

**ТЕХНОЛОГИЯ НЕОРГАНИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ
TECHNOLOGY OF INORGANIC SUBSTANCES**

Научная статья

УДК 630.812

DOI: 10.26730/1999-4125-2026-3-47-56

ИССЛЕДОВАНИЕ НАБУХАНИЯ ДРЕВЕСИНЫ КАК МЕТАМАТЕРИАЛАНовиков Олег Николаевич¹, Ван Елена Юрьевна^{2*}, Михайлов Владимир Геннадьевич³¹ ООО «Аусванд»² Балтийский федеральный университет имени И. Канта³ Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева

* для корреспонденции: elenavan2007@yandex.ru

**Информация о статье**

Поступила:

30 марта 2026 г.

Одобрена после

рецензирования:

15 июня 2026 г.

Принята к публикации:

01 июля 2026 г.

Ключевые слова:

древесина, набухание, разбухание, агент набухания, капиллярные силы, давление набухания, диэлектрическая проницаемость, метаматериал

Аннотация.

Статья посвящена изучению явления разбухания древесины как пористого материала. Исследования в этой области актуальны для расчета поведения древесины как конструкционного материала, для направленной модификации древесины с получением новых композитов и применения древесины как метаматериала, в том числе в электронике. Разработана математическая модель набухания древесины под действием капиллярных сил. Выведены уравнения, в которых связаны морфологические и физико-химические свойства древесины с величиной коэффициента объемного набухания. На основании экспериментальных данных с привлечением модели определены значения поверхностного натяжения древесины в тангенциальном и радиальном направлении. Обнаружена анизотропия в радиальном и тангенциальном направлении. Модель в целом обеспечивает феноменологическое описание процесса. Поверхностное натяжение органических агентов набухания близко по величине, тогда как диэлектрическая проницаемость имеет широкий диапазон величин и является вторым значащим фактором, определяющим величину набухания. Зависимость от поверхностного натяжения нелинейная. Выявлена роль диэлектрической проницаемости в набухании. Линейная корреляция в уравнениях зависимости коэффициента набухания от диэлектрических свойств агента набухания подтверждает роль диэлектрической проницаемости. Материал характеризуется анизотропией в величине диэлектрической проницаемости и проявляет свойства резонатора в переменном электрическом поле. Наличие в структуре древесины двух биополимеров с сильно отличающимися свойствами, в частности диэлектрической проницаемостью, определяет древесину как композит, в объеме которого образуются поверхности на границе фаз с разной полярностью. При этом экранирование этих зарядов солями снижает прочность и влияет на набухаемость. Прочность снижается, а значит, влияние электрических зарядов существенно. Древесину можно отнести к природным метаматериалам или их предшественнику. Исследования свойств древесины как анизотропного диэлектрика с периодической морфологией могут быть использованы в биомиметике при создании новых природоподобных функциональных метаматериалов с заданным комплексом свойств.

Для цитирования: Новиков О.Н., Ван Е.Ю., Михайлов В.Г. Исследование набухания древесины как метаматериала // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2026. № 3

(175). С. 47-56. DOI: 10.26730/1999-4125-2026-3-47-56, EDN: CZFNMP

Введение

На необычные свойства древесины как анизотропного октотропного диэлектрика обратили внимание еще в 1973 году [1]. Выраженная анизотропия и необычность физико-химических свойств древесины по-прежнему привлекают внимание исследователей. Применяются различные методы исследования, включая измерения в высокочастотных полях [2, 3], изучение малоуглового рентгеновского рассеяния древесины [4, 5], теплопроводности [6]. История древесины как сырья и конструкционного материала показывает возрастающий интерес к этому материалу [7].

Древесину возможно рассматривать как композит из биополимеров, находящихся в стеклообразном состоянии. Описание набухания стеклообразных пористых тел представляет собой малоизученную область исследований. Изучение этого явления имеет фундаментальное значение для создания целостной системы закономерностей в области взаимодействия жидкости и пористого тела, а также для развития бионики.

Цель данной работы состоит в рассмотрении набухания древесины как полимера, находящегося в стеклообразном состоянии.

Объекты и методы исследования

Методические основы

Предполагалось, что модель набухания биополимера может быть основана на следующих очевидных допущениях:

- набухаемость материалов в стеклообразном состоянии вызывается капиллярными силами;
- весь материал находится в стеклообразном состоянии;
- капиллярным силам противодействуют силы упругости полимера;
- молекулы растворителя проникают только в крупные, доступные им поры.

Методика определения разбухания

Изготавливают образец в виде прямоугольной плитки размером 30х30х10 мм (наименьший размер вдоль волокон). Образцы высушивают в сушильном шкафу при температуре, постепенно (во избежание растрескивания) поднимающейся к $103 \pm 2^\circ\text{C}$, до абсолютно сухого состояния. При высушивании и взвешивании образцы находятся в бюксах. На торцевой поверхности высушенных и охлажденных в эксикаторе с безводным хлористым кальцием образцов наносят карандашные риски по двум взаимно перпендикулярным (радиальному и тангенциальному) направлениям. Измеряя расстояние между продольными плоскостями образца в местах, отмеченных рисками, определяют радиальный и тангенциальный размеры образца до точности 0,01 мм. Затем

образцы помещают в закрываемый крышкой сосуд с дистиллированной водой, имеющей температуру $20 \pm 2^\circ\text{C}$. Образцы выдерживают в сосуде до тех пор, пока два контрольных измерения тангенциального размера не покажут повторения результатов. После окончания выдерживания вновь в тех же местах определяют радиальный и тангенциальный размеры образца. Полное разбухание в радиальном и тангенциальном направлениях вычисляют по формуле (22).

Теоретическая часть

Математическая модель набухания

Сила поверхностного натяжения в порах f_s определяется выражением (1):

$$f_s = a \cdot S \cdot (\sigma_1 - \sigma_2) / r_{por}, \quad (1)$$

где a – коэффициент формы пор $1 \leq a \leq 2$, S – поверхность материала, r_{por} – средний радиус пор, σ_1, σ_2 – поверхностное натяжение твердого вещества и агента набухания.

Поверхностное натяжение древесины активно изучается, данные приведены в [8].

Средний размер пор определяется по формуле (2):

$$r_{por} = \int_{r_{min}}^{r_{max}} N(r) dr \quad (2)$$

где $N(r)$ – распределение пор по размеру, r_{max} – размер максимальных пор, r_{min} – размер пор, в которых агент набухания проникнуть не может.

Для древесины размер пор от 2 до 200 мкм.

Сила поверхностного натяжения увеличивает объем пористого тела. При этом она работает против силы упругости.

Силу упругости f_u можно рассчитать по уравнению (3):

$$f_u = (E \cdot S_{gl} \cdot \Delta r_{por}) / (r_{por}), \quad (3)$$

где E – модуль Юнга, S_{gl} – сечение мостика, r_{por} (r_0) – размер пор, $\Delta r_{por} = r_1 - r_0$ – изменение размера пор при набухании.

Из равенства силы упругости с силой поверхностного натяжения (3) и (1) следует, что

$$(a \cdot (\sigma_1 - \sigma_2) \cdot S) / r_1 = (E \cdot S_{gl} \cdot (r_1 - r_0)) / r_0 \quad (4)$$

$$(a \cdot (\sigma_1 - \sigma_2) \cdot S) / (E \cdot S_{gl} \cdot r_1) = (r_1 - r_0) / r_0, \quad (5)$$

т. к. $r_1 \approx r_0$, то

$$(a \cdot (\sigma_1 - \sigma_2) \cdot S) / (E \cdot S_{gl}) = \Delta r. \quad (6)$$

Определим коэффициент набухания через изменение размера:

$$Ks = Vs/V =$$

$$= (4/3 \cdot \pi \cdot (r + \Delta r)^3) / (4/3 \cdot \pi \cdot r^3) \quad (7)$$

$$=$$

$$= (1 + \Delta r/r)^3.$$

P – разбухание:

$$P = \Delta r/r \quad (8)$$

$$Ks = (1 + P)^3 \quad (9)$$

$$Ks = 1 + 3 \cdot \Delta r/r + 3 \cdot \Delta r^2/r^2 + \Delta r^3/r^3. \quad (10)$$

Т. к. $\Delta r/r$ – мало, то учитывается только два первых члена уравнения:

$$Ks \approx 1 + 3 \cdot \Delta r/r. \quad (11)$$

С учетом (7) получим:

$$Ks = 1 + 3 \cdot a \cdot (\sigma_1 - \sigma_2) \cdot S / (E \cdot Sgl \cdot r_{por}).$$

Проверить это уравнение можно из корреляции Ks (12) и выражения:

$$X = (\sigma_1 - \sigma_2) \cdot S / (E \cdot Sgl \cdot r_{por}). \quad (13)$$

Тогда уравнение (13) приводится к виду:

$$Ks = 1 + 3 \cdot a \cdot X \quad (14)$$

$$Ks \approx 1 + 3 \cdot a \cdot (\sigma_1 - \sigma_2) \cdot S / (E \cdot Sgl \cdot r_{por}) =$$

$$= 1 + 3 \cdot Z \cdot \sigma_1 - 3 \cdot Z \cdot \sigma_2$$

Если определить Z как:

$$Z = S \cdot a / (E \cdot Sgl \cdot r_{por}), \quad (16)$$

Z – константа для данной древесины;

При этом σ_1 – поверхностное натяжение древесины.

Если принять за:

$$A = 1 + 3 \cdot Z \cdot \sigma_1 \quad (17)$$

$$B = 3 \cdot Z, \quad (18)$$

уравнение (16) сведется к линейному виду:

$$Ks = A + B \cdot \sigma_2. \quad (19)$$

Из угла наклона можно определить Z, посчитать σ_1 по отрезку, отсекаемому на ординате. По линейной корреляции Ks и σ_2 можно вычислить B. (20)

Тогда:

$$Z = B/3$$

$$\sigma_2 = (A - 1)/B. \quad (21)$$

Таким образом можно определить показатель поверхностного натяжения пористого тела (древесины). Параметр Z тоже можно рассчитать, он зависит от модуля Юнга и структуры пор самой древесины, которую приближенно рассматриваем как постоянную.

Так как для одного материала S, E, r, Sgl и σ_1 априори одинаковы, должна существовать зависимость Ks от σ_2 для макропористых сорбентов, в том числе и древесины. При необходимости можно получить дополнительную информацию, учитывая удельную поверхность древесины (Таблица 1). При этом следует учесть, что в присутствии влаги происходит взаимодействие с целлюлозой и раскрытие дополнительных пор, что следует из сопоставления данных по удельной поверхности пор древесины, определенной по сорбции азота и воды, см. Таблицу 1.

Характерный размер пор в древесине находится в диапазоне от 5 до 15 нм. Только дуб имеет очень ограниченную удельную поверхность по адсорбции азота, даже больше, чем у бука, при поглощении воды. С использованием этой модели становится возможным предсказывать поведение пористых стеклообразных материалов при смене растворителя, а также исследовать поверхностное натяжение сополимеров, сопоставлять модель набухания с морфологией сополимеров, определять модуль Юнга материалов.

Следует сделать некоторые выводы из модели:

1. Коэффициент набухания должен возрастать с увеличением доли микропор в древесине.

2. Набухаемость в первом приближении должна линейно зависеть от поверхностного натяжения агента набухания.

3. Способность к набуханию зависит от пористости.

4. Существенно сказывается еще и размер молекул агента набухания. С увеличением размера молекул набухаемость должна снижаться.

Разбухание древесины.

При увлажнении древесины в результате увеличения содержания связанной влаги микрофибриллы в клеточных оболочках раздвигаются. Это вызывает увеличение размеров (объема) морфологических элементов и древесины в целом, т. е. разбухание. Мерой разбухания является влажностная деформация, отнесенная к размеру (объему) образца в

Таблица 1. Величина удельной поверхности образцов древесины

Table 1. The specific surface area of wood samples

Древесина	Удельная поверхность образцов, см ² /г	Источник информации	Древесина	Удельная поверхность образцов, м ² /г	Источник информации
	Десорбция азота			Адсорбция паров воды	
Дуб	<100	[9]	Дуб*	117,7	[10]
Бук	2200	[9]	Бук*	97,9	[10]
Сосна	1250	[9]			
Береза	1950	[9]			

абсолютно сухом состоянии, где P – разбухание образца при достижении данной влажности W , %; a_w – размер (объем) образца при данной влажности W , мм; a_0 – размер (объем) образца в абсолютно сухом состоянии ($W=0\%$), мм.

$$P = (a_w - a_0) \cdot 100\% / a_0 \quad (22)$$

Разбухание представляет собой явление, обратное усушке, и практически подчиняется одним и тем же количественным закономерностям. Полное разбухание P наступает при увлажнении древесины от абсолютно сухого состояния до предела гигроскопичности. Дальнейшее увеличение влажности древесины вследствие повышения содержания свободной влаги разбуханием не сопровождается. Объем разбухшей древесины получается несколько меньше суммы объемов древесины до разбухания и поглощаемой ею воды. Это уменьшение объема системы

(древесина – вода) называется контракцией и объясняется сжатием (уплотнением) воды, происходящим под большим давлением. Вода в оболочке клеток находится под давлением 3000–4000 ат и поэтому имеет повышенную плотность. Полученные данные указывают на то, что контракция происходит при увеличении влажности от 0 до примерно 6%; последующие количества поглощаемой воды не претерпевают сжатия. Коэффициент набухания K_s можно вычислить, если известно частичное P или полное P разбухание, он определяется по формуле:

$$K_s = P / W. \quad (23)$$

Для характеристики явления разбухания ограничиваются непосредственным экспериментальным определением полного линейного радиального и тангенциального разбухания P . Часто совмещают определение

Таблица 2. Величина давления при набухании в воде древесины различных пород

Table 2. The magnitude of pressure during swelling of different types of wood in water

	Давление набухания, кГ/см ²		Порода	Давление набухания, кГ/см ²	
	тангенциальное	радиальное		тангенциальное	радиальное
Сосна заболонь	8,2	14,4	Ясень заболонь	15,7	21
Сосна ядро	11,0	21,4	Ясень ядро	27,2	31,8
Лиственница заболонь	7,4	16,9	Береза заболонь	10,4	8,6
лиственница ядро	9,1	17,1	Осина ядро	8,9	10,4
Дуб заболонь	10,5	19,2	Ольха заболонь	10,2	8,9
Дуб ядро	15,4	31,0	Бук	12,2	13,7

Таблица 3. Разбухание (%) древесины при поглощении различных жидкостей

Table 3. Swelling (%) of wood upon absorption of various liquids

Жидкости	Диэлектрическая постоянная	Разбухание, %						$\sigma \cdot 10^3$, Н/м, 20°C
		Сосна (<i>Pinus sylvestris</i> L.)		Дуб (<i>Quercus</i> L.)		Бук (<i>Fagus</i> L.)		
		ядро радиальное	ядро тангенциальное	ядро радиальное	ядро тангенциальное	ядро радиальное	ядро тангенциальное	
Вода	80,1	4,1±0,1	9,8±0,1	5±0,1	10,1±0,1	6,1±0,1	14,8±0,1	72,75
Хлороформ	5	0,9±0,1	1,4±0,2	2,0±0,1	3,2±0,1	4,8±0,1	7,9±0,1	27,26
Скипидар	2,3	0,1±0,1	0,3±0,1	0,3±0,1	0,6±0,1	0,2±0,1	0,3±0,1	26,00
Керосин	2,1	0	0,1±0,05	0,1±0,07	0,1±0,1	0,1±0,1	0,2±0,1	24,00
Ацетон	21,3	2,7±0,1	6,2±0,1	3,8±0,1	7,7±0,1	4,3±0,1	11,0±0,1	23,7
Метиловый спирт	33,5	3,6±0,1	8,8±0,1	4,7±0,1	9,8±0,1	5,7±0,1	13,6±0,1	22,61
Этиловый спирт	25,7	4,6±0,1	6,7±0,1	4,4±0,1	8,7±0,1	5,4±0,1	11,5±0,1	22,03

разбухания и водопоглощения.

Результаты и обсуждение

Значения коэффициентов разбухания для наиболее распространенных пород приведены в Таблице 2. Если воспрепятствовать свободному увеличению размеров и объема древесины при влагопоглощении, вследствие стеснения влажностных деформаций возникнут усилия и давление набухания. Для березы в радиальном направлении давление набухания составило 10 кГ/см^2 . Давления набухания древесины некоторых пород при температуре 20° приведены в Таблице 2.

Примечание. С увеличением температуры давление набухания существенно снижается. Для сосны повышение температуры от 20 до 80° приводит к уменьшению давления набухания более чем в 2 раза. Разбухание древесины происходит и при поглощении других жидкостей, но в меньшей степени, чем при поглощении воды.

Если давление при набухании вызвано капиллярными силами, поскольку это давление равномерно распределяется во все стороны, то разницы в величине тангенциального и радиального набухания в изотропной среде не должно быть. Тем не менее, разница между этими величинами есть, и она заведомо выше, чем ошибка измерения (Таблица 1). Причина в анизотропии древесины, радиальный и тангенциальный модуль Юнга отличаются. В Таблице 3 показано разбухание древесины в различных жидкостях по литературным данным [2, 11, 12].

По результатам измерения разбухания были определены величины поверхностного натяжения для древесины (Таблица 4).

Различия в поверхностном натяжении разных пород древесины иллюстрируют разницу в потребительских свойствах пиломатериалов на

основе разных пород.

Как видно из приведенных выше данных, для бука разница между тангенциальным направлением и радиальным достаточно велика, в радиальном направлении поверхностное натяжение почти в два раза больше. Для дуба радиальное поверхностное натяжение близко к тангенциальному. Поверхностное натяжение напрямую связано с энергией когезии, химической структурой, а также с прочностью и упругостью. Соответственно, химическая природа поверхности продольных пор должна отличаться от таковой для основной массы древесины. Поверхностное натяжение связано с параметром Гильдебрандта, который, в свою очередь, синхронно связан с прочностью. Дуб, очевидно, имеет большую прочность на растяжение, а также и на раскалывание. Бук уступает по этим величинам дубу, что иллюстрируется большей величиной поверхностного натяжения дуба (Таблица 4) и отражается в Таблице 5 прямыми измерениями. В Таблице 5 приведены данные по механическим свойствам, это подтверждается расчетами.

Как видно из Таблицы 5, дуб имеет большую упругость при сжатии, растяжении, и больший модуль сдвига.

Расчеты показали, что разбухание и диэлектрическая проницаемость (Таблица 3) связаны между собой линейным законом. Для ядра бука в радиальном направлении эта корреляция составляет $0,77$, для тангенциального – $0,80$. С учетом формулы (17) должна быть нелинейная корреляция между коэффициентом набухания и поверхностным натяжением агента набухания, в зависимости от соотношения поверхностного натяжения самой древесины и агента набухания. Корреляция для ядра бука в радиальном направлении между поверхностным натяжением и коэффициентом набухания

Таблица 4. Поверхностное натяжение древесины

Table 4. Surface tension of wood

	$\sigma \cdot 10^3, \text{ Н/м, при температуре } 20^\circ\text{C}$	
	Радиальное направление	Тангенциальное направление
Бук	118,8	56,8
Дуб	205,6	200,9

Таблица 5. Механические свойства древесины

Table 5. Mechanical properties of wood

Порода	Модуль упругости, 10^3 кг/см^2 , при сжатии			Модуль упругости, 10^3 кг/см^2 , при растяжении			Модуль сдвига, 10^3 кг/см^2		
	Ea	Er	Et	Ea	Er	Et	Gra	Gtr	Grt
Сосна	117	0,2	5	117	5,1	4,3	11,4	7,1	—
Ель	142	5,9	3,6	143	6,2	4,2	-	—	0,5
Дуб	140	12,9	9,1	140	11	8,3	13,2	9,1	4,4
Береза	158	6	4,5	181	6	4,2	14,5	8	2
Бук	120			139			13,1		

составляет величину 0,37, для тангенциального направления – 0,43. Для ядра дуба разбухание с диэлектрической проницаемостью связаны также с линейной корреляцией 0,76, для тангенциального направления – 0,75. Корреляция коэффициента набухания для дуба с поверхностным натяжением в радиальном направлении 0,40 и в тангенциальном – 0,36. Для дуба также. Для сосны разбухание линейно коррелирует с диэлектрической проницаемостью для радиального направления древесины 0,75, для тангенциального – 0,86. На примере трех видов древесины обнаруживаются общие закономерности независимо от того, листовая порода или хвойная. В набухании древесины главный фактор – это диэлектрическая проницаемость. Хотя поверхностное натяжение качественно объясняет набухание, количественную разницу в коэффициентах набухания определяет диэлектрическая проницаемость, так как величина поверхностного натяжения органических агентов набухания близка, а диэлектрическая проницаемость достаточно вариативна.

С учетом как капиллярных сил, так и электрических феноменологическое описание коэффициента набухания может быть представлено следующим образом (24):

$$Ks \approx \frac{1+3 \cdot a \cdot (\sigma_1 - \sigma_2) \cdot S}{(E \cdot Sgl \cdot r_{por}) + K_\epsilon \cdot \epsilon}, \quad (24)$$

где K_ϵ – константа для древесины одного вида, а ϵ – диэлектрическая проницаемость агента набухания. Величина K_ϵ для сосны составляет 0,00028.

На разбухание скорее влияет электростатическое взаимодействие. Возникает основание полагать, что кроме капиллярных сил в древесине проявляются электрические силы. Именно эти силы и нейтрализует вода как вещество с высокой диэлектрической постоянной. За счет этого проявляется дополнительный и сильный фактор. Благодаря наибольшей диэлектрической проницаемости именно вода ослабляет электрическое стягивание компонентов древесины, создает гибкость древесины.

Данные Таблицы 3 показывают, что разбухание тем больше, чем выше диэлектрическая постоянная поглощенной жидкости.

Микроскопические исследования пихты показали, что набухание в этаноле происходило за счет увеличения расстояния между стенками, тогда как вода расширяет твердую фракцию древесины [12]. Поэтому для описания явления набухания древесины в органических агентах подходит модель расширения пор через диэлектрическую проницаемость.

При исследовании диэлектрических свойств в широком диапазоне частот от 3×10^2 до 10^9 Гц

были обнаружены зависимости с минимумом $\tan \delta$ от частоты при разной влажности древесины. Так, например, для древесины бука вдоль волокон при влажности 12% с повышением частоты тангенс диэлектрических потерь $\tan \delta$ вначале резко падает, достигает минимума при частоте 10^5 Гц, и затем также резко возрастает [14, 15]. То есть древесина работает как конденсатор, резонирующий при определенной частоте электрического поля. В точке минимума свойства древесины максимально приближены к свойствам изолятора. По мере возрастания влажности диэлектрическая проницаемость в переменных полях должна была бы меняться линейно, по аддитивной схеме, а фактически меняется нелинейным образом [2, 16]. На аддитивность накладывается набухание целлюлозных волокон, изменение удельной поверхности компонентов древесины и состояния самих молекул воды в сорбционном слое и сольбилизовавшей воду целлюлозе. Пропитка солями натрия несколько увеличивает плотность древесины, но при этом ухудшаются механические свойства [17], вероятно, заряды внутри структуры древесины нейтрализуются ионами, что снижает электростатическое взаимодействие между лигнином и целлюлозой.

С учетом различий в диэлектрической проницаемости целлюлозы 5,3 и лигнина 8-8,5 [17] в древесине возникает разность потенциалов между целлюлозой и лигнином, которой можно объяснить значительное отклонение от капиллярного механизма набухания древесины. Признаком метаматериала является наличие системы, состоящей из микрорезонаторов [19]. Поэтому древесину также можно отнести к метаматериалам или их предшественникам.

Исследования механизма набухания древесины могут найти применение при создании бионических природоподобных материалов, сенсоров и функциональных материалов различного назначения [20, 21].

Выводы

В результате проведенного исследования предложена математическая модель набухания древесины, рассматривающая ее как стеклообразный пористый полимер, где движущей силой процесса являются капиллярные явления, а противодействующей – силы упругости материала. Модель позволила получить уравнения, связывающие коэффициент объемного набухания с морфологическими параметрами (пористость, размер пор) и физико-химическими свойствами (модуль Юнга, поверхностное натяжение) как самой древесины, так и агента набухания.

Экспериментальная проверка модели на примере трех пород древесины (сосна, дуб, бук) и семи жидкостей с различными свойствами показала, что капиллярный механизм не является

единственным. Обнаружена сильная линейная корреляция (0,75–0,86) между коэффициентом набухания и диэлектрической проницаемостью агента набухания, тогда как корреляция с его поверхностным натяжением оказалась значительно слабее (0,36–0,43). Это позволило сделать вывод о существенном вкладе электростатических взаимодействий в процