициента влагопроводности носит аналогичный характер. Так, при влажности древесины менее 10% коэффициент влагопроводности изменяется незначительно в пределах $6,2 \cdot 10^{-10}$ $\text{м}^2/\text{с}$, а при её повышении он монотонно понижается до $4,2 \cdot 10^{-10}$ $\text{м}^2/\text{с}$.

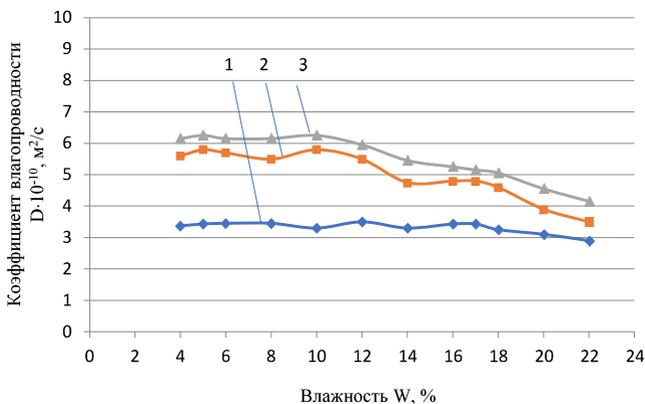


Рис. 3. Коэффициент влагопроводности ядровой древесины сосны в радиальном направлении по высоте ствола в зависимости от влажности при температуре 20 °С:

1 – комлевая часть ствола; 2 – средняя часть ствола;
3 – вершинная часть ствола

Fig. 3. Coefficient of moisture conductivity of pine core wood in the radial direction along the trunk height depending on humidity at a temperature of 20 °C:

1 – the butt part of the trunk; 2 – the middle part of the trunk;
3 – the apex part of the trunk

В тангенциальном направлении величина коэффициента влагопроводности у древесины сосны при температуре 20 °С и изменении влажности варьируется больше, чем в радиальном направлении. Так, в комлевой части ствола относительная стабильность тока влаги отмечена при влажности менее 10%, и коэффициент влагопроводности составляет в среднем $4,3 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2/\text{с}$. При увеличении влажности древесины интенсивность тока влаги постепенно убывает до величины $2,3 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2/\text{с}$. В средней части ствола отмечена стабилизация тока влаги около $4,8 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2/\text{с}$ при влажности древесины менее 16%. Повышение влажности древесины выше 16% приводит к понижению коэффициента влагопроводности до $3,2 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2/\text{с}$. В вершинной части ствола при влажности древесины менее 18% отмечается стабилизация тока влаги. Величина коэффициента влагопроводности составляет около $6,6 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2/\text{с}$. Повышение влажности древесины выше 18% приводит к понижению интенсивности тока влаги, и величина коэффициента влагопроводности понижается до $4,3 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2/\text{с}$.

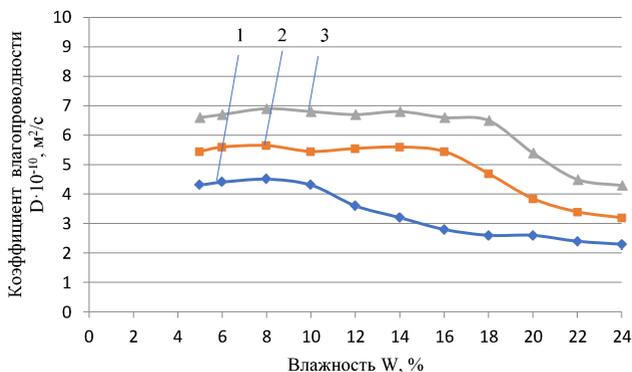


Рис. 4. Коэффициент влагопроводности ядровой древесины сосны в тангенциальном направлении по высоте ствола в зависимости от влажности при температуре 20 °С:

1 – комлевая часть ствола; 2 – средняя часть ствола;
3 – вершинная часть ствола

Fig. 4. Moisture conductivity coefficient of pine core wood in the tangential direction along the trunk height depending on humidity at a temperature of 20 °C:

1 – the butt part of the trunk; 2 – the middle part of the trunk;
3 – the apex part of the trunk

Интенсивность тока влаги в радиальном направлении больше, чем в тангенциальном, в древесине из комлевой части ствола в среднем на 14%, из средней части ствола – на 5%, а из вершинной – на 16%. Можно отметить, что независимо от направления тока влаги при температуре 20 °С величина коэффициента влагопроводности древесины сосны увеличивается по высоте ствола и в средней части ствола в 1,5 раза, а в вершинной – в 2,1 раза по сравнению с комлевой.

