

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

CONSTRUCTION MATERIALS AND PRODUCTS

Вестник Томского государственного
архитектурно-строительного университета.
2025. Т. 27. № 5. С. 220–233.

ISSN 1607-1859 (для печатной версии)
ISSN 2310-0044 (для электронной версии)

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo
arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta –
Journal of Construction and Architecture.
2025; 27 (5): 220–233.
Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 674.02:533.924

DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-5-220-233

EDN: RVVWRR

СВОЙСТВА ПОВЕРХНОСТИ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ ИЗ ДРЕВЕСИНЫ СОСНЫ, ОБРАБОТАННОЙ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМОЙ

Геннадий Георгиевич Волокитин¹, Виктор Данилович Гольдин²,
Владимир Алексеевич Черемных¹, Николай Александрович Цветков¹

¹Томский государственный архитектурно-строительный университет,
г. Томск, Россия

²Национальный исследовательский

Томский государственный университет, г. Томск, Россия

Аннотация. Актуальность. Одним из ключевых критериев для применения древесины в строительстве является ее стойкость к воздействию неблагоприятных факторов. Чаще всего защиту древесины обеспечивают с помощью специальных пропиток или покрытий, однако их эффективность ограничена сроком службы и эксплуатационными условиями. В качестве альтернативного варианта предлагается рассмотреть обработку поверхности древесины низкотемпературной плазмой. Для расширения области применения и спектра обрабатываемой продукции необходимо установить возможность управления свойствами поверхности строительных изделий из древесины в процессе плазменной обработки. Для решения данной задачи требуется определить влияние параметров обработки на свойства поверхности древесины.

Целью работы является определение свойств поверхности строительных материалов из древесины сосны в зависимости от параметров плазменной обработки.

Результаты. По результатам теоретических расчетов установлено, что величина удельного теплового потока и скорость обработки влияют на глубину обработки строительных материалов из древесины, что может оказывать влияние на свойства поверхности. В результате экспериментальных исследований определено, что при повышении глубины обработки снижается водопроницаемость и повышается биостойкость древесины.

Так, при величине удельного теплового потока $1,2 \cdot 10^6$ Вт/м² и скорости обработки 12 см/с водопроницаемость образцов составляет $(2,8 \pm 0,1)$ см³/ч, биостойкость – 4 балла, а при снижении скорости обработки (увеличении времени воздействия) до 3 см/с при прочих неизменных параметрах водопроницаемость равна $(1,5 \pm 0,1)$ см³/ч, а биостойкость – 1 балл. Полученные результаты отражают возможность управления свойствами поверхности строительных изделий из древесины в процессе плазменной обработки.

Ключевые слова: древесина, плазменная обработка, термодеструкция, тепловой поток, глубина обработки, свойства древесины

Финансирование: работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № FEMN-2023-0003).

Для цитирования: Волокитин Г.Г., Гольдин В.Д., Черемных В.А., Цветков Н.А. Свойства поверхности строительных материалов из древесины сосны, обработанной низкотемпературной плазмой // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2025. Т. 27. № 5. С. 220–233. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-5-220-233. EDN: RVVWRR

ORIGINAL ARTICLE

SURFACE PROPERTIES OF BUILDING MATERIALS MADE OF PINE WOOD TREATED WITH LOW-TEMPERATURE PLASMA

Gennady G. Volokitin¹, Victor D. Goldin²,
Vladimir A. Cheremnykh¹, Nikolay A. Tsvetkov¹

¹Tomsk State University of Architecture and Building, Tomsk, Russia

²National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia

Abstract. Relevance. One of the key criteria for the use of wood in construction is its resistance to adverse factors. Most often, wood protection is provided using special impregnations or coatings, but their effectiveness is limited by their service life and operating conditions. As an alternative, it is proposed to consider the wood surface treatment with low-temperature plasma. In order to expand the scope and range of processed products, it is necessary to provide control for the surface properties of wood construction products in the plasma treatment process. To solve this problem, it is necessary to determine the effect of processing parameters on wood surface properties.

Purpose: The aim of the work is to determine the surface properties of pine wood construction materials depending on the parameters of plasma treatment.

Research findings: Based on the results of theoretical calculations, it is found that the specific heat flow and processing speed affect the processing depth of building materials made of wood, which can affect the surface properties. According to tests, water permeability decreases and bio-resistance of wood grows with increasing processing depth. Thus, with a specific heat flux of $1.2 \cdot 10^6$ W/m² and processing speed of 12 cm/s, the water permeability of the samples is 2.8 ± 0.1 cm³/h, bio-resistance is 4 points, while at the processing speed (longer exposure time) reduced to 3 cm/s other constant parameters being constant, the water permeability is 1.5 ± 0.1 cm³/h, and the bio-resistance is 1 point.

Value: The results obtained reflect the possibility of control for surface properties of wood construction products during plasma treatment.

Keywords: wood, plasma treatment, thermal degradation, heat flow, processing depth, wood properties

Funding: This work was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Project No. FEMN-2023-0003).

