

Оригинальная статья

DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.4/12>

УДК 630.43:630.812



## Влагопроводность ядровой древесины сосны, поврежденной сильным низовым и беглым верховым пожаром

Алексей Д. Платонов ✉, [aleksey66@yandex.ru](mailto:aleksey66@yandex.ru)  <https://orcid.org/0000-0001-5941-6287>

Светлана Н. Снегирева, [svetka-sneg@yandex.ru](mailto:svetka-sneg@yandex.ru)  <https://orcid.org/0000-0003-4371-2270>

Екатерина В. Кантиева, [ekantieva@mail.ru](mailto:ekantieva@mail.ru)  <https://orcid.org/0000-0001-8352-1941>

Александра В. Киселева, [avk50@yandex.ru](mailto:avk50@yandex.ru)  <https://orcid.org/0000-0002-5960-6133>

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, 394087, Российская Федерация

Действие пожара оказывает влияние на ствол дерева. Из общего количества пожаров в лесостепной зоне России преобладают сильные низовые пожары. В результате этого вида пожара выгорает подлесок, что способствует наиболее длительному воздействию высокой температуры на комлевою, хозяйственно ценную, часть ствола. Воздействие высокой температуры оказывает влияние на структуру анатомических элементов древесины, происходит нарушение её целостности. В древесине сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.), стоящей на корню, после повреждения пожаром протекают деструктивные процессы, оказывающие существенное влияние на её физико-механические свойства и сопровождаемые интенсивным смолообразованием. Одним из первичных процессов в технологии переработки древесины является её обезвоживание, в результате которой древесина превращается из природного материала в технологическое сырьё. Поэтому применение существующих технологических режимов сушки к древесине, поврежденной пожаром, нецелесообразно. Проведение процессов обезвоживания или увлажнения древесины невозможно без сведений о величине её влагопроводности. Влагопроводность древесины определяется коэффициентом влагопроводности. Величину коэффициента влагопроводности образцов поврежденной пожаром и неповрежденной ядровой древесины *P. sylvestris*, извлеченных из комлевой части ствола, определяли методом стационарного тока влаги в радиальном и тангенциальном направлениях. По сравнению с неповрежденной древесиной сосны обыкновенной у древесины, поврежденной пожаром, наблюдается обратная зависимость интенсивности тока влаги – в тангенциальном направлении выше, чем в радиальном. Происходит общее снижение коэффициента влагопроводности древесины сосны: в радиальном направлении – на  $40.2 \pm 1.58$  % ( $p < 0.05$ ), в тангенциальном – на  $14.5 \pm 0.92$  % ( $p < 0.05$ ) по сравнению с неповрежденной древесиной. Закономерности изменения величины коэффициента влагопроводности в древесине сосны, поврежденной пожаром, позволяют скорректировать существующие режимы сушки и повысить качество высушиваемой древесины и эффективность технологии сушки древесины.

**Ключевые слова:** коэффициент влагопроводности, влажность древесины, хвойная древесина, *Pinus sylvestris* L., древесина на корню, древесина ядровая, метод стационарного тока влаги, диффузный ток влаги, лесной пожар

**Финансирование:** данное исследование не получало внешнего финансирования.

**Благодарности:** авторы благодарят рецензентов за вклад в экспертную оценку статьи.

**Конфликт интересов:** авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

**Для цитирования:** Благопроводность ядровой древесины сосны, поврежденной сильным низовым и беглым верховым пожаром / А. Д. Платонов, С. Н. Снегирева, Е. В. Кантиева, А. В. Киселева // Лесотехнический журнал. – 2023. – Т. 13. – № 4 (52). – Ч. 1. – С. 191–208. – Библиогр.: с. 204–208 (31 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.4/12>.

Поступила 04.12.2023. Пересмотрена 14.12.2023. Принята 16.12.2023. Опубликована онлайн 29.12.2023.

Article

### Heartwood moisture conductivity of standing pine damaged by running crown and strong surface wildfire

Aleksey D. Platonov✉, [aleksey66@yandex.ru](mailto:aleksey66@yandex.ru),  <https://orcid.org/0000-0001-5941-6287>

Svetlana N. Snegireva, [svetka-sneg@yandex.ru](mailto:svetka-sneg@yandex.ru),  <https://orcid.org/0000-0003-4371-2270>

Ekaterina V. Kantieva, [ekantieva@mail.ru](mailto:ekantieva@mail.ru)  <https://orcid.org/0000-0001-8352-1941>

Aleksandra V. Kiseleva, [avk50@yandex.ru](mailto:avk50@yandex.ru),  <https://orcid.org/0000-0002-5960-6133>

Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazeva str., 8, Voronezh city, 394087, Russian Federation

#### Abstract

The forest fire has an effect on the tree trunk. Of the total number of fires in the forest-steppe zone of Russia, strong grass-roots fires prevail. As a result of this type of fire, the undergrowth burns out, which contributes to the most prolonged exposure to high temperature on the lumpy, economically valuable part of the trunk. The effect of high temperature affects the structure of the anatomical elements of wood, its integrity is violated. In the standing timber of the Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) destructive processes occur after fire damage, which have a significant effect on its physico-mechanical properties and are accompanied by intensive tar formation. One of the primary processes in wood processing technology is its dehydration, as a result of which wood is transformed from a natural material into a technological raw material. Therefore, the application of existing technological drying modes to wood damaged by fire is impractical. It is impossible to carry out the processes of dehydration or humidification of wood without information about the value of its moisture conductivity. The moisture conductivity of wood is determined by the moisture conductivity coefficient. The value of the moisture conductivity coefficient of samples of fire-damaged and undamaged *P. sylvestris* heartwood extracted from the stemwood was determined by the method of stationary moisture flow in the radial and tangential directions. In comparison with the intact Scots pine wood, wood damaged by fire has an inverse dependence of the intensity of the moisture current – in the tangential direction it is higher than in the radial direction. There is a general decrease in the moisture conductivity coefficient of pine wood: in the radial direction – by  $40.2 \pm 1.58\%$  ( $p < 0.05$ ), in the tangential direction – by  $14.5 \pm 0.92\%$  ( $p < 0.05$ ) compared with intact wood. Patterns of changes in the value of the heartwood coefficient of moisture conductivity in standing pine, damaged by fire, will allow to adjust the existing drying modes and improve the quality of the dried wood and the efficiency of the softwood kiln drying technology.

**Keywords:** moisture conductivity coefficient, wood moisture, standing timber, softwood, heartwood, *Pinus sylvestris* L., method of stationary moisture current, diffuse moisture current, wildfire, drying, running crown fire, surface fire

**Funding:** this research received no external funding.

**Acknowledgments:** authors thank the reviewers for their contribution to the peer review.

**Conflict of interest:** the authors declare no conflict of interest.

**Для цитирования:** 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. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry Engineering journal], Vol. 13, No. 4 (52), part 1, pp. 191-208 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.4/12>.

**Received** 04.12.2023. **Revised** 14.12.2023. **Accepted** 16.12.2023. **Published online** 29.12.2023.

### Введение

Ежегодно в мире повреждается пожарами большое количество лесных насаждений [24, 28]. Степень повреждения насаждения пожаром зависит от многих факторов [23]. Наибольшее влияние на стойкость насаждений при воздействии высокой температуры пожара оказывают условия произрастания. Как показывает практика, стойкость насаждений в более влажных условиях произрастания, особенно в высокой широтной зональности существенно выше [30], чем в южных более засушливых регионах, и особенно в лесостепной зоне\*. Степень повреждения деревьев во многом зависит и от их возраста [29]. Чем больше возраст насаждения, тем выше стойкость деревьев к воздействию высокой температуры пожара. Большое влияние на степень повреждения насаждений оказывает вид пожара. Наибольший урон насаждениям наносит сильный низовой и повальный верховой пожар, наименьший – слабый низовой.

Действие пожара на ствол дерева различно. Однако при всех видах пожара наибольшее воздействие высокой температуры приходится на нижнюю, наиболее ценную часть ствола. Из общего количества пожаров в лесостепной зоне России преобладают сильные низовые пожары. В результате этого вида пожара выгорает подлесок, что способствует наиболее длительному воздействию высокой температуры на комлевую часть ствола (рис. 1).

Мониторинг состояния древостоев в лесостепной зоне РФ, после повреждения пожаром показал их невысокую биологическую стойкость. Уже через год после пожара отмечают повреждение древесины насекомыми. В результате воздействия высокой температуры происходит активное парообразование свободной влаги в древесине и повышение

давления паровоздушной смеси. Высокое давление паровоздушной смеси вызывает разрушение структуры некоторых анатомических элементов древесины, нарушению целостности тканей, а также интенсивное образование смолы, что приводит к сильному засмолению древесины. Наиболее сильное засмоление древесины отмечено в зоне ствола, подвергшейся воздействию высокой температуры, особенно в нижней его части. На стволе дерева в зоне поражения кора имеет сильный нагар. Это может служить хорошим диагностическим признаком предварительной оценки качества древесины перед её раскромом на сортименты.