Коэффициент влагопроводности у древесины сосны в радиальном направлении при температуре 60 °С в комлевой части ствола в среднем составляет $9,8 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2/\text{с}$. С уменьшением влажности древесины с 22% до 2,5% коэффициент влагопроводности повышается с $5,5 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2/\text{с}$ до $13,5 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2/\text{с}$. Незначительное снижение величины влагопроводности древесины отмечено при влажности древесины около 8%.

В средней части ствола величина коэффициента влагопроводности составляет $14,9 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2/\text{с}$, а в вершинной – $20,0 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2/\text{с}$. При понижении влажности древесины с 22 до 2% интенсивность тока влаги в древесине из

средней части ствола возрастает с $8 \cdot 10^{-10}$ м²/с до $18,5 \cdot 10^{-10}$ м²/с, а в вершинной – с $13 \cdot 10^{-10}$ м²/с до $24 \cdot 10^{-10}$ м²/с. Относительная стабилизация тока влаги отмечена у древесины из средней и вершинной частей ствола в интервале влажности 12–16%, а также при влажности менее 8% в комлевой части ствола.

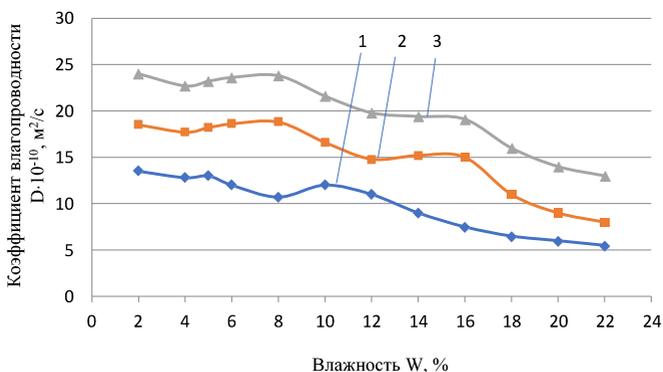


Рис. 5. Коэффициент влагопроводности ядровой древесины сосны в радиальном направлении по высоте ствола в зависимости от влажности при температуре 60 °С:

1 – комлевая часть ствола; 2 – средняя часть ствола;
3 – вершинная часть ствола

Fig. 5. Coefficient of moisture conductivity of pine core wood in the radial direction along the trunk height depending on humidity at a temperature of 60 °C:

1 – the butt part of the trunk; 2 – the middle part of the trunk;
3 – the apex part of the trunk

В тангенциальном направлении коэффициент влагопроводности древесины сосны из комлевой части ствола при температуре 60 °С в среднем составляет $7,5 \cdot 10^{-10}$ м²/с, в средней – $13,0 \cdot 10^{-10}$ м²/с, а в вершинной – $16,0 \cdot 10^{-10}$ м²/с. С уменьшением влажности древесины с 22% до 2% коэффициент влагопроводности в комлевой части ствола возрастает с $3,5 \cdot 10^{-10}$ м²/с до $11,0 \cdot 10^{-10}$ м²/с, в средней – с $9,2 \cdot 10^{-10}$ м²/с до $17,0 \cdot 10^{-10}$ м²/с, а в вершинной – с $12,4 \cdot 10^{-10}$ м²/с до $20,2 \cdot 10^{-10}$ м²/с.

Интенсивность тока влаги при температуре 60 °С в радиальном направлении больше, чем в тангенциальном, в древесине из комлевой части ствола в среднем на 14,0%, из средней части ствола – на 5,0%, а из

вершинной – на 16,0%, что соответствует значениям тока влаги при температуре 20 °С. Можно отметить, что при температуре 20 и 60 °С независимо от направления тока влаги закономерности изменения коэффициента влагопроводности в древесине сосны по высоте ствола идентичны. Действие температуры на интенсивность тока влаги в радиальном направлении и тангенциальном направлении различно. Так, при повышении температуры с 20 до 60 °С возрастает интенсивность тока влаги в древесине в радиальном направлении в среднем в 2,8 раза, а в тангенциальном – в 2,5 раза.

Практическое значение имеет средняя величина коэффициента влагопроводности по высоте ствола. Экспериментально установлено повышение тока влаги в древесине по высоте ствола. Среднее значение коэффициента влагопроводности в радиальном и тангенциальном направлении повышается в средней части ствола в 1,6 раза, а в вершинной – в 2,05 раза по сравнению с комлевой частью ствола.

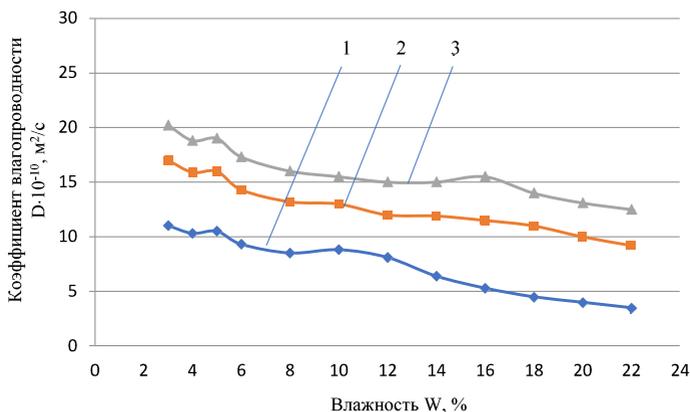


Рис. 6. Коэффициент влагопроводности ядровой древесины сосны в тангенциальном направлении по высоте ствола в зависимости от влажности при температуре 60 °С:

1 – комлевая часть ствола; 2 – средняя часть ствола;
3 – вершинная часть ствола

Fig. 6. Moisture conductivity coefficient of pine core wood in the tangential direction along the trunk height depending on humidity at a temperature of 60 °C:

1 – the butt part of the trunk; 2 – the middle part of the trunk;
3 – the apex part of the trunk

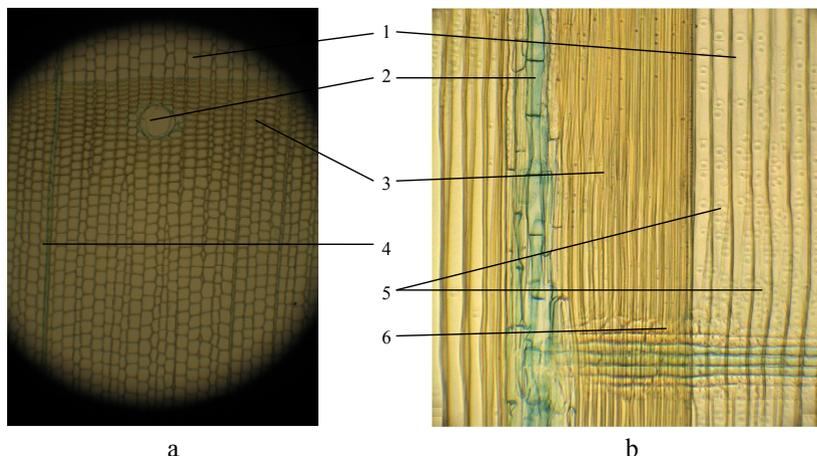


Рис. 7. Поперечный срез (а) и радиальный срез (б) древесины сосны:

- 1 – ранняя древесина; 2 – смоляной ход; 3 – поздняя древесина;
- 4 – сердцевинный луч; 5 – окаймленная пора; 6 – лучевая трахеида

Fig. 7. Cross section (a) and radial section (b) of pine wood:

- 1 – early wood; 2 – resin stroke; 3 – late wood; 4 – core beam; 5 – bordered pit;
- 6 – radial trachea

Для инженерных расчетов значения коэффициента влагопроводности древесины сосны в зависимости от температуры представлены в виде графиков на рис. 8.

Обсуждение. Анализ результатов исследования влагопроводности древесины сосны при температуре 20 °С показывает, что интенсивность тока влаги в радиальном направлении в комлевой части ствола практически не зависит от влажности древесины. Уменьшение количества диффузной влаги в древесине приводит к увеличению интенсивности её тока. Понижение влажности древесины до 10–12% и менее приводит к увеличению тока влаги в средней и вершинной частях ствола более чем в два раза по сравнению с комлевой частью ствола. С уменьшением влажности древесины в комлевой части ствола ток влаги в тангенциальном направлении возрастает примерно в два раза, достигая некоторой стабилизации при влажности 10% и менее. В средней и вершинной частях ствола он достигает наибольшей величины при влажности древесины менее 16–18%.

Различие в интенсивности тока влаги в древесине в радиальном и тангенциальном направлениях обусловлено строением анатомических элементов. Большее движение влаги в радиальном направлении обусловлено

наличием сердцевинных лучей и лучевых трахеид (рис. 7). Их равномерное распределение в стволе дерева способствует более равномерному току влаги в данном направлении.

В тангенциальном направлении перемещение влаги происходит в основном через окаймленные поры. Перемещение влаги через эти поры часто осложняется смещением торусов и перекрытием каналов пор. В нижней части ствола количество окаймленных пор со смещенным торусом выше. С увеличением высоты ствола количество пор со смещенным торусом несколько снижается. Это приводит к стабилизации тока влаги в тангенциальном направлении (рис. 4, поз. 2 и 3).

Большое влияние на влагопроводность древесины оказывает её плотность. В комлевой части ствола плотность древесины наибольшая. С увеличением высоты ствола происходит уменьшение плотности древесины и, как следствие этого, увеличение её пористости. Снижение плотности оказывает определяющее влияние на увеличение интенсивности тока влаги в древесине при невысокой температуре.

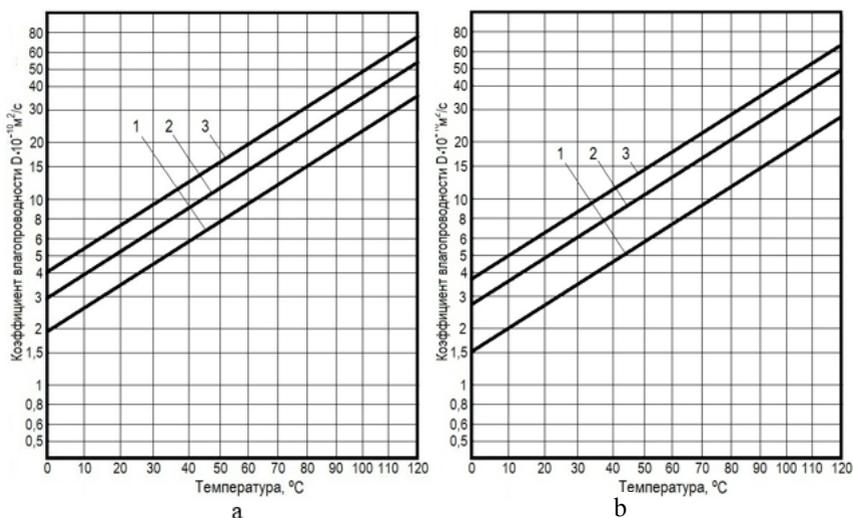


Рис. 8. Коэффициент влагопроводности ядровой древесины сосны в радиальном (а) и тангенциальном (б) направлениях по высоте ствола:

1 – комлевая часть ствола; 2 – средняя часть ствола; 3 – верхняя часть ствола

Fig. 8. The coefficient of moisture conductivity of pine core wood in the radial (a) and tangential (b) directions along the trunk height:

1 – the butt part of the trunk; 2 – the middle part of the trunk; 3 – the apex part of the trunk

Характер изменения коэффициента влагопроводности древесины из различных частей ствола дерева следует учитывать при атмосферной сушке. Интенсивность тока влаги в древесине сосны в радиальном направлении при температуре 20 °С в комлевой части ствола изменяется незначительно при изменении влажности древесины по сравнению с током влаги в средней и вершинной частях ствола. Величина коэффициента влагопроводности у древесины сосны в тангенциальном направлении меньше, чем в радиальном, примерно на 12%. Интенсивность атмосферной сушки пиломатериалов из комлевой части ствола будет меньше, чем из средней и вершинной частей ствола при прочих равных условиях, примерно в 1,5 раза. Представляется целесообразным при атмосферной сушке древесины до влажности менее 18% лесоматериалы из средней и вершинной частей ствола размещать в отдельные штабеля и поддерживать более высокую интенсивность испарения влаги. При атмосферной сушке также возможна укладка пиломатериалов в виде досок из комлевой части ствола в отдельные штабеля.

Наиболее эффективной предварительная сортировка пиломатериалов перед атмосферной сушкой будет в регионах, относящихся к четвертой климатической зоне. В данных регионах теплый период года превышает холодный, а средняя годовая температура достаточно высокая. Это обеспечивает относительно быстрое удаление влаги из древесины. По сравнению с другими климатическими зонами процесс высушивания древесины до влажности 10% является экономически выгодным.

Повышение температуры с 20 до 60 °С вызывает увеличение тока влаги в древесине примерно в два раза по всей высоте ствола. В связи с этим представляется также целесообразным осуществлять предварительную отсортировку пиломатериалов и укладку их в отдельные штабеля. Это позволит более эффективно использовать работу сушильных камер и повысить их производительность в 1,5–2,0 раза.

Большое практическое значение имеет возможность интенсификации процесса камерой сушки. Анализ величины коэффициента влагопроводности древесины показывает, что для сушки древесины сосны наиболее приемлемы многоступенчатые режимы сушки. Рекомендуемые РТМ режимы третьей ступени от начальной влажности древесины 25% не являются рациональными. Представляется целесообразными разбить третью ступень на участки с влажностью древесины 25–15%, 15–10% и менее 10%.

При повышении температуры увеличивается разница интенсивности тока влаги в радиальном направлении по сравнению с тангенциальным.

При сушке брусков или брусьев это позволит сократить продолжительность процесса сушки несколько больше, чем при сушке пиломатериалов в виде досок.

Выводы. Плотность древесины сосны понижается по высоте ствола, в связи с чем изменяется интенсивность тока влаги.

У древесины сосны интенсивность тока влаги в стволе в радиальном направлении выше, чем в тангенциальном, из комлевой части ствола в среднем на 14,0%, из средней части ствола – на 5,0%, а из вершинной – на 16,0% независимо от температуры среды.

Интенсивность тока влаги в древесине при повышении температуры с 20 до 60 °С возрастает в радиальном направлении в 2,8 раза, а в тангенциальном – в 2,5 раза.

По высоте ствола возрастает величина коэффициента влагопроводности древесины в средней части ствола в 1,6 раза, а в вершинной – в 2,05 раза по сравнению с комлевой.

Закономерности изменения величины коэффициента влагопроводности в зависимости от влажности древесины позволяют скорректировать существующие режимы атмосферной и камерной сушки, повысить скорость тока влаги и уменьшить величину остаточных напряжений в древесине.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

Алпаткина Р.П. О влагопроводности древесины важнейших отечественных пород // Деревообр. пром-сть. 1967. № 9. С. 12–14.

Арциховская Н.В. Исследование влагопроводности древесины // Труды института леса. 1957. Т. 9: Вопросы древесиноведения. С. 127–157.

Гороховский А.Г., Шишкина Е.Е., Агафонов А.С. Конвективная сушка пиломатериалов на основе управляемого влагообмена // ИВУЗ. Лесной журнал. 2022. № 1(385). С. 166–172. DOI: 10.37482/0536-1036-2022-1-166-172.

Гостеев Ю.А., Коробейников Ю.Г., Федоров А.В., Фомин В.М. Экспериментальное определение влагопроводности образцов из сосны в продольном направлении при конвективной сушке // Прикладная механика и техническая физика. 2003. Т. 44. № 3. С. 117–123.

Зарипов Ш.Г., Корниенко В.А. О влагообменных процессах при конвективной сушке в камерах периодического действия лиственничных пиломатериалов // Хвойные бореальной зоны. 2021. Т. 39. № 1. С. 60–65.

Михайлова Ю.С., Платонов А.Д., Снегирева С.Н., Киселева А.В., Мозговой Н.В. Определение минимальной высоты источника выбросов из камеры при сушке древесины бука // Лесотехнический журнал. 2020. Т. 9. №4 (36). С. 117–125.

Платонов А.Д., Волошин С.И., Снегирева С.Н., Киселева А.В., Мозговой Н.В., Сафонов А.О. Влагодпроводность древесины яблони // Лесотехнический журнал. 2019. Т. 8. №4 (32). С. 181–187.

Платонов А.Д., Снегирева С.Н., Кантиева Е.В., Бондаренко В.С., Киселева А.В. Влагодпроводность древесины сосны, поврежденной пожаром, при атмосферной сушке // Перспективные ресурсосберегающие технологии развития лесопромышленного комплекса: матер. между. науч.-практ. конф. мол. уч. и студ. Воронеж, 2023а. С. 126–129. DOI: 10.58168/R-STDTIC2023_126-129.

Платонов А.Д., Снегирева С.Н., Кантиева Е.В., Киселева А.В. Влагодпроводность ядровой древесины сосны, поврежденной сильным низовым и беглым верховым пожаром // Лесотехнический журнал. 2023б. Т. 13. № 4 (52). Ч. 1. С. 191–208. DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2023.4/12.

Рудак А.Г., Снопков Б.В. Исследование влагодпроводности древесины сосны в различных структурных направлениях // Труды БГТУ. № 2. Лесная и деревообрабатывающая промышленность. 2010. № 2. С. 180–183.

Сапожников И.В., Скуратов Н.В., Алексеева И.И., Самойленко Д.А., Мамонтов М.П., Матвеева К.А. Определение коэффициента влагодпроводности при низкотемпературной сушке древесины // Лесной вестник. Forestry Bulletin. 2016. № 4. С. 34–39.

Серговский П.С. Расчет процессов высыхания и увлажнения древесины. М.: Гослесбумиздат, 1952. 75 с.

Скуратов Н.В., Усов Д.В., Сергеев И.Г. Паропроницаемость и влагодпроводность термически модифицированной древесины ясеня // Ежегодная науч.-тех. конф. проф.-преп. состава, асп. и студ. Мытищинского филиала МГТУ им. Н.Э. Баумана по результатам НИР за 2021 г. Красноярск, 2022. С. 113–115.

Сотникова М.А., Соколова В.А. Разработка методов и процессов обезвоживания древесины и древесных отходов // Актуальные проблемы развития лесного комплекса: матер. XVII Междунар. науч.-технич. конф. Вологда: ВоГУ, 2019. С. 178–181.

Afshari Z., Malek S. Moisture Transport in Laminated Wood and Bamboo Composites Bonded with Thin Adhesive Layers – a Numerical Study // SSRN Electronic Journal. 2022. DOI: 10.2139/ssrn.4026076.

Chiniforush A.A., Valipour H., Akbarnezhad A.A. Water vapor diffusivity of engineered wood: Effect of temperature and moisture content // Construction and Building Materials. 2019. Vol. 224. P. 1040–1055.

Eitelberger J., Hofstetter K. Prediction of transport properties of wood below the fiber saturation point – A multiscale homogenization approach and its experimental validation. Part II: Steady state moisture diffusion coefficient // Composites Science and Technology. 2011. Vol. 71, iss. 2. P. 145–151.

Hofstetter A. K., Eitelberger J. Comprehensive model for transient moisture transport in wood below the fiber saturation point: Physical background, implementa-

tion and experimental validation // *International Journal of Thermal Sciences*. 2011. Vol. 50, iss. 10. P. 1861–1866.

Platonov A.D., Snegireva S.N., Drapalyuk M. V., Novikov A.I., Kantieva E.V., Novikova T.P. Wood Quality along the Trunk Height of Birch and Aspen Growing in the Restoring Forests of Central Russia // *Forests*. 2022. Vol. 13 (11), no. 1758. DOI: 10.3390/f13111758.

Snegireva S.N., Platonov A.D., Kiseleva A.V., Kantieva E.V. Variability of the hardness of pine wood damaged by strong grassroots and rampant riding fire // *Forestry Engineering Journal*. 2022. Vol. 11, no. 4. P. 79–87. DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2021.4/7.

Tyukavina O., Gudina A. Heating capability of postpyrogen pine wood // *Forestry Engineering Journal*. 2020. Vol. 10, no. 2. P. 188–195. DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2020.2/19.

Zhan T., Sun F., Lyu C., He Q., Xu K., Zhang Ya., Cai L., Huang Zh., Lyu J. Moisture diffusion properties of graded hierarchical structure of bamboo: Longitudinal and radial variations // *Construction and Building Materials*. 2020. Vol. 259, no. 119641. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119641.

References

Afshari Z., Malek S. Moisture Transport in Laminated Wood and Bamboo Composites Bonded with Thin Adhesive Layers – a Numerical Study. *SSRN Electronic Journal*, 2022. DOI: 10.2139/ssrn.4026076.

Alpatkina R.P. About moisture conductivity of the most important native tree species wood. *Woodworking industry*, 1967, no. 9, pp. 12–14. (In Russ.)

Artsikhovskaya N.V. Investigation of wood moisture conductivity. *Proceedings of Institute of Forest*, 1957, T. 9: Questions of wood science, pp. 127–157. (In Russ.)

Chiniforush A.A., Valipour H., Akbarnezhad A.A. Water vapor diffusivity of engineered wood: Effect of temperature and moisture content. *Construction and Building Materials*, 2019, vol. 224, pp. 1040–1055.

Eitelberger J., Hofstetter K. Prediction of transport properties of wood below the fiber saturation point – A multiscale homogenization approach and its experimental validation. Part II: Steady state moisture diffusion coefficient. *Composites Science and Technology*, 2011, vol. 71, iss. 2, pp. 145–151.

Gorokhovskiy A.G., Shishkina E.E., Agafonov A.S. Convective drying of lumber based on controlled moisture exchange. *IVUZ. Forest Journal*, 2022, no. 1(385), pp. 166–172. DOI: 10.37482/0536-1036-2022-1-166-172. (In Russ.)

Gosteev Yu.A., Korobeynikov Yu.G., Fedorov A.V., Fomin V. M. Experimental determination of moisture conductivity of pine samples in the longitudinal direction during convective drying. *Applied Mechanics and technical physics*, 2003, vol. 44, no. 3, pp. 117–123. (In Russ.)

Hofstetter A.K., Eitelberger J. Comprehensive model for transient moisture transport in wood below the fiber saturation point: Physical background, implementation and experimental validation. *International Journal of Thermal Sciences*, 2011, vol. 50, iss. 10, pp. 1861–1866.

Mikhailova Yu.S., Platonov A.D., Snegireva S.N., Kiseleva A.V., Mozgovoy N.V. Determination of the minimum height of the emission source from the chamber during drying of beech wood. *Forestry Engineering Journal*, 2019, T. 9, no. 4(36), pp. 117–125. (In Russ.)

Platonov A.D., Voloshin S., Snegireva S.N., Kiseleva A.V., Mozgovoy N., Safonov A.O. Moisture conductivity of apple wood. *Forestry Engineering Journal*, 2018, vol. 8, no. 4(32), pp. 181–187. (In Russ.)

Platonov A.D., Snegireva S.N., Drapalyuk M. V., Novikov A.I., Kantieva E.V., Novikova T.P. Wood Quality along the Trunk Height of Birch and Aspen Growing in the Restoring Forests of Central Russia. *Forests*, 2022, vol. 13 (11), no. 1758. DOI: <https://doi.org/10.3390/f13111758>.

Platonov A.D., Snegireva S. N., Kantieva E. V., Bondarenko V.S., Kiseleva A.V. Moisture conductivity of pine wood damaged by fire during atmospheric drying. *Promising resource-saving technologies for the development of the timber industry complex: materials of Int. sci.-pract. conf. of young scientists and students. Voronezh, 2023a*, pp. 126–129. DOI: 10.58168/R-STD TIC2023_126-129. (In Russ.)

Platonov A.D., Snegireva S.N., Kantieva E.V., Kiseleva A.V. Heartwood moisture conductivity of standing pine damaged by running crown and strong surface wildfire. *Forestry Engineering Journal*, 2023b, vol. 13, no. 4 (52), p. 1, pp. 191–208. DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2023.4/12. (In Russ.)

Rudak A.G., Snopkov B.V. Investigation of moisture conductivity of pine wood in various structural directions. *Proceedings of BSTU. Series 2. Forestry and woodworking industry*, 2010, no. 2, pp. 180–183. (In Russ.)

Sapozhnikov I.V., Skuratov N.V., Alekseeva I.I., Samoilenko D.A., Mamontov M.P., Matveeva K.A. Determination of the coefficient of moisture conductivity during low-temperature drying of wood. *Lesnoy vestnik. Forestry Bulletin*, 2016, no. 4, pp. 34–39. (In Russ.)

Sergovskiy P.S. Calculation of wood desiccation and humidification processes. M.: State Publishing House of Forest and Paper Industry, 1952. 75 p. (In Russ.)

Skuratov N.V., Usov D.V., Sergeev I.G. Vapor permeability and moisture conductivity of thermally modified ash wood. *Annual nat. sci-tech. conf. for Professors, Lecturers, Postgraduate Students and Students of Mytitschi branch of MSTU named after N.E. Bauman based on results of R&D in 2021. Krasnoyarsk, 2022*, pp. 113–115. (In Russ.)

Snegireva S.N., Platonov A.D., Kiseleva A.V., Kantieva E. V. Variability of the hardness of pine wood damaged by strong grassroots and rampant riding fire. *Forestry Engineering Journal*, 2022, vol. 11, no. 4., pp. 79–87. DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2021.4/7.

Sotnikova M.A., Sokolova A.V. Development of methods and processes for dewatering wood and wood waste. *Actual problems of the development of the forest complex: mater. of XVII int. sci.-tech. conf. Vologda: VoSU, 2019, pp. 178–181. (In Russ.)*

Tyukavina O., Gudina A., Heating capability of postpyrogen-pine wood. *Forestry Engineering Journal*, 2020, vol. 10, no. 2, pp. 188–195. DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2020.2/19>.

Zaripov Sh.G., Kormienko V.A. On moisture exchange processes during convective drying in batch chambers of larch lumber. *Coniferous boreal zones*, 2021, vol. 39, no. 1, pp. 60–65. (In Russ.)

Zhan T., Sun F., Lyu C., He Q., Xu K., Zhang Ya., Cai L., Huang Zh., Lyu J. Moisture diffusion properties of graded hierarchical structure of bamboo: Longitudinal and radial variations. *Construction and Building Materials*, 2020, vol. 259, no. 119641. DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2020.119641](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119641).

Материал поступил в редакцию 28.07.2024

Кантиева Е.В., Снегирева С.Н., Платонов А.Д. Влагопроводность ядровой древесины сосны в стволе дерева // *Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2024. Вып. 251. С. 350–368. DOI: [10.21266/2079-4304.2024.251.350-368](https://doi.org/10.21266/2079-4304.2024.251.350-368)*

В статье рассмотрен процесс перемещения влаги в древесине в процессе её гидротермической обработки. Получение качественно высушенного материала с минимальными внутренними напряжениями возможно на основе сведений о величине тока влаги в древесине, выражаемой через коэффициент влагопроводности. На коэффициент влагопроводности большое влияние оказывает температура, с повышением которой его величина существенно возрастает. На интенсивность тока влаги в древесине оказывают влияние порода, направление тока влаги и место расположения древесины в стволе дерева. Имеющиеся сведения о влагопроводности древесины не учитывают изменчивость плотности древесины по высоте ствола дерева и представлены для комлевой части ствола. Определение коэффициента влагопроводности установлено в радиальном и тангенциальном направлении для ядровой древесины сосны с учетом высоты ствола методом стационарного тока влаги. Экспериментально установлено повышение величины коэффициента влагопроводности древесины сосны по высоте ствола в средней его части в 1,6 раза, а в вершинной – в 2,05 раза по сравнению с комлевой. Интенсивность тока влаги в радиальном направлении выше, чем в тангенциальном, в древесине из комлевой части ствола в среднем на 14,0%, из средней части ствола – на 5,0%, а из вершинной – на 16,0% независимо от температуры среды. Полученные

закономерности об изменчивости коэффициента влагопроводности древесины сосны по высоте ствола показывают целесообразность проведения предварительной сортировки древесины перед гидротермической обработкой с учетом местоположения её в стволе дерева. Это позволит оптимизировать процессы высыхания и увлажнения древесины, обосновать рациональные режимы камерной и атмосферной сушки.

Ключевые слова: коэффициент влагопроводности, влажность древесины, древесина сосны, плотность древесины, древесина ядровая, метод стационарного тока влаги, диффузный ток влаги, ствол дерева, высота ствола.

Kantieva E.V., Snegireva S.N., Platonov A.D. Moisture conductivity of pine core wood in a tree trunk. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhniceskoj Akademii*, 2024, iss. 251, pp. 350–368 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2024.251.350-368

The article considers the process of moisture transfer in wood during its hydrothermal treatment. Obtaining a high-quality dried material with minimal internal stresses is possible based on information about the amount of moisture current in the wood, expressed in terms of the moisture conductivity coefficient. The coefficient of moisture conductivity is greatly influenced by temperature, with an increase in which its value increases significantly. The intensity of the moisture current in the wood is influenced by the breed, the direction of the moisture current and the location of the wood in the tree trunk. The available information on the moisture conductivity of wood does not take into account the variability of the density of wood in the height of the tree trunk and is presented for the butt part of the trunk. The determination of the moisture conductivity coefficient was established in the radial and tangential directions for sound pine wood, taking into account the height of the trunk by the method of stationary moisture current. Experimentally, an increase in the value of the moisture conductivity coefficient of pine wood in the height of the trunk in its middle part by 1.6 times, and in the apex – by 2.05 times compared with the lump. The intensity of the moisture current in the radial direction is higher than in the tangential direction in wood from the butt part of the trunk by an average of 14.0%, from the middle part of the trunk – by 5.0%, and from the apex – by 16.0% regardless of the ambient temperature. The obtained patterns on the variability of the moisture conductivity coefficient of pine wood in trunk height show the expediency of carrying out preliminary sorting of wood before hydrothermal treatment, taking into account its location in the trunk of the tree. This will optimize the processes of drying and moistening of wood, justify rational modes of chamber and atmospheric drying.

Keywords: moisture conductivity coefficient, wood moisture, pine wood, wood density, sound wood, stationary moisture current method, diffuse moisture current, tree trunk, trunk height.

КАНТИЕВА Екатерина Валентиновна – заведующая кафедрой механической технологии древесины Воронежского государственного лесотехнического университета имени Г.Ф. Морозова, кандидат технических наук. ResearcherID: AAR-8571-2020. ORCID: 0000-0001-8352-1941.

394087, ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, Россия. E-mail: ekantieva@mail.ru

KANTIEVA Ekaterina V. – PhD (Technical), Head of the Department of Production, Mechanical Wood Technology, Voronezh State Forestry Engineering University named after G.F. Morozov. Researcher ID: AAR-8571-2020. ORCID: 0000-0001-8352-1941.

394087. Timiryazev str. 8. Voronezh. Russia. E-mail: ekantieva@mail.ru

СНЕГИРЕВА Светлана Николаевна – доцент кафедры древесиноведения Воронежского государственного лесотехнического университета имени Г.Ф. Морозова, кандидат биологических наук. ResearcherID: AAR-5877-2020. ORCID: 0000-0003-4371-2270.

394087, ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, Россия. E-mail:svetka-sneg@yandex.ru

SNEGIREVA Svetlana N. – PhD (Biological), Associate Professor of the Department of Wood Science, Voronezh State Forestry Engineering University named after G.F. Morozov. Researcher ID: AAR-5877-2020. ORCID: 0000-0003-4371-2270.

394087. Timiryazev str. 8. Voronezh. Russia. E-mail: svetka-sneg@yandex.ru

ПЛАТОНОВ Алексей Дмитриевич – заведующий кафедрой древесиноведения Воронежского государственного лесотехнического университета имени Г.Ф. Морозова, доктор технических наук. ResearcherID: AAC-9820-2019. ORCID: 0000-0001-5941-6287.

394087, ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, Россия. E-mail: aleksey66@yandex.ru

PLATONOV Aleksei D. – DSc (Technical), Head of the Department of WoodScience, Voronezh State Forestry Engineering University named after G.F. Morozov. Researcher ID: AAC-9820-2019. ORCID: 0000-0001-5941-6287.

394087. Timiryazev str. 8. Voronezh. Russia. E-mail: aleksey66@yandex.ru