For citation: Volokitin G.G., Goldin V.D., Cheremnykh V.A., Tsvetkov N.A. Surface Properties of Building Materials made of Pine Wood Treated with Low-Temperature Plasma. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2025; 27 (5): 220–233. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-5-220-233. EDN: RVVWRR

Введение

На протяжении долгих лет древесина остается востребованным строительным материалом [1]. Наибольшим спросом пользуются строительные изделия из древесины хвойных пород. Прочность, сравнительно небольшая масса, экологичность, простота обработки, возобновляемость материала – факторы, определяющие популярность древесины в строительстве [2]. Важным параметром строительных изделий, в том числе и из древесины, является их долговечность. Древесина как органический материал склонна к изменению эксплуатационных свойств под действием неблагоприятных внешних факторов [3]. Поэтому с целью обеспечения долговечности строительных изделий из древесины необходимо предусмотреть их защиту от внешних факторов [4].

На практике для повышения стойкости древесины к неблагоприятным воздействиям применяются различные защитные пропиточные составы и лакокрасочные покрытия. В качестве одного из инновационных и перспективных методов защиты предлагается рассмотреть обработку потоком низкотемпературной плазмы. Благодаря такой обработке в приповерхностной области древесины формируется слой, отличающийся водоотталкивающими и биозащитными свойствами, при этом не влияющий на механические характеристики изделий [5].

Однако для внедрения данного метода защиты древесины необходимо предусмотреть возможность регулирования свойств конечных изделий, поскольку такая возможность позволит расширить область применения обработанных изделий.

Целью настоящей работы является определение свойств поверхности строительных материалов из древесины сосны в зависимости от параметров плазменной обработки.

Материалы и методы

При термическом воздействии на древесину протекает ряд связанных друг с другом физико-химических процессов. Как правило, эти процессы представляют в виде нескольких стадий. На первой стадии происходит испарение легколетучих веществ, например воды. Следующая стадия – термохимическое разложение веществ, составляющих древесину, так называемый пиролиз. Пиролиз протекает с выделением газообразных продуктов и образованием углеродного остатка – коксика. На завершающем этапе происходит разложение коксика с образованием летучих соединений и минерального остатка – золы [6–8]. Результатом данных процессов является снижение плотности древесины и изменение ее теплофизических свойств.

Необходимо подчеркнуть, что пиролиз протекает преимущественно во внутренних слоях древесины, за счет ограниченного доступа кислорода, в то время как на поверхности древесины происходят окислительные процессы (горение) продуктов пиролиза, мигрирующих из внутренних слоев наружу за счет пористой структуры древесины. Все процессы сопровождаются эндотермическими и экзотермическими реакциями.

В работе [8] на основе термогравиметрических исследований разработана модель термического разложения древесины, подвергаемой воздействию высокотемпературного плазменного потока. В рамках этой модели сложные физико-химические процессы, происходящие при нагреве материала, сведены к четырем основным стадиям, каждая из которых характеризуется скоростью реакции, описываемой законом Аррениуса. Кинетические параметры для каждой стадии были определены экспериментально посредством анализа изменения массы твердого остатка при динамическом нагреве образцов в инертной атмосфере. При этом установлено, что полученные параметры остаются стабильными и не зависят от скорости нагрева в диапазоне 10–20 градусов в минуту.

При математическом моделировании термической обработки древесины рассматривается обтекание деревянной доски вертикальной струей плазмы; при этом ось струи параллельна поверхности обрабатываемой доски и перемещается с постоянной скоростью вдоль ее длины. Предполагается, что термодинамические параметры струи и поле температуры в древесине не меняются по ширине доски.

Для описания теплового поля внутри древесины используется математическая модель пористого реагирующего тела [9, 10], в которой температура определяется из уравнения

$$\rho_s c_{eff} \frac{\partial T}{\partial t} + G_g c_{pg} \frac{\partial T}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_{eff} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_{eff} \frac{\partial T}{\partial y} \right) + Q_s, \quad (1)$$

где t – время, с; x, y – геометрические координаты, отсчитываемые вдоль и вглубь пластины, м; ρ_s, c_{eff} – плотность твердого каркаса древесины, кг/м³, и его удельная теплоёмкость, Дж/(кг·К); c_{pg}, G_g – средняя удельная теплоемкость газообразных продуктов разложения при постоянном давлении, Дж/(кг·К), и их удельный расход, кг/(м²·с) ($G_g < 0$); T – температура, К; λ_{eff} – эффективный коэффициент теплопроводности материала, Вт/(м·К); Q_s – суммарный тепловой эффект реакций разложения, Вт/м³.

Для вычисления плотности твердого материала используется модель термического разложения из работы [8], в которой рассматривается 4 стадии пиролиза, а твердый материал древесины представляет собой пятикомпонентную смесь: $\rho_s = \sum_{i=1}^5 \rho_i$. Плотность каждого компонента определяется из уравнений,

описывающих кинетику разложения на каждой стадии пиролиза. Значение G_g вычисляется из закона сохранения массы материала:

$$\frac{\partial G_g}{\partial y} = - \frac{\partial \rho_s}{\partial t}. \quad (2)$$

При вычислении теплового эффекта пиролиза приняты следующие допущения. Экзотермический эффект реакций не учитывается, т. к. он наблюдается при температурах, больших 593 К [6], что соответствует 4-й стадии разложения [8], где реакция идет медленно и не успевает проявиться при кратковременном температурном воздействии. Тепловой эффект первой стадии разложения при выделении легко испаряющихся компонентов древесины не учитывается в силу малой их концентрации в сухом материале. В результате в выражении для Q_s остаются только слагаемые, соответствующие второй и третьей стадиям разложения. В настоящей работе для теплового эффекта этих реакций принято $Q = -370$ кДж/кг [6], и для вычисления суммарного теплового эффекта всех реакций используется формула

$$Q_s = Q[(1 - v_2)w_2 + (1 - v_3)w_3], \quad (3)$$

где w_2, w_3 – скорости реакции разложения на 2-й и 3-й стадиях, вычисляемые по формуле Аррениуса [9]; v_2, v_3 – доли твердого остатка, образующегося на этих стадиях.

При решении уравнения (1) используются следующие начальные и граничные условия.

В начальный момент времени задается значение температуры $T_0 = 293$ К, плотность древесины, доля летучих компонентов; плотность компонентов, образующихся при пиролизе, принимается равной 0.

Граничное условие на нагреваемой поверхности в общем случае имеет вид

$$q_{w(x,t)} - \varepsilon_w \sigma T_w^4 - G_{gw}(H_w - h_w) = -\lambda_{eff} \frac{\partial T}{\partial y}, \quad (4)$$

где $q_w(x, t)$ – тепловой поток от пограничного слоя; ε_w – излучательная способность поверхности (степень черноты); σ – постоянная Стефана – Больцмана; H_w – значение удельной энтальпии внешнего газового потока на поверхности тела, Дж/кг; h_w – значение удельной энтальпии газообразных продуктов пиролиза, Дж/кг.

В отсутствии горения и при составе вдуваемых газов, близком к составу набегающего потока, $H_w = h_w$ и соответствующий член в граничном условии исчезает. Однако если на поверхности происходит горение, то эта разность определяется кинетикой химических реакций, их тепловым эффектом, составом газов пиролиза, а также их диффузией в пограничный слой. В настоящей работе диффузия не учитывается, считается, что полное сгорание происходит на поверхности материала, тепловой эффект определяется из условий термодинамического равновесия. При этом предполагается, что продукты пиролиза состоят из углекислого газа (CO_2), угарного газа (CO) и метана (CH_4). Для приведенных в [6, 7] диапазонов возможных концентраций продуктов пиролиза при разных температурах величина $H_w - h_w$ может изменяться в 20 раз – от $0,5 \cdot 10^7$ до 10^8 Дж/кг. Для получения более конкретных значений теплового эффекта требуется существенное усложнение модели. Для предварительных оценок термического режима древесины при обработке ее струей плазмы принято промежуточное значение $H_w - h_w \approx -10^7$ Дж/кг.

Значения теплового потока $q_w(x, t)$ зависят от этапа теплообмена материала с окружающей средой. На этапе взаимодействия струи плазмы с поверхностью используется формула

$$q_w = \left(\frac{\alpha}{c_p} \right)_e (H_e - H_w), \quad (5)$$

где H_e – удельная полная энтальпия струи, определяемая параметрами работы плазмотрона и смешением струи с окружающим воздухом; $(\alpha/c_p)_e$ – коэффициент конвективного теплообмена, $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$. При этом для вычисления $(\alpha/c_p)_e$ используется осредненная по ширине доски формула, полученная для случая продольного обтекания пластины турбулентным потоком воздуха [11]; удельная полная энтальпия струи определяется следующим образом:

$$H_e = H_0 + (H_{e0} - H_0) \exp \left[-A \left(\frac{x - x_*}{\Delta} \right)^2 \right], \quad (6)$$

где H_0 – энтальпия окружающего воздуха; H_{e0} – энтальпия в центре струи, определяемая параметрами на выходе из сопла плазмотрона; Δ – радиус теплового воздействия струи на доску (полуширина теплового пятна); x_* – координата, соответствующая оси струи, которая перемещается вдоль доски со скоростью V : $x_* = x_0 + Vt$, x_0 – начальное значение x_* ; $A = 3$.

Вне теплового пятна струи

$$q_w = \alpha_0 (T_0 - T_w), \quad (7)$$

где T_0 – температура внешней среды, совпадающая с начальной температурой материала; α_0 – коэффициент теплоотдачи при естественной конвекции, который вычисляется по формуле, аппроксимирующей экспериментальные данные по естественно-конвективному охлаждению вертикально ориентированной поверхности [12].

В качестве граничных условий на левой и правой границах области при $x = 0$ и $x = L$ (L – длина доски), а также в глубине материала при $y = h$ выставляются условия отсутствия теплообмена; в глубине материала используется условие $G_g = 0$.

Решение системы уравнений (1), (2) совместно с уравнениями кинетики термического разложения древесины осуществляется с помощью численных методов. Для решения уравнения (1) применяется неявная разностная схема, построенная на основе метода конечных объемов [12, 13], при этом члены, описывающие процессы теплопроводности, аппроксимируются со вторым порядком по пространственным переменным; для представления конвективного члена в левой части уравнения (1) используется противопоточная аппроксимация первого порядка. Уравнения кинетики разложения решаются неявным методом Эйлера первого порядка точности. Уравнение (2) интегрируется по формуле прямоугольников.