Рисунок 1. Древостой сосны обыкновенной (*P. sylvestris* L.), поврежденный сильным низовым и беглым верховым пожаром

Figure 1. *P. sylvestris* L. stand damaged by a strong surface fire and running crown fire

Источник: собственное фото авторов  
Source: authors' own photos

Мониторинг состояния древостоев в лесостепной зоне РФ после повреждения пожаром показал их невысокую биологическую стойкость. Уже

\* Демаков, Ю. П. Лесоводство. Ведение хозяйства в лесах, пораженных пожарами: / Ю. П. Демаков, К. К. Калинин. Йошкар-Ола: МарГТУ, 2003. 135 с.

через год после пожара отмечают повреждение древесины насекомыми. В результате воздействия высокой температуры происходит активное парообразование свободной влаги в древесине и повышение давления паровоздушной смеси. Высокое давление паровоздушной смеси вызывает разрушение структуры некоторых анатомических элементов древесины, нарушению целостности тканей, а также интенсивное образование смолы, что приводит к сильному засмолению древесины. Наиболее сильное засмоление древесины отмечено в зоне ствола, подвергшейся воздействию высокой температуры, особенно в нижней его части. На стволе дерева в зоне поражения кора имеет сильный нагар. Это может служить хорошим диагностическим признаком предварительной оценки качества древесины перед её раскроем на сортименты.

Воздействие высокой температуры оказывает существенное влияние на физико-механические свойства древесины [31]. У древесины, поврежденной пожаром, изменяются гигроскопические свойства. Существенно понижается предел гигроскопичности древесины, её тепловые свойства. Повышенная засмоленность древесины оказывает влияние на её плотность и механические показатели.

В ВГЛТУ выполнены исследования на древесине сосны, произрастающей в сухих борах лесостепной зоны России, после повреждения сильным низовым и беглым верховым пожаром [2-4]. В результате длительного мониторинга установлено, что у древесины в насаждениях, расположенных в сухих борах лесостепной зоны, после повреждения пожаром происходит снижение прочностных свойств гораздо быстрее, чем у древесины в насаждениях, произрастающих во влажных борах севера европейской части России. В течение 19 месяцев древесина сохраняет свои прочностные свойства на уровне<sup>1</sup>, допустимом для её использования в качестве конструкционного или технологического материала. Такая древесина, поврежденная пожаром, может быть рекомендована к применению без ограничений

<sup>1</sup> Макаров, А.В. Технические качества древесины, пораженной различными видами пожара // Лесотехнический журнал. – 2011. - № 4. - С. 14-18.

<sup>2</sup> Арциховская, Н. В. Исследование влагопроводности древесины / Н. В. Арциховская // Труды института леса. – М. : Изд-во АН СССР, 1957. – Т. 9. – С. 127-157

[1, 4]. После указанного срока стояния на корню происходит существенное снижение прочностных показателей древесины.

В настоящее время поврежденная пожаром древесина в деревоперерабатывающей промышленности практически не используется. Одной из основных причин этого является слабая изученность её свойств. Используемые технологические процессы не в полной мере могут быть применимы при обработке древесины, поврежденной пожаром без учета особенностей её свойств.

Одним из первичных процессов в технологии переработки древесины является её обезвоживание [6]. Сушка древесины улучшает её качество, предотвращает порчу от загнивания, предупреждает деформацию и размероизменяемость деталей и др. [7]. Проведение процессов обезвоживания или увлажнения древесины, невозможно без сведений о величине её влагопроводности<sup>2,3</sup>. Показатель влагопроводности древесины определяется коэффициентом её влагопроводности. Коэффициент влагопроводности является основным показателем, характеризующим интенсивность потока влаги внутри древесины. Он характеризует количество влаги, перемещаемое в единицу времени через единицу площади при разности концентрации влаги в  $1 \text{ кг/м}^3$  на  $1 \text{ м}$  толщины<sup>4</sup>.

Несмотря на то, что изучением передвижения влаги в твердых гигроскопических телах занималось немало исследователей, полной ясности в этом вопросе нет и до настоящего времени. Это можно объяснить тем, что на процесс передвижения влаги в древесине, особенно в процессе ее высыхания, оказывает влияние большое количество зависимых и независимых величин. Наибольшее влияние на влагопроводность древесины оказывают её порода [19, 21], направление тока влаги, температура [27], плотность и твердость [20, 26] и др. Из всех указанных факторов наибольшее влияние на интенсивность тока влаги в древесине оказывает темпера-

<sup>3</sup> Алпаткина, Р. П. О влагопроводности древесины важнейших отечественных пород/ Деревообр. пром-сть. 1967. № 9. С. 12-14.

<sup>4</sup> Серговский, П. С. Расчет процессов высыхания и увлажнения древесины. – М. : Гослесбумиздат, 1952. – 75 с.

тура. При повышении температуры влагопроводность древесины существенно возрастает. Перенос влаги в древесине ниже точки насыщения волокон является сложным процессом и зависит от изменчивости микро- и макроскопических свойств древесины [8].

Исследованием влагопроводности древесины занимались ученые в разное время. Большое количество исследований выполнено во второй половине 20 века. Вопросам влагопроводности древесины сосны посвящены исследования, выполненные Мартлеем Д.Ф. и Эгнером. Вполне достоверными можно считать данные, полученные Арциховской Н.В., Алпаткиной Р.П., Лыковым А.В. Серговским П.С. и др. Полученные этими учеными численные значения коэффициента влагопроводности подтверждают теоретическое предположение о том, что коэффициент влагопроводности в области ниже точки насыщения волокна изменяется с изменением влажности весьма незначительно и может приниматься постоянным при неизменной температуре [8].

В последнее время в научной литературе большое внимание уделяют вопросам моделирования процессов диффузии влаги в древесине. К настоящему времени разработано множество теоретических моделей сушки древесины и других спецификаций, связанных с этим процессом [9, 10, 11]. В основе моделирования процессов переноса влаги в древесине ниже точки насыщения волокон используют первый закон Фика для стационарных процессов диффузии и второй закон Фика для описания переходных процессов в древесине, при получении универсальной модели процессов переноса влаги в древесине ниже точки насыщения волокон [12]. Существующие модели диффузии влаги в древесине построены на определенных допущениях, которые с большой долей приближения учитывают микро- или макроструктуру древесины и основаны на «элементарной ячейке» трахеиды, связывают коэффициентом диффузии с макроскопической структурой и плотностью древесины, её температурой и содержанием влаги и др. [13, 14, 17, 18].

Имеются сведения по применению технических средств для ускорения определения величины перепада влажности по толщине образцов при определении величины коэффициента влагопроводности.

В работе [15] распределение послойной влажности в древесине определялись в процессе сушки методом рентгенокопии. Однако полученные данные позволили рассчитать лишь средние значения коэффициентов влагопроводности в радиальном направлении. Для практики важны значения влагопроводности древесины в радиальном и тангенциальном направлениях, Исследование тока влаги вдоль волокон древесины важны при построении режимов сушки для небольших деталей и заготовок [14, 16].

Точность моделей, описывающих диффузию влаги в древесине, во многом зависит от границ принятых допущений рассматриваемых критериев. Принятая во многих моделях «элементарная ячейка» не в полной мере отражает разнообразие микроструктуры и особенностей анатомических элементов в древесине их размеры и количественное соотношение. Принятые допущения недостаточны для описания процесса влагопроводности в древесине сосны, имеющей наиболее простое и упорядоченное строение. Ни одна из известных моделей не учитывает наличие пороков строения древесины, условия произрастания и другие не менее значимые факторы, влияющие на движение диффузной влаги в древесине.

Воздействие высокой температуры пожара оказывает воздействие на микро и макроструктуру древесины и её физико-механические свойства. Происходит нарушение целостности древесины, разрушение структуры анатомических элементов. В результате этого внешнего воздействия температуры в древесине активно протекают процессы смолообразования. Степень и характер этих разрушений, а также интенсивность протекания процесса засмоления древесины весьма затруднительно описать даже с учетом различных допущений. Стоит отметить, что применяемое в моделях допущение структуры древесины как «элементарная ячейка» не учитывает в полном объеме особенности микроструктуры и анизотропии строения даже у неповрежденной древесины. Поэтому задача получения универсальной модели, описывающей процесс перемещения диффузной влаги в древесине, даже для одной группы пород представляется крайне сложной.

Наиболее простым решением задачи определения величины коэффициента влагопроводности

древесины, поврежденной пожаром, является экспериментальный метод стационарного тока влаги. Сведения о влагопроводности древесины сосны, поврежденной пожаром, отсутствуют в технической литературе. В связи с чем, целью данного исследования является установление величины коэффициента влагопроводности ядровой древесины сосны, поврежденной низовым пожаром.