Получившаяся при применении этих методов нелинейная система алгебраических уравнений на каждом шаге по времени предварительно линеаризуется и решается методом итераций. При этом для решения двумерного разностного уравнения, соответствующего уравнению (1), используется метод переменных направлений со стабилизирующей поправкой Дугласа – Рекфорда [14].

Численные расчеты по предложенной математической модели проводились при следующих значениях исходных данных:

- эффективный коэффициент теплопроводности древесины $\lambda_{eff} = 0,14 \text{ Вт/(м·К)}$;
- эффективная удельная теплоемкость материала $c_{eff} = 1500 \text{ Дж/(кг·К)}$;
- начальная плотность материала $\rho_{s0} = 670 \text{ кг/м}^3$;
- начальная массовая доля летучих компонентов $0,05$;
- излучательная способность поверхности материала $\varepsilon_w = 0,8$;
- радиус теплового контакта струи плазмы с древесиной (полуширина струи) $\Delta = 0,005 \text{ м}$;
- глубина, до которой ведется расчет, $0,005 \text{ м}$.

Мощность плазмотрона менялась в диапазоне $15\text{--}58,8 \text{ кВт}$; коэффициент полезного действия плазмотрона $0,6$; скорость перемещения струи вдоль доски (V) изменялась в диапазоне $0,03\text{--}0,12 \text{ м/с}$.

Экспериментальные исследования проводились на образцах из древесины сосны влажностью 12% .

Обработка образцов потоком низкотемпературной плазмы выполнялась на оригинальном стенде, разработанном в Томском государственном архитектурно-строительном университете [15].

Исследования по влиянию плазменной обработки на водопроницаемость древесины проводились согласно ГОСТ Р 70748–2023 «Конструкции деревянные. Методы определения водопроницаемости защитных покрытий в натурных условиях».

Влияние параметров обработки на биостойкость древесины сосны оценивалось по интенсивности развития плесневелых грибов, в соответствии с ГОСТ 9.050–2021, по методу № 1. Подробное описание метода представлено в работе [16].

Результаты

На рис. 1–3 приведены результаты расчетов при величине удельного теплового потока $7,8 \cdot 10^5 \text{ Вт/м}^2$ и скорости перемещения $0,06 \text{ м/с}$.

Как видно из рисунков, температура поверхности на фиксированном участке достигает максимального значения при прохождении струи, а затем медленно убывает вследствие охлаждения путем естественной конвекции. При этом разложение дерева продолжается и после прохождения струи (рис. 2).

Глубина и этапы термического разложения иллюстрируются на рис. 3 (нумерация компонентов материала взята из работы [8]). Появление 3-го компонента на глубине Δ_2 означает начало разложения твердого каркаса. Исчезновение его на глубине Δ_1 означает окончание быстрых этапов пиролиза. Сопоставление расчетов с результатами микроскопического анализа позволяет сделать вывод, что Δ_1 соответствует глубине обугливания древесины.

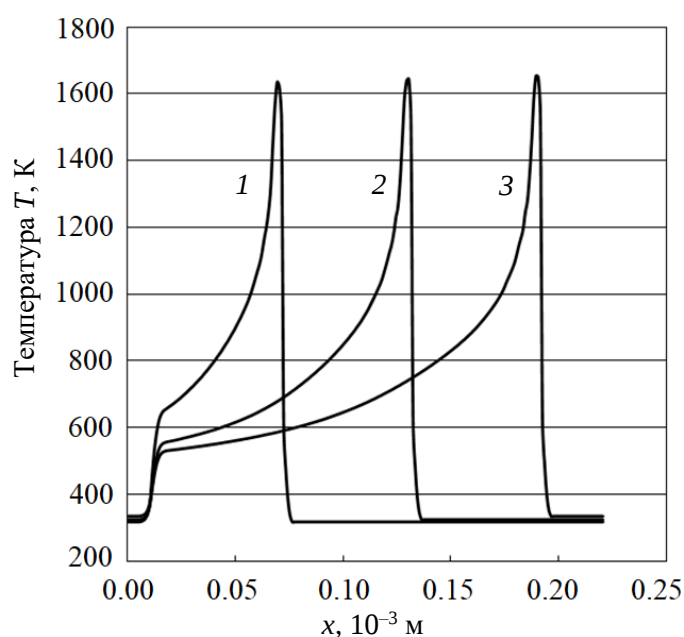


Рис. 1. Температура поверхности материала:

1 – в момент времени 1 с; 2 – в момент времени 2 с; 3 – в момент времени 3 с

Fig. 1. Material surface temperature:

1 – at time point of 1 s; 2 – at time point of 2 s; 3 – at time point of 3 s

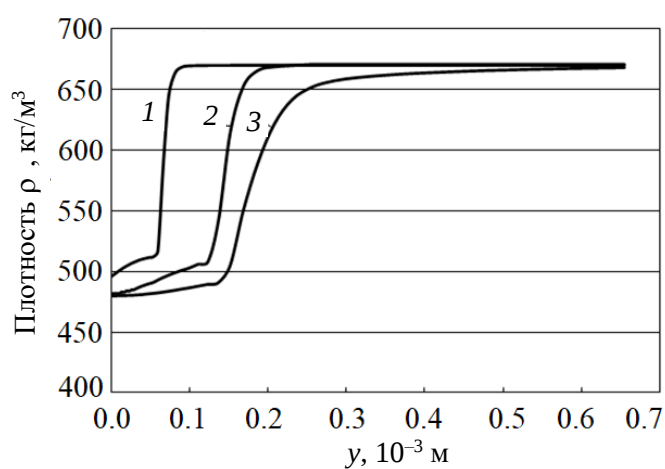


Рис. 2. Распределение плотности материала по глубине в момент времени $t = 3$ с:

1 – в окрестности максимального теплового потока; 2 – после прохождения струи на расстоянии 1 см от области максимального нагрева; 3 – после прохождения струи на расстоянии 10 см от области максимального нагрева

Fig. 2. Density distribution over depth at $t = 3$ s:

1 – near the maximum heat flow; 2 – after plasma jet flow at 1 cm distance from the area of maximum heating; 3 – after plasma jet flow at 10 cm distance from the area of maximum heating

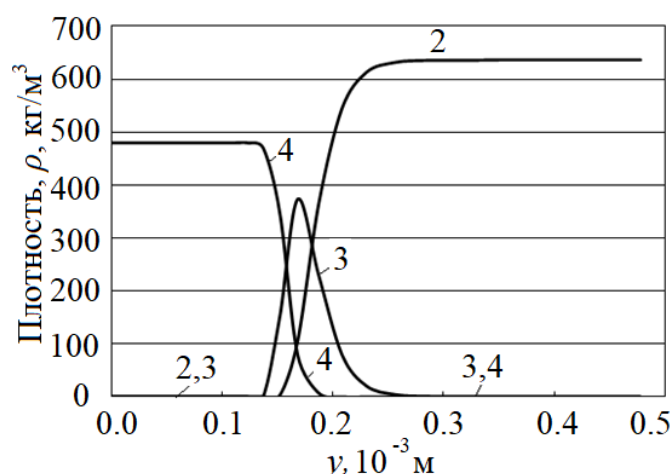


Рис. 3. Распределения плотности компонента разложения после окончания прохождения плазменной струи:

2 – материал исходного твердого каркаса (компонента № 2); 3, 4 – компоненты, возникающие на 2-й и 3-й стадиях разложения

Fig. 3. Density distribution of decomposition components after plasma jet passing:

2 – initial solid frame material (component 2); 3, 4 – components appearing at the 2nd and 3rd stages of decomposition

Суммарные результаты расчетов для различных параметров плазменной обработки приведены в табл. 1. Результаты теоретического расчета показывают, что как изменение величины удельного теплового потока, так и скорость обработки позволяют регулировать глубину обработанного слоя древесины. При этом глубина термического разложения увеличивается с повышением удельного теплового потока. Увеличение скорости продольного перемещения струи ее снижает, поскольку при неизменной величине удельного теплового потока уменьшается время теплового воздействия на конкретный участок поверхности.

Таблица 1

**Результаты расчетов термической обработки деревянной пластины
потоком плазмы**

Table 1

Calculation results of plasma treatment of wooden plate

$q_{\max}$, Вт/м ²	V , см/с	H_e , Дж/кг	t_k , с	T_w ср, К	Δ_1 , мм	Δ_2 , мм
$0,46 \cdot 10^6$	3	$3,5 \cdot 10^6$	6	490	0,0	0,05
$0,78 \cdot 10^6$	3	$5,6 \cdot 10^6$	6	1015	0,31	0,59
$1,2 \cdot 10^6$	3	$8,2 \cdot 10^6$	6	1235	0,39	0,99
$0,46 \cdot 10^6$	6	$3,5 \cdot 10^6$	3	430	0,0	0,0
$0,78 \cdot 10^6$	6	$5,6 \cdot 10^6$	3	820	0,15	0,28
$1,2 \cdot 10^6$	6	$8,2 \cdot 10^6$	3	1085	0,23	0,48
$0,46 \cdot 10^6$	9	$3,5 \cdot 10^6$	3	410	0,0	0,0

Окончание табл. 1

End of table 1

$q_{\max}$, Вт/м ²	V , см/с	H_e , Дж/кг	t_k , с	$T_{w\text{ ср}}$, К	Δ_1 , мм	Δ_2 , мм
$0,78 \cdot 10^6$	9	$5,6 \cdot 10^6$	3	490	0,0	0,02
$1,2 \cdot 10^6$	9	$8,2 \cdot 10^6$	3	970	0,15	0,28
$0,78 \cdot 10^6$	12	$5,6 \cdot 10^6$	2,5	460	0,0	0,0
$1,2 \cdot 10^6$	12	$8,2 \cdot 10^6$	2,5	870	0,11	0,21

Примечание. В таблице: $q_{\max}$ – максимальное значение теплового потока при начале нагрева (без учета горения газов), Вт/м²; V – скорость перемещения струи вдоль доски, см/с; H_e – полная удельная энтальпия струи, Дж/кг; t_k – время, до которого велся расчет, с; $T_{w\text{ ср}}$ – средняя температура точки поверхности за время прохождения теплового пятна, К; Δ_1 – глубина, на которой заканчивается быстрый этап пиролиза (в модели пиролиза исчезает компонент № 3, и твердый каркас древесины состоит только из компонентов № 4 и № 5), мм; Δ_2 – глубина, на которой начинается разложение твердого каркаса древесины (появляется компонент № 3 – результат разложения исходного материала каркаса), мм.

Зная зависимость глубины обработанного слоя от параметров обработки, необходимо экспериментально определить влияние этой глубины на свойства поверхности древесины.

В табл. 2 представлены результаты определения влияния параметров плазменной обработки на водопроницаемость образцов из сосны. Результаты анализа полученных данных представлены на рис. 4.

Таблица 2

Водопроницаемость образцов из сосны

Table 2

Water permeability of pine samples

Удельный тепловой поток $q_{\max}$, Вт/м ²	Скорость обработки v , см/с	Водопроницаемость V , см ³ /ч
–	–	$3,8 \pm 0,1$
$0,46 \cdot 10^6$	3	$2,2 \pm 0,1$
$0,78 \cdot 10^6$	3	$1,7 \pm 0,1$
$1,2 \cdot 10^6$	3	$1,5 \pm 0,1$
$0,46 \cdot 10^6$	6	$2,7 \pm 0,1$
$0,78 \cdot 10^6$	6	$2,3 \pm 0,1$
$1,2 \cdot 10^6$	6	$2,0 \pm 0,1$
$0,46 \cdot 10^6$	9	$3,3 \pm 0,1$
$0,78 \cdot 10^6$	9	$2,9 \pm 0,1$
$1,2 \cdot 10^6$	9	$2,6 \pm 0,1$
$0,78 \cdot 10^6$	12	$3,2 \pm 0,1$
$1,2 \cdot 10^6$	12	$2,8 \pm 0,1$

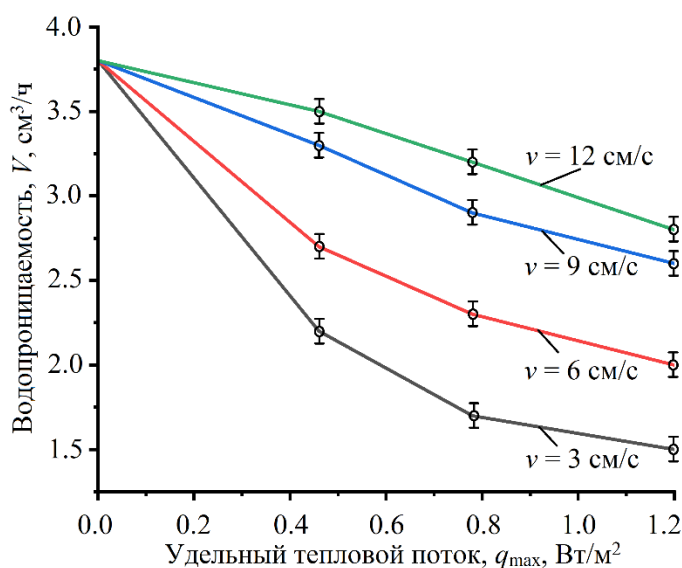


Рис. 4. Графики зависимости водопроницаемости образцов из сосны от величины удельного теплового потока и скорости обработки

Fig. 4. Dependences of water permeability of pine samples on specific heat flow and processing rate

В результате анализа полученных экспериментальных данных установлено, что при повышении величины удельного теплового потока и/или уменьшении скорости обработки поверхности древесины снижается водопроницаемость обработанной древесины. Например, при величине удельного теплового потока $0,46 \cdot 10^6$ Вт/м² и скорости обработки 3 см/с водопроницаемость равна $(2,2 \pm 0,1)$ см³/ч, а при увеличении теплового потока до $0,78 \cdot 10^6$ Вт/м² при неизменной скорости водопроницаемость составляет $(1,7 \pm 0,1)$ см³/ч. Такой эффект связан с увеличением глубины обработанного слоя древесины.

На рис. 5 представлены кривые зависимости интенсивности развития грибков от параметров плазменной обработки. Установлено, что при повышении удельного теплового потока и/или снижении скорости обработки интенсивность развития грибков снижается. Так, при величине удельного теплового потока $0,46 \cdot 10^6$ Вт/м² и скорости обработки 3 см/с биостойкость образцов оценивается в 3 балла, а при увеличении теплового потока до $0,78 \cdot 10^6$ Вт/м² при неизменной скорости биостойкость равна 2 баллам. Это связано с тем, что снижается количество питательных для микроорганизмов веществ. Поэтому, чем больше глубина обработки, которая зависит от величины удельного потока и скорости, тем менее пригодна поверхность древесины для развития микроорганизмов.

Установлено, что параметры обработки оказывают влияние на глубину обработанного слоя древесины. В свою очередь, глубина этого слоя влияет на свойства поверхности древесины сосны. Таким образом, имея теоретические данные и экспериментальные данные влияния параметров обработки на глубину и свойства этого слоя, возможно проводить целенаправленную плазмен-

ную обработку древесины с целью формирования заданных характеристик, отвечающих специфическим требованиям потребителя.

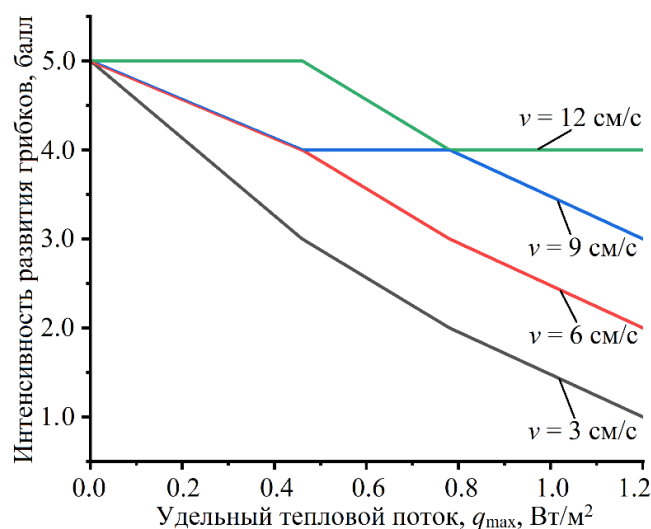


Рис. 5. Графики зависимости интенсивности развития грибка на образцах из сосны от величины удельного теплового потока и скорости обработки

Fig. 5. Dependences of fungal development on pine samples on specific heat flow and processing rate

Полученные данные имеют перспективу апробации на других смолосодержащих (хвойных) породах древесины (например, лиственница, кедр, ель и т. п.).

Заключение

На основе полученных теоретических и экспериментальных данных установлено следующее:

- параметры плазменной обработки влияют на глубину модифицированного слоя древесины;
- свойства древесины, рассматриваемые в настоящей работе – водопроницаемость и биостойкость – зависят от глубины модифицированного слоя древесины, определяющейся параметрами обработки;
- установив зависимости различных физико-химических и эксплуатационных свойств древесины от параметров обработки, возможно регулировать свойства обработанных строительных изделий из древесины.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Уголев Б.Н. Древесиноведение и лесное товароведение. Москва : ГОУ ВПО МГУЛ, 2007. 351 с.
2. Федосов С.В., Котлов В.Г., Окишев Н.И. Перспективы развития многоэтажных деревянных зданий // Вестник Кыргызского государственного университета строительства, транспорта и архитектуры им. Н. Исанова. 2020. № 1 (67). С. 158–166. DOI 10.35803/1694-5298.2020.1.158-166
3. Стородубцева Т.Н., Аксомитный А.А., Донских Т.С. Защита древесины от влаги и гниения // Воронежский научно-технический вестник. 2014. Т. 3. № 4 (10). С. 68–73.

4. Девятникова Л.А., Симонова А.А. Влияние условий эксплуатации на разрушение конструкций жилых домов из древесины // *Resources and Technology*. 2020. Т. 17. № 3. С. 36–49. DOI: 10.15393/j2.art.2020.5242
5. Волокитин Г.Г., Скрипникова Н.К., Синицын В.А., Волокитин О.Г. и др. Плазменная обработка древесины // *Теплофизика и аэромеханика*. 2016. Т. 23. № 1. С. 125–130.
6. Гришин А.М. Математическое моделирование лесных пожаров и новые способы борьбы с ними. Новосибирск : Наука. Сибирское отделение, 1992. 408 с.
7. *Пиролиз древесины* // Большая российская энциклопедия : [сайт]. URL: <https://bigenc.ru/c/piroliz-drevesiny-db4847> (дата обращения: 23.05.2025).
8. Черемных В.А., Волокитин Г.Г., Гольдин В.Д., Басалаев С.А. и др. О математической модели взаимодействия высокотемпературного потока плазмы с поверхностью древесины // *Вестник Томского государственного университета. Математика и механика*. 2024. № 88. С. 138–148. DOI: 10.17223/19988621/88/11
9. Полежаев Ю.В., Юревич Ф.Б. Тепловая защита. Москва : Энергия, 1976. 391 с.
10. Гришин А.М., Фомин В.М. Сопряженные и нестационарные задачи механики реагирующих сред. Новосибирск : Наука, 1985. 318 с.
11. Лунев В.В. Течения реальных газов с большими скоростями. Москва : Физматлит, 2007. 760 с.
12. Самарский А.А. Введение в теорию разностных схем. Москва : Наука, 1971. 552 с.
13. Самарский А.А., Вабичевич П.Н. Вычислительная теплопередача. М : Едиториал УРСС, 2003. 784 с.
14. Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи. Москва : Энергия, 1977. 344 с.
15. Патент № 212821 U1 Российская Федерация, МПК В27К 5/00. Устройство для обработки поверхности изделий из древесины низкотемпературными потоками плазмы : № 2021139632 : заявл. 29.12.2021 : опубл. 10.08.2022 / Волокитин Г.Г., Шеховцов В.В., Безухов К.А., Черемных В.А. ; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Томский государственный архитектурно-строительный университет». EDN: IAUZGY
16. Волокитин Г.Г., Черемных В.А., Адам А.М., Саркисов Ю.С. Повышение биостойкости строительных изделий из древесины сосны путем обработки потоком низкотемпературной плазмы // *Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета*. 2025. Т. 27. № 1. С. 172–179. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-1-172-179