### Материалы и методы

#### Объект и предмет исследования

Исследование 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, не поврежденные пожаром, и поврежденные сильным низовым и беглым верховым пожаром.

Предмет исследования составил коэффициент влагопроводности образцов из поврежденной пожаром и неповрежденной древесины *P. sylvestris* в тангенциальном и радиальном направлениях.

#### Дизайн эксперимента

Из свежесрубленной древесины ствола были выпилены диски толщиной 60 мм на высоте ствола 1,3 м. Затем из каждого диска были выпилены образцы размером 30×30×30 мм и высушены до абсолютно сухого состояния. Схема мест выпилки образцов из диска представлена на рис. 2.

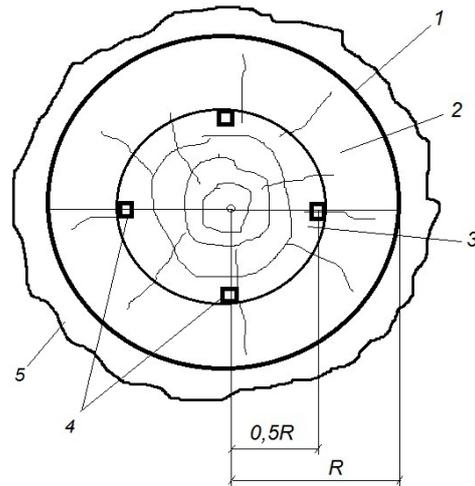


Рисунок 2. Схема выпилки образцов:

- 1) камбий; 2) заболонь; 3) ядро; 4) места отбора образцов; 5) кора

Figure 2. Sample sawing scheme:

- 1) cambium; 2) sapwood; 3) core; 4) sampling sites; 5) bark

Источник: собственная композиция авторов

Source: authors' own photo

Размеры образцов измеряли штангенциркулем с погрешностью  $\pm 0,05$  мм. Коэффициент влагопроводности был определен методом стационарного тока влаги ядровой древесины в радиальном и тангенциальном направлениях по методике разработанной В.Н. Арциховской<sup>5</sup>. Схема установки представлена на рис. 3.

<sup>5</sup> Арциховская, Н. В. Исследование влагопроводности древесины / Н. В. Арциховская // Труды института леса. – М. : Изд-во АН СССР, 1957. – Т. 9. – С. 127-157

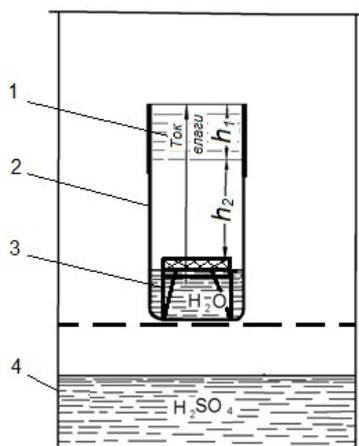


Рисунок 3. Схема установки для определения коэффициента влагопроводности древесины методом стационарного тока влаги:

- 1) образец древесины; 2) бюкса с образцом;
- 3) марля на треноге из проволоки; 4) эксикатор с серной кислотой;  $h_1$ ) толщина образца;  $h_2$ ) расстояние от марли до поверхности образца

Figure 3. Installation diagram for determining the moisture conductivity coefficient of wood by the method of stationary moisture current:

- 1) a sample of wood; 2) a bux with a sample;
- 3) gauze on a wire frame; 4) a desiccator with sulfuric acid;  $h_1$ ) the thickness of the sample;  $h_2$ ) the distance from the gauze to the surface of the sample

Источник: Арциховская, Н. В. Исследование влагопроводности древесины / Н. В. Арциховская // Труды института леса. – М. : Изд-во АН СССР, 1957. – Т. 9. – С. 127-157

Source: Artsikhovskaya, N. V. Investigation of moisture pipeline-wood news / N. V. Artsikhovskaya // Proceedings of the Forest Institute. – M. : Publishing House of the USSR Academy of Sciences, 1957. – Vol. 9. – pp. 127-157

Боковые стенки образцов изолировали от окружающей среды (рис. 4). Это обеспечивало направленный ток влаги в образцах. После этого каждый образец закрепляли в стеклянном стакане, на дно которых была налита дистиллированная вода. Обеспечение постоянного давления водяного пара у нижней части образца возможно за счет поддержания постоянного расстояния между нижней частью образца древесины и уровнем поверхности, испаряющей влагу.



Рисунок 4. Внешний вид образца древесины в стакане

Figure 4. Appearance of a sample of wood in a glass

Источник: собственные фото авторов

Source: authors' own photos

В эксперименте это было достигнуто установкой треноги из медной проволоки диаметром 0,8 мм поверх которой размещена марля в четыре слоя. Затем стаканы с образцами помещали в эксикаторы, на дно которых была налита серная кислота. Серная кислота обеспечивала в эксикаторе влажность воздуха, близкую к абсолютно сухому состоянию. Один из эксикаторов был помещен в шкаф при температуре 20 °С, а другой в шкаф при температуре 60 °С.

В результате разности парциальных давлений пара в стаканчике и эксикаторе через образец происходит движение влаги. Каждые 24 часа производили контроль количества влаги, прошедшей через образцы путем их взвешивания. Прошедшую через образцы влагу поглощала серная кислота. По мере поглощения влаги концентрация серной кислоты в эксикаторах понижалась. По мере необходимости производили замену серной кислоты в эксикаторах. После установления постоянной убыли влаги через образцы их извлекали из эксикатора и раскалывали на пластины. Затем измеряли толщину каждой пластины штангенциркулем, взвешивали и определяли влажность каждой из них весовым методом. Градиент влажности  $du/dx$  определяли графическим методом.

## Анализ данных

Численные значения коэффициента влагопроводности  $D$ ,  $\text{м}^2/\text{с}$  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,  $\text{м}^2$ ;

$\rho_o$  – плотность древесины в абсолютно сухом состоянии,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;

$du/dx$  – градиент влажности,  $\text{м}^{-1}$ .

## Результаты

На рис. 5-8 представлены значения величины коэффициента влагопроводности образцов древесины сосны, в радиальном и тангенциальном направлениях тока влаги, в зависимости от её влажности.

Величина коэффициента влагопроводности в радиальном направлении при температуре  $20\text{ }^\circ\text{C}$  (рис. 5) у древесины сосны, поврежденной пожаром в интервале влажности от 6 % до 17 % изменяется незначительно в пределах  $1,8\text{-}2,1 \cdot 10^{-10}\text{ м}^2/\text{с}$ . При сни-

жении влажности менее 6 % отмечается резкое повышение коэффициента влагопроводности. Наибольшей величины коэффициент влагопроводности достигает  $3,0 \cdot 10^{-10}\text{ м}^2/\text{с}$  при влажности 3,5-4,0 %. Максимальная величина гигроскопической влаги в древесине не превышает 17 %. Величина коэффициента влагопроводности у неповрежденной древесины изменяется в диапазоне от  $2,9 \cdot 10^{-10}\text{ м}^2/\text{с}$  до  $3,5 \cdot 10^{-10}\text{ м}^2/\text{с}$ . Максимальная величина гигроскопической влаги в древесине не превышает 22 %.

Величина коэффициента влагопроводности в тангенциальном направлении при температуре  $20\text{ }^\circ\text{C}$  (рис. 6) у древесины сосны, поврежденной пожаром в интервале влажности от 12 % до 18 % изменяется незначительно в пределах  $1,8\text{-}2,0 \cdot 10^{-10}\text{ м}^2/\text{с}$ . В интервале влажности древесины от 3 % до 12 % отмечается резкое повышение коэффициента влагопроводности, в среднем на 75 % достигает наибольшей величины  $3,0 \cdot 10^{-10}\text{ м}^2/\text{с}$  при влажности 6,0 %. Максимальная послойная влажность древесины не превышает 18 %. Величина коэффициента влагопроводности у неповрежденной древесины в тангенциальном направлении изменяется в диапазоне от  $0,25 \cdot 10^{-10}\text{ м}^2/\text{с}$  до  $1,0 \cdot 10^{-10}\text{ м}^2/\text{с}$ . Максимальная величина гигроскопической влаги в древесине не превышает 24 %.

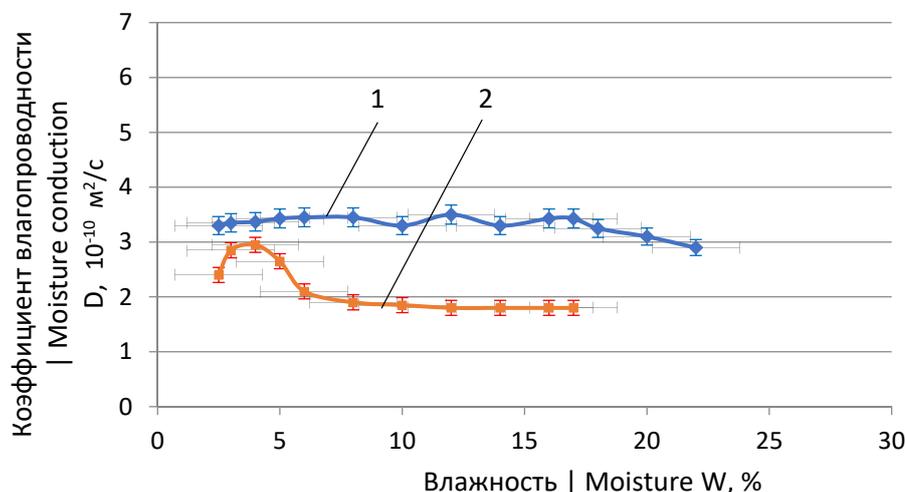


Рисунок 5. Коэффициент влагопроводности древесины сосны в радиальном направлении из комлевой части ствола, в зависимости от влажности при температуре  $20\text{ }^\circ\text{C}$

1) неповрежденная древесина; 2) древесина, поврежденная пожаром

Figure 5. Coefficient of moisture conductivity of pine wood in the radial direction from the butt part of the trunk, depending on humidity at a temperature of  $20\text{ }^\circ\text{C}$

1) undamaged wood; 2) wood damaged by fire

Источник: собственные результаты авторов

Source: own results

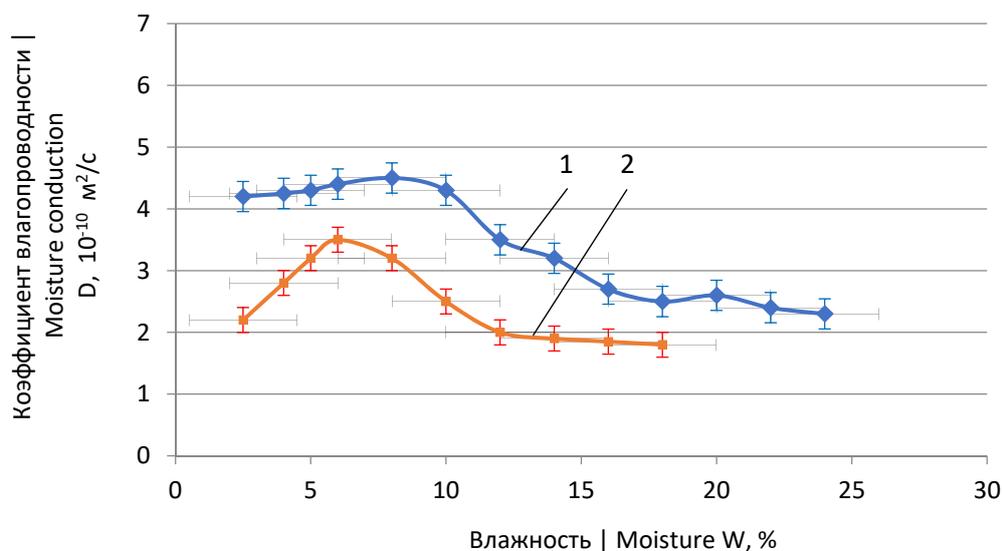


Рисунок 6. Коэффициент влагопроводности древесины сосны в тангенциальном направлении из комлевой части ствола, в зависимости от влажности при температуре 20 °С

1) неповрежденная древесина; 2) древесина, поврежденная пожаром

Figure 6. The coefficient of moisture conductivity of pine wood in the tangential direction from the butt part of the trunk, depending on humidity at a temperature of 20 °С

1) intact wood; 2) wood damaged by fire

Источник: собственные результаты авторов

Source: own results

Влагопроводность древесины при повышении температуры существенно возрастает. Коэффициент влагопроводности у неповрежденной древесины сосны в радиальном направлении при температуре 60 °С (рис. 7) с уменьшением влажности повышается с  $4,2 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2/\text{с}$  до  $8,8 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2/\text{с}$ . Незначительное снижение величины влагопроводности древесины отмечено при влажности около 8 %. Максимальная послойная влажность древесины не превышает 16 %. Величина коэффициента влагопроводности у неповрежденной древесины в радиальном направлении при температуре 60 °С с уменьшением влажности возрастает с  $5,5 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2/\text{с}$  до  $13,5 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2/\text{с}$ . Максимальная величина гигроскопической влаги в древесине не превышает 22 %.

Коэффициент влагопроводности у неповрежденной древесины сосны в тангенциальном направлении при температуре 60 °С (рис. 8) с уменьшением влажности повышается с  $4,4 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2/\text{с}$  до  $8,8 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2/\text{с}$ . Незначительное снижение величины влагопроводности древесины отмечено при влажности около менее 4 %. Максимальная послойная влажность древесины не превышает 16 %. Величина коэффициента влагопроводности у неповрежденной древесины в радиальном направлении при температуре 60 °С с уменьшением влажности возрастает с  $4,2 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2/\text{с}$  до  $12,5 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2/\text{с}$ . Незначительное повышение величины коэффициента влагопроводности отмечается при влажности древесины 10 % и 18 %. Максимальная величина гигроскопической влаги в древесине не превышает 22 %.

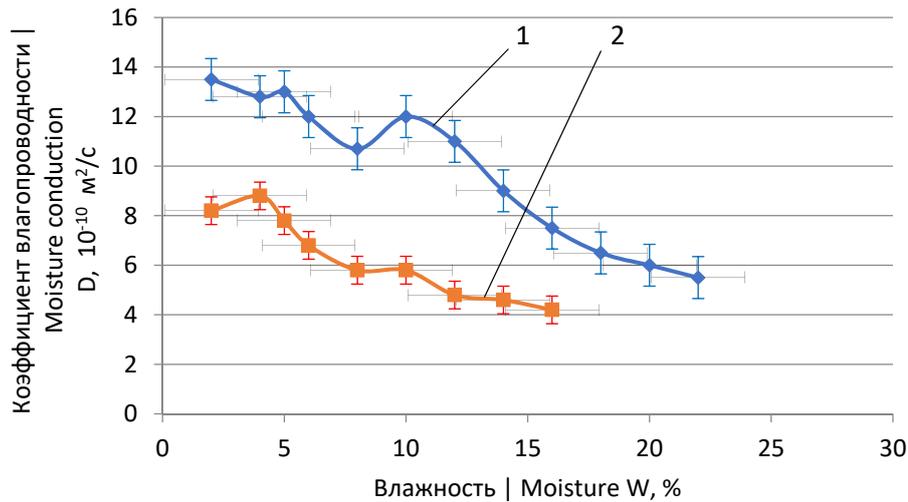


Рисунок 7. Коэффициент влагопроводности древесины сосны в радиальном направлении из комлевой части ствола, в зависимости от влажности при температуре 60 °С

1) неповрежденная древесина; 2) древесина, поврежденная пожаром

Figure 7. Coefficient of moisture conductivity of pine wood in the radial direction from the left side of the trunk, depending on humidity at a temperature of 60 °С

1) intact wood; 2) wood damaged by fire

Источник: собственные результаты авторов

Source: own results

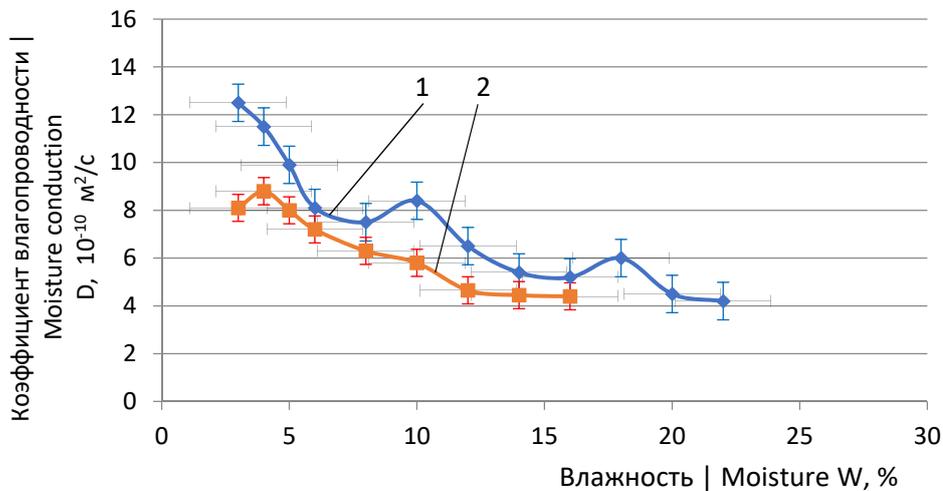


Рисунок 8 – Коэффициент влагопроводности древесины сосны в тангенциальном направлении из комлевой части ствола, в зависимости от влажности при температуре 60 °С

1) неповрежденная древесина; 2) древесина, поврежденная пожаром

Figure 8. Coefficient of moisture conductivity of pine wood in the tangential direction from the butt part of the trunk, depending on humidity at a temperature of 60 °С

1) intact wood; 2) wood damaged by fire

Источник: собственные результаты авторов

Source: own results

Повышение температуры способствует значительному возрастанию величины перепада величины влагопроводности древесины. В радиальном направлении величина перепада коэффициента влагопроводности у древесины, поврежденной пожаром при температуре 20 °С составляет 1,64 раза, а при температуре 60 °С 2,1 раза, соответственно у неповрежденной древесины 1,2 раза и 2,45 раза. В тангенциальном направлении величина перепада коэффициента влагопроводности у древесины, поврежденной пожаром при температуре 20 °С составляет 1,94 раза, а у неповрежденной в 2,0 раза, при температуре 60 °С соответственно у неповрежденной древесины в 2,0 раза и в 2,84 раза.

Коэффициент влагопроводности у неповрежденной древесины сосны в радиальном направлении при температуре 60 °С повышается с уменьшением влажности древесины от  $5,5 \cdot 10^{-10}$  м<sup>2</sup>/с до  $13,5 \cdot 10^{-10}$  м<sup>2</sup>/с. Незначительное снижение величины влагопроводности отмечено при влажности около 8 %.

С повышением температуры у древесины, поврежденной пожаром, величина перепада коэффициента влагопроводности, в зависимости от влажности возрастает незначительно, а у неповрежденной древесины существенно, как в радиальном, так и в тангенциальном направлениях. Закономерности изменения величины коэффициента влагопроводности в зависимости от влажности древесины позволят скорректировать существующие режимы сушки обоснования границы переходной влажности и выбора рациональной влажности древесины, обеспечивающей наибольший ток влаги в древесине.

Большое практическое значение имеет величина средней величины коэффициента влагопроводности при различной температуре. Для древесины сосны, произрастающей в Воронежской области средние значения коэффициента влагопроводности при температуре 20 °С составили в радиальном направлении  $3,4 \cdot 10^{-10}$  м<sup>2</sup>/с, а в тангенциальном 2,97 м<sup>2</sup>/с. При температуре 60 °С - 9,8 м<sup>2</sup>/с и 7,5 м<sup>2</sup>/с соответственно. После воздействия высокой темпера-

туры пожара средняя величина коэффициента влагопроводности уменьшилась в радиальном направлении на 36,2 % до величины  $2,17 \cdot 10^{-10}$  м<sup>2</sup>/с, в тангенциальном на 14,5 % до величины  $6,5 \cdot 10^{-10}$  м<sup>2</sup>/с. При температуре 60 °С снижение составило в радиальном направлении 41,3 % до  $5,75 \cdot 10^{-10}$  м<sup>2</sup>/с, а в тангенциальном на 13,3 %, до 6,5 м<sup>2</sup>/с.

У неповрежденной пожаром древесины величина коэффициента влагопроводности в радиальном направлении выше, чем в тангенциальном. Данное различие обусловлено микроструктурой древесины (рис. 9). В радиальном направлении больший ток влаги происходит за счет сердцевинных лучей, имеющих радиальное расположение в стволе дерева. После воздействия пожара в древесине больший ток влаги, а, следовательно, и величина коэффициента влагопроводности отмечена в тангенциальном направлении. Изменение интенсивности тока влаги произошло вследствие засмоления древесины при воздействии высокой температуры пожара (рис. 9). Наибольшая степень засмоления отмечена в ранней зоне годичного слоя, а также сердцевинных лучей. Засмоление древесины, в том числе и сердцевинных лучей существенно понизило ток влаги в радиальном направлении.

Меньшее снижение тока влаги в тангенциальном направлении обусловлено тем, что при воздействии высокой температуры в древесине произошло повышение давления паровоздушной смеси, в результате чего были разрушены торусы окаймленных пор трахеид. Наибольшее количество окаймленных пор расположено на радиальных стенках трахеид, что и повлияло на повышение тока влаги в тангенциальном направлении.

Для инженерных расчетов значения коэффициента влагопроводности древесины сосны, в зависимости от температуры представлены в виде графиков на рис. 10. В радиальном направлении снижение тока влаги радиальном направлении в древесине, поврежденной пожаром, составило  $40,2 \pm 1,58$  % ( $p < 0,05$ ), а снижение тока влаги в тангенциальном направлении не превышает  $14,5 \pm 0,92$  % ( $p < 0,05$ ).

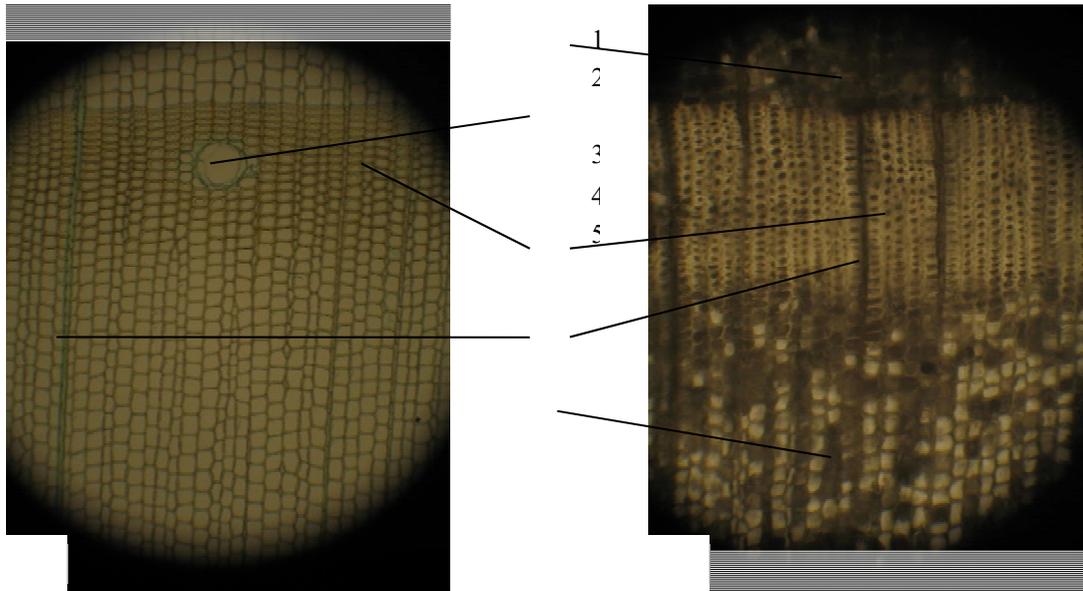


Рисунок 9. Поперечный срез неповрежденной (а) и поврежденной пожаром (б) древесины сосны: 1) ранняя древесина; 2) смоляной ход; 3) поздняя древесина; 4) сердцевинный луч; 5) засмоленная древесина

Figure 9. Cross section of intact (a) and fire-damaged (b) pine wood:

1) early wood; 2) resin stroke; 3) late wood; 4) core beam; 5) tarred wood

Источник: собственные фото авторов

Source: authors' own photos

Анализ результатов исследования коэффициента влагопроводности неповрежденной древесины сосны при температуре 20 °С показывает, что интенсивность перемещения диффузной влаги в радиальном направлении практически не зависит от влажности древесины. В тангенциальном направлении влажность оказывает заметное влияние на интенсивность тока влаги внутри древесины. С уменьшением влажности ток диффузной влаги возрастает. Однако, в среднем, величина влагопроводности древесины в тангенциальном направлении меньше, чем в радиальном. Данное различие тока влаги следует учитывать при атмосферной сушке [22] обрезных пиломатериалов. При сушке пиломатериалов в виде досок будет преобладать ток влаги в радиальном направлении, то есть по их толщине. Поэтому интенсивность высыхания досок будет относительно равномерной. При высушивании пиломатериалов в виде брусков интенсивность высыхания будет в большей степени зависеть от влажности древесины. Большее влияние на скорость тока будет оказывать

передвижение влаги в тангенциальном направлении, особенно при влажности древесины менее 18-20 %.

### Обсуждение

Интенсивность тока влаги у древесины, поврежденной пожаром, меньше, чем у неповрежденной древесины, поэтому продолжительность высыхания этой древесины будет более длительной по времени. Кроме этого, интенсивность тока влаги в тангенциальном направлении выше, чем в радиальном по сравнению с неповрежденной древесиной. Продолжительность сушки пиломатериалов в виде досок из древесины сосны, поврежденной пожаром, будет существенно больше по сравнению с неповрежденной древесиной. Продолжительность сушки пиломатериалов в виде брусков будет меньше, по сравнению с продолжительностью сушки досок. Значительное увеличение интенсивности тока влаги в радиальном направлении у древесины, поврежденной пожаром, отмечено при влажности менее 5 %, а в тангенциальном направлении при влажности менее 8-10 %. При высушивании пиломатериалов в

виде досок, целесообразным будет не понижать влажность древесины на поверхности досок до влажности менее 5 %, а при сушке брусьев менее 8-10 %. Понижение влажности древесины менее указанных величин приведет к возрастанию тока влаги

в поверхностных слоях пиломатериалов, более интенсивному её испарению, возрастанию величины внутренних напряжений и образованию трещин.

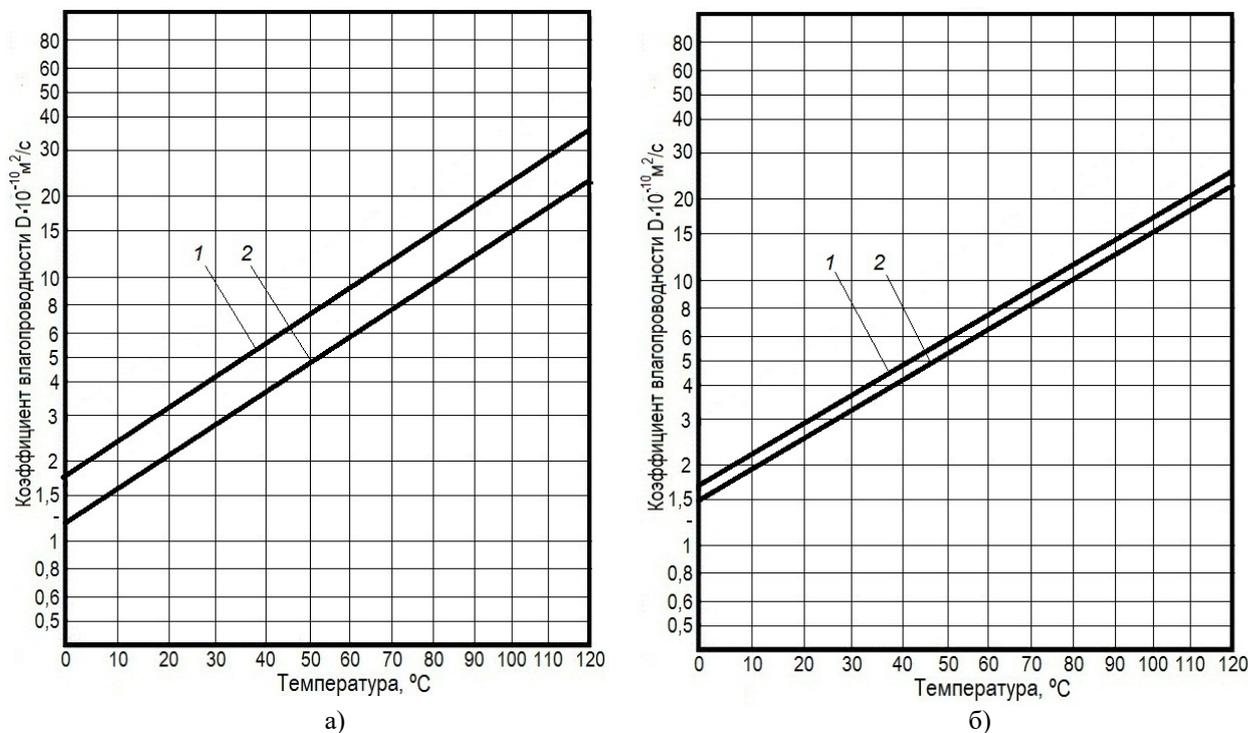


Рисунок 10. Коэффициент влагопроводности древесины сосны в радиальном (а) и тангенциальном (б) направлениях:

1) неповрежденная древесина; 2) древесина, поврежденная пожаром

Figure 10. The coefficient of moisture conductivity of pine wood in the radial (a) and tangential (b) directions:

1) intact wood; 2) wood damaged by fire

Источник: собственные результаты авторов

Source: own results

Анализ результатов исследования коэффициента влагопроводности неповрежденной и поврежденной пожаром древесины сосны при температуре 60 °С показывает, что интенсивность перемещения диффузной влаги как в радиальном, так и тангенциальном направлениях зависит от влажности древесины (рис. 10), по сравнению с температурой среды 20 °С. С уменьшением влажности, когда в древесине начинает преобладать движение влаги в виде пара, отмечается увеличение величины коэффициента влагопроводности древесины сосны.

В процессе камерной сушки у пиломатериалов в виде досок преобладать ток влаги в радиальном направлении, то есть по их толщине, по сравнению с током влаги в тангенциальном направлении – по ширине. При высушивании пиломатериалов в виде досок интенсивность высыхания будет выше, по сравнению с пиломатериалами в виде брусков при равном гидравлическом радиусе у рассматриваемых сортиментов. С уменьшением влажности древесины будет возрастать ток влаги в поверхностных слоях пиломатериалов. Вследствие этого следует ограничивать величину интенсивности испарения

влаги с поверхности древесины и не допускать большого перепада влажности у высушиваемых пиломатериалов.

Значительное увеличение интенсивности тока влаги в радиальном направлении у древесины, поврежденной пожаром при повышении температуры до 60 °С отмечено при влажности древесины менее 8 %, а в тангенциальном направлении при влажности менее 12 %. При высушивании пиломатериалов в виде досок, целесообразным будет не понижать влажность древесины на поверхности досок до влажности менее 5 %, а при сушке брусьев менее 8-10 %. Понижение влажности древесины менее указанных величин приведет к возрастанию тока влаги в поверхностных слоях пиломатериалов, более интенсивному испарению влаги с поверхности древесины, и как следствием этого, к увеличению перепада влажности и образованию больших внутренних напряжений.

### Выводы

Воздействие высокой температуры на древесину понижает её гигроскопические свойства. Величина влагопоглощения снижается на 22-26 %.

У неповрежденной древесины интенсивность тока влаги в радиальном направлении выше, чем тангенциальном. У древесины сосны, поврежденной пожаром, наоборот выше интенсивность тока влаги в тангенциальном направлении. Вследствие засмоленности древесины происходит снижение величины её коэффициента влагопроводности в радиальном направлении в среднем на 40,0 %, в тангенциальном – в среднем на 14,5 % по сравнению с неповрежденной древесиной сосны.

Закономерности изменения величины коэффициента влагопроводности в зависимости от влажности древесины позволят скорректировать существующие режимы сушки и повысить скорость тока влаги в древесине.

### Список литературы

1. Фуряев, И. В. Пожароустойчивость насаждений южно-таежных лесов Западно- Сибирской равнины и средне-Сибирского плоскогорья // *Sciences of Europe*. 2021; 64-3: 26-29. URL: <https://elibrary.ru/MQJAAZ>.
2. Снегирева, С. Н. Влагопоглощение заболонной древесины сосны, поврежденной пожаром / С. Н. Снегирева, А. Д. Платонов, Е. В. Кантиева // *Подготовка кадров в условиях перехода на инновационный путь развития лесного хозяйства*. – Воронеж, 2021: 264-267. – URL: <https://elibrary.ru/FXVJCN>.
3. Снегирева, С.Н. Формирование поздней древесины сосны, поврежденной пожаром / Снегирева С.Н., Платонов А.Д., Кеян Н.Г. // *Разработка энергоресурсосберегающих и экологически безопасных технологий лесопромышленного комплекса*. Воронеж, 2022: 81-84. URL: <https://elibrary.ru/gawptt>.
4. Курьянова, Т.К. и др. Длительность сохранения прочностных свойств древесины, поврежденной пожаром // *Строение, свойства и качество древесины-2014*. М., 2014: 28-29. URL: <https://www.elibrary.ru/trxegz>.
5. Платонов, А. Д. Исследование влагопроводности древесины после химической обработки / А. Д. Платонов, Т. К. Курьянова // *Вестник Московского государственного университета леса - Лесной вестник*. 2005; 2: 56-63. URL: <https://www.elibrary.ru/PGFZUN>.
6. Сотникова, М. А. Разработка методов и процессов обезвоживания древесины и древесных отходов / М. А. Сотникова, В. А. Соколова // *Актуальные проблемы развития лесного комплекса*. Вологда, 2019: 178-181. URL: <https://www.elibrary.ru/IRRYUD>.
7. Определение минимальной высоты источника выбросов из камеры при сушке древесины бука / Ю.С. Михайлова [и др.] // *Лесотехнический журнал*. 2019; 9 (36): 117-125. <https://elibrary.ru/SCFLPI>.
8. Платонов, А.Д. Структура и физико-механические свойства химически обработанной древесины трудносохнущих пород. Воронеж, 2005: 125. <https://elibrary.ru/qnjhbd>.
9. Zhan, T. Moisture diffusion properties of graded hierarchical structure of bamboo: Longitudinal and radial variations / T. Zhan, F. Sun, C. Lyu et al. // *Construction and Building Materials*. 2020; 259: 119641. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119641>.

10. Afshari, Z. Moisture Transport in Laminated Wood and Bamboo Composites Bonded with Thin Adhesive Layers – a Numerical Study / Z. Afshari, S. Malek // SSRN Electronic Journal. – 2022. – DOI: <https://doi.org/10.2139/ssrn.4026076>.
11. A.A. Chiniforusha, H.Valipourb, A.Akbarnezhada. Water vapor diffusivity of engineered wood: Effect of temperature and moisture content. Construction and Building Materials. Volume 224, 10 November 2019, Pages 1040-1055.
12. A K.Hofstetter. Comprehensive model for transient moisture transport in wood below the fiber saturation point: Physical background, implementation and experimental validation. International Journal of Thermal Sciences Volume 50, Issue 10, October 2011, pages 1861-1866
13. J. Eitelberger, K. Hofstetter. 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 Volume 71, Issue 2, 17 January 2011, Pages 145-151.
14. Экспериментальное определение влагопроводности образцов из сосны в продольном направлении при конвективной сушке / Ю. А. Гостеев, Ю. Г. Коробейников, А. В. Федоров, В. М. Фомин / Прикладная механика и техническая физика. 2003; 44 (3): 117-123. URL: <https://www.elibrary.ru/ooaqih>.
15. Определение коэффициента влагопроводности при низкотемпературной сушке древесины / И.В. Сапожников [и др.] // Лесной вестник. Forestry Bulletin. - 2016. - № 4. - С. 34-39. - URL: <https://www.elibrary.ru/wrjtcf>.
16. Рудак, А.Г. Исследование влагопроводности древесины сосны в различных структурных направлениях / А.Г. Рудак, Б.В. Снопков / Труды БГТУ. № 2. Лесная и деревообрабатывающая промышленность.- 2010. - № 2. - С. 180-183. <https://www.elibrary.ru/vbfmyl>.
17. Гороховский, А. Г. Конвективная сушка пиломатериалов на основе управляемого влагообмена / А. Г. Гороховский, Е. Е. Шишкина, А. С. Агафонов // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. – 2022. – № 1(385). – С. 166-172. – DOI 10.37482/0536-1036-2022-1-166-172. <https://elibrary.ru/EUPCCA>.
18. Зарипов, Ш. Г. О влагообменных процессах при конвективной сушке в камерах периодического действия лиственных пиломатериалов / Ш. Г. Зарипов, В. А. Корниенко // Хвойные boreальной зоны. – 2021. – Т. 39, № 1. – С. 60-65. <https://elibrary.ru/mjhhvp>.
19. Влагопроводность древесины яблони / А. Д. Платонов, С. И. Волошин, С. Н. Снегирева [и др.] // Лесотехнический журнал. 2018; 8(32): 181-187. <https://elibrary.ru/vogoro>.
20. Platonov, A.D. Wood Quality along the Trunk Height of Birch and Aspen Growing in the Restoring Forests of Central Russia / A.D. Platonov, S.N. Snegireva, M. V. Drapalyuk et al. // Forests. 2022; 13 (11): 1758. – DOI: <https://doi.org/10.3390/f13111758>.
21. Скуратов, Н. В. Паропроницаемость и влагопроводность термически модифицированной древесины ясеня / Н. В. Скуратов, Д. В. Усов, И. Г. Сергеев. Красноярск: ООО "Научно-инновационный центр", 2022: 113-115. <https://elibrary.ru/njkcdj>.
22. Влагопроводность древесины сосны, поврежденной пожаром, при атмосферной сушке / А. Д. Платонов, С. Н. Снегирева, Е. В. Кантиева [и др.] // Перспективные ресурсосберегающие технологии развития лесопромышленного комплекса. Воронеж, 2023: 126-129. – [https://doi.org/10.58168/R-STDTIC2023\\_126-129](https://doi.org/10.58168/R-STDTIC2023_126-129). <https://elibrary.ru/DEFNQF>.
23. Динамика напочвенного покрова в биотопах сосновых лесов при фрагментации, вызванной пожарами, в условиях лесостепной зоны / В. Т. Попова, А. А. Попова, А. К. Кондратьева [и др.] // Лесотехнический журнал. – 2023. – Т. 13, № 1(49). – С. 37-53. – DOI 10.34220/issn.2222-7962/2023.1/3. – <https://elibrary.ru/IJDFW>.
24. Прогнозная модель послепожарного лесовосстановления в Иркутской области / О. И. Григорьева, О. И. Гринько, И. В. Григорьев [и др.] // Лесотехнический журнал. – 2023. – Т. 13, № 1(49). – С. 85-98. – DOI 10.34220/issn.2222-7962/2023.1/6. – <https://elibrary.ru/TLMULF>.
25. Kotelnikov, P. Application of the Benford law in assessment of wildfire data accuracy / P. Kotelnikov, A. Martynyuk // Forestry Engineering Journal. – 2018. – Vol. 8. – № 1. – P. 30-36. – DOI: [https://doi.org/10.12737/article\\_5ab0dfbb946859.24647128](https://doi.org/10.12737/article_5ab0dfbb946859.24647128).

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

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

28. Kendell, A. Wildfires: Introduction, Impact, Policy, and Planning / A. Kendell, A. Galloway, C. Milligan // *The Path of Flames: Understanding and Responding to Fatal Wildfires*. – Boca Raton : CRC Press, 2023. – P. 3-18. – DOI: <https://doi.org/10.4324/9781003168010-2>.

29. Erni, S. Stand Age Influence on Potential Wildfire Ignition and Spread in the Boreal Forest of Northeastern Canada / S. Erni, D. Arseneault, M.A. Parisien // *Ecosystems*. – 2018. – Vol. 21. – № 7. – P. 1471-1486. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s10021-018-0235-3>.

30. Bryukhanov, A. V. Wildfire Impact on the Main Tree Species of the Near-Yenisei Siberia / A. V. Bryukhanov, A. V. Panov, E.I. Ponomarev, N. V. Sidenko // *Izvestiya - Atmospheric and Ocean Physics*. – 2018. – Vol. 54. – № 11. – P. 1525-1533. – DOI: <https://doi.org/10.1134/S0001433818110026>.

31. Goreshev, M.A. Determination of the Coefficient of Thermal and Moisture Conductivity of Wood by the Transient Moisture Current Method / M.A. Goreshev, F.G. Sekisov, O. V. Smerdov // *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. – 2018. – Vol. 91. – № 3. – P. 827-830. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s10891-018-1805-0>.

### References

1. Furyaev, I. V. Fire resistance of plantations of southern taiga forests of the West Siberian plain and the Central Siberian plateau // *Sciences of Europe*. 2021; 64-3: 26-29. URL: <https://elibrary.ru/MQJAAZ>.

2. Snegireva, S. N. Moisture absorption of sapwood pine damaged by fire / S. N. Snegireva, A.D. Platonov, E. V. Kantieva // *Personnel training in conditions of transition to an innovative way of forestry development*. – Voronezh

3. Snegireva, S.N. Formation of late pine wood damaged by fire / Snegireva S.N., Platonov A.D., Keyan N.G. // *In the collection: Development of energy-saving and environmentally safe technologies of the timber industry: materials of the International Scientific Conference of Scientists and students*. Editor S.N. Snegireva. - Voronezh, 2022. - pp. 81-84. Bibliogr.: p. 84. URL: <https://elibrary.ru/gawptt>

4. Kuryanova, T.K. Duration of preservation of strength properties of wood damaged by fire / T.K. Kuryanova, A.D. Platonov // *In the book: Structure, properties and quality of wood - 2014. Abstracts of the 5th RKSD International Symposium*. Moscow State University of Forest. - 2014. - pp. 28-29. Bibliogr.: p. 29.

5. Platonov, A.D. Investigation of moisture conductivity of wood after chemical treatment / A.D. Platonov, T. K. Kuryanova // *Bulletin of the Moscow State University of the Forest - Forest Bulletin* 2005; 2: 56-63. URL: <https://www.elibrary.ru/PGEFZUN>.

6. Sotnikova, M. A. Development of methods and processes for dewatering wood and wood waste / M. A. Sotnikova, V. A. Sokolova // *Actual problems of the development of the forest complex*. Vologda, 2019: 178-181. URL: <https://www.elibrary.ru/IRRYUD>.

7. Determination of the minimum height of the emission source from the chamber during drying of beech wood / Y.S. Mikhailova [et al.] // *Forestry Engineering Journal*. 2019; 9 (36): 117-125. <https://elibrary.ru/SCFLPI>.

8. Platonov, A.D. Structure and physico-mechanical properties of chemically treated wood of hard-drying rocks: monogr. / A.D. Platonov : Voronezh State Forestry Academy. – Voronezh : Voronezh State University, 2005. - 125 p. Bibliogr.: pp. 116-123. – ISBN 5-9273-0854-6

9. Tianyi Zhana, Fengze Suna, Chao Lyua, Qian Hea, Kang Xub, Yaoli Zhanga, Liping Caiac, Zhenhua Huangc, Jianxiong Lyub. Moisture diffusion properties of graded hierarchical structure of bamboo: Longitudinal and radial variations. *Construction and Building Materials*. Volume 259, 30 October 2020, 119641.

10. Zahra Afsharia, Sardar Malekab. Moisture transport in laminated wood and bamboo composites bonded with thin adhesive layers – A numerical study. *Construction and Building Materials*. Volume 340, 18 July 2022, 127597.

11. A.A.Chiniforusha, H.Valipourb, A.Akbarnezhada. Water vapor diffusivity of engineered wood: Effect of temperature and moisture content. *Construction and Building Materials*. Volume 224, 10 November 2019, Pages 1040-1055.
12. A.K.Hofstetter. Comprehensive model for transient moisture transport in wood below the fiber saturation point: Physical background, implementation and experimental validation. *International Journal of Thermal Sciences* Volume 50, Issue 10, October 2011, pages 1861-1866
13. J. Eitelberger, K. Hofstetter. 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* Volume 71, Issue 2, 17 January 2011, Pages 145-151.
14. Experimental determination of moisture conductivity of pine samples in the longitudinal direction during convective drying / Yu. A. Gosteev, Yu. G. Korobeynikov, A.V. Fedorov, V. M. Fomin / *Applied Mechanics and technical physics*. - 2003. - vol. 44, No. 3. - pp. 117-123. Bibliogr.: p. 123.
15. Determination of the coefficient of moisture conductivity during low-temperature drying of wood / I.V. Sapozhnikov [et al.] // *Lesnoy vestnik. Forestry Bulletin*. - 2016. - No. 4. - pp. 34-39. - URL: <https://rucont.ru/efd/480254>. Bibliogr.: p. 39.
16. Rudak, A.G. Investigation of moisture conductivity of pine wood in various structural directions / A.G. Rudak, B.V. Snopkov / *Proceedings of BSTU*. No. 2. Forestry and woodworking industry.- 2010. - No. 2. - pp. 180-183. Bibliogr.: p. 183.
17. Gorokhovskiy, A. G. Convective drying of lumber based on controlled moisture exchange / A. G. Gorokhovskiy, E. E. Shishkina, A. S. Agafonov // *Izvestia of higher educational institutions. Forest Journal*. – 2022. – № 1(385). – С. 166-172. – DOI 10.37482/0536-1036-2022-1-166-172. <https://elibrary.ru/EUPCCA>.
18. Zaripov, Sh. G. On moisture exchange processes during convective drying in batch chambers of larch lumber / Sh. G. Zaripov, V. A. Kornienko // *Coniferous boreal zones*. – 2021; 39 (1): 60-65. <https://elibrary.ru/mjhvp>.
19. 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; 8(32): 181-187. <https://elibrary.ru/vogopo>.
20. Platonov, A.D. Wood Quality along the Trunk Height of Birch and Aspen Growing in the Restoring Forests of Central Russia / A.D. Platonov, S.N. Snegireva, M. V. Drapalyuk et al. // *Forests*. 2022; 13 (11): 1758. – DOI: <https://doi.org/10.3390/f13111758>.
21. Skuratov, N. V. Vapor permeability and moisture conductivity of thermally modified ash wood / N. V. Skuratov, D. V. Usov, I. G. Sergeev. *Krasnoyarsk*, 2022: 113-115. <https://elibrary.ru/njkcdj>.
22. Moisture conductivity of pine wood damaged by fire during atmospheric drying / A.D. Platonov, S. N. Snegireva, E. V. Kantieva [et al.] // *Promising resource-saving technologies for the development of the timber industry complex*. Voronezh, 2023: 126-129. [https://doi.org/10.58168/R-STDTIC2023\\_126-129](https://doi.org/10.58168/R-STDTIC2023_126-129). <https://elibrary.ru/DEFNQF>.
23. Dynamics of ground cover in biotopes of pine forests during fragmentation caused by fires in a forest-steppe zone / V. T. Popova, A. A. Popova, A. K. Kondratieva [et al.] // *Forestry Engineering Journal*. – 2023. – V. 13, № 1(49). – P. 37-53. – DOI 10.34220/issn.2222-7962/2023.1/3. <https://elibrary.ru/IJJDFW>.
24. Predictive model of post-fire reforestation in the Irkutsk region / O. I. Grigorieva, O. I. Grinko, I. V. Grigoriev [et al.] // *Forestry Engineering Journal*. – 2023. – V. 13, № 1(49). – P. 85-98. – DOI 10.34220/issn.2222-7962/2023.1/6. – <https://elibrary.ru/TLMULF>.
25. Kotelnikov, P. Application of the Benford law in assessment of wildfire data accuracy / P. Kotelnikov, A. Martynyuk // *Forestry Engineering Journal*. – 2018. – Vol. 8. – № 1. – P. 30-36. – DOI: [https://doi.org/10.12737/article\\_5ab0dfbb946859.24647128](https://doi.org/10.12737/article_5ab0dfbb946859.24647128).
26. Snegireva, S. Variability of the hardness of pine wood damaged by strong grassroots and rampant riding fire / S. Snegireva, A. Platonov, A. Kiseleva, E. Kantieva // *Forestry Engineering Journal*. – 2022. – Vol. 11. – № 4. – P. 79-87. – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2021.4/7>.
27. Tyukavina, O. Heating capability of postpyrogen pine wood / O. Tyukavina, A. Gudina // *Forestry Engineering Journal*. – 2020. – Vol. 10. – № 2. – P. 188-195. – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2020.2/19>.

28. Kendell, A. Wildfires: Introduction, Impact, Policy, and Planning / A. Kendell, A. Galloway, C. Milligan // The Path of Flames: Understanding and Responding to Fatal Wildfires. – Boca Raton : CRC Press, 2023. – P. 3-18. – DOI: <https://doi.org/10.4324/9781003168010-2>.

29. Erni, S. Stand Age Influence on Potential Wildfire Ignition and Spread in the Boreal Forest of Northeastern Canada / S. Erni, D. Arseneault, M.A. Parisien // Ecosystems. – 2018. – Vol. 21. – № 7. – P. 1471-1486. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s10021-018-0235-3>.

30. Bryukhanov, A. V. Wildfire Impact on the Main Tree Species of the Near-Yenisei Siberia / A. V. Bryukhanov, A. V. Panov, E.I. Ponomarev, N. V. Sidenko // Izvestiya - Atmospheric and Ocean Physics. – 2018. – Vol. 54. – № 11. – P. 1525-1533. – DOI: <https://doi.org/10.1134/S0001433818110026>.

31. Goreshev, M.A. Determination of the Coefficient of Thermal and Moisture Conductivity of Wood by the Transient Moisture Current Method / M.A. Goreshev, F.G. Sekisov, O. V. Smerdov // Journal of Engineering Physics and Thermophysics.0 – 2018. – Vol. 91. – № 3. – P. 827-830. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s10891-018-1805-0>.

### Сведения об авторах

✉ *Платонов Алексей Дмитриевич* – доктор техн. наук, заведующий кафедрой древесиноведения ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5941-6287>, e-mail: [aleksey66@yandex.ru](mailto:aleksey66@yandex.ru).

*Снегирева Светлана Николаевна* – кандидат биол. наук, доцент кафедры древесиноведения ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-4371-2270>, e-mail: [svetka-sneg@yandex.ru](mailto:svetka-sneg@yandex.ru).

*Кантиева Екатерина Валентиновна* – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой механической технологии древесины ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8352-1941>, [ekantieva@mail.ru](mailto:ekantieva@mail.ru)

*Киселёва Александра Владимировна* – канд. техн. наук, доцент кафедры древесиноведения, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, 394087, Российская Федерация, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5960-6133>, e-mail: [avk50@yandex.ru](mailto:avk50@yandex.ru).

### Information about the authors

✉ *Aleksey D. Platonov* – Dr. Sci. (Engineering), Head of the Chair of Wood Science, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazeva st., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5941-6287>, e-mail: [aleksey66@yandex.ru](mailto:aleksey66@yandex.ru).

*Svetlana N. Snegireva* – Cand. Sci. (Biology), Associate Professor of the Chair of Wood Science, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazeva st., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-4371-2270>, e-mail: [svetka-sneg@yandex.ru](mailto:svetka-sneg@yandex.ru).

*Ekaterina V. Kantieva* – Candidate of Technical Sciences, associate professor of department of mechanical technology of wood, Voronezh State University of Forestry and Technologies name after G.F. Morozov, Timiryazeva st., 8, Voronezh, 394087, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8352-1941>, [ekantieva@mail.ru](mailto:ekantieva@mail.ru)

*Aleksandra V. Kiseleva* – Ph.D. tech. Sciences, Associate Professor of department of wood science, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazeva st., 8, Voronezh, 394087, Russian Federation, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5960-6133>, e-mail: [avk50@yandex.ru](mailto:avk50@yandex.ru).

✉ – Для контактов/Corresponding author