REFERENCES

1. Ugolev B.N. Wood Science and Forest Commodity Sciences. Moscow, 2007. 351p. (In Russian)
2. Fedosov S.V., Kotlov V.G., Okishev N.I. Development Prospects of Multi-Storey Wooden Buildings. *Vestnik Kyrgyzskogo gosudarstvennogo universiteta stroitel'stva, transporta i arkhitektury im. N. Isanova*. 2020; 1 (67): 158–166. DOI: 10.35803/1694-5298.2020.1.158-166 (In Russian)
3. Storodubtseva T.N., Aksomitny A.A., Donskikh T.S. Wood Protection from Moisture and Rot. *Voronezh Voronezhskii nauchno-tekhnicheskii vestnik*. 2014; 4 (10): 68–73. (In Russian)
4. Devyatnikova L.A., Simonova A.A. Influence of Operating Conditions on the Destruction of Residential Wooded Structures. *Resources and Technology*. 2020; 17 (3): 36–49. DOI: 10.15393/j2.art.2020.5242. (In Russian)
5. Volokitin G.G., Skripnikova N.K., Sinitsyn V.A., Volokitin O.G., et al. Plasma Treatment of Wood. *Teplofizika i aeromekhanika*. 2016; 23 (1): 125–130. (In Russian)
6. Grishin A.M. Mathematical Modeling of Forest Fires and New Ways Protection. Novosibirsk: Nauka, 1992. 408 p. (In Russian)
7. Pyrolysis of wood. Great Russian Encyclopedia. Available: <https://bigenc.ru/c/piroliz-drevesiny-db4847>. (accessed May 23, 2025). (In Russian)
8. Cheremnykh V.A., Volokitin G.G., Goldin V.D., Basalaev S.A., et al. On a Mathematical Model of Interaction of a High-Temperature Plasma Flow with a Wood Surface. *Bulletin of Tomsk State University. Mathematics and mechanics*. 2024; (88): 138–148. DOI: 10.17223/19988621/88/11 (In Russian)
9. Polezhaev Yu.V., Yurevich F.B. Thermal Protection. Moscow: Energiya, 1976. (In Russian)
10. Grishin A.M., Fomin V.M. Conjugate and Nonstationary Problems of Reacting Media Mechanics. Novosibirsk: Nauka, 1985. (In Russian)

11. Lunev V.V. Flows of Real Gases at High Velocities. Moscow: Fizmatlit, 2007. 760 p. (In Russian)
12. Samarskiy A.A. Introduction to Difference Scheme Theory. Moscow: Nauka, 1971. 552 p. (In Russian).
13. Samarskiy A.A., Vabishevich P.N. Computational Heat Transfer. Moscow: Editorial URSS, 2003. 784 p. (In Russian)
14. Mikheev M.A., Mikheeva I.M. Fundamentals of Heat Transfer. Moscow: Energiya, 1977. 344 p. (In Russian)
15. Volokitin G.G., Shekhovtsov V.V., Bezukhov K.A., Cheremnykh V.A. "Device for Surface Treatment of Wood Products with Low-Temperature Plasma". UMP Rus. Fed. No. 212821 U1. 2022. (In Russian)
16. Volokitin G.G., Cheremnykh V.A., Adam A.M., Sarkisov Yu.S. Improvement of Biological Resistance of Pine Wood Building Products using Low-Temperature Plasma. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture*. 2025; 27 (1): 172–179. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-1-172-179 (In Russian)

Сведения об авторах

Волокитин Геннадий Георгиевич, докт. техн. наук, профессор, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, vgg-tomsk@mail.ru

Гольдин Виктор Данилович, канд. физ.-мат. наук, ст. научный сотрудник, Национальный исследовательский Томский государственный университет, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36, vdg@math.tsu.ru

Черемных Владимир Алексеевич, аспирант, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, vacheremnykh@gmail.com

Цветков Николай Александрович, докт. техн. наук, профессор, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, nac.tsuab@yandex.ru

Authors Details

Gennady G. Volokitin, DSc, Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, vgg-tomsk@mail.ru

Victor D. Goldin, PhD, Senior Research Assistant, National Research Tomsk State University, 36, Lenin Ave., 634050, Tomsk, Russia, vdg@math.tsu.ru.

Vladimir A. Cheremnykh, Research Assistant, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, vacheremnykh@gmail.com

Nikolai A. Tsvetkov, DSc, Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, nac.tsuab@yandex.ru

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Authors contributions

The authors contributed equally to this article.
The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 08.08.2025
Одобрена после рецензирования 19.08.2025
Принята к публикации 10.09.2025

Submitted for publication 08.08.2025
Approved after review 19.08.2025
Accepted for publication 10.09.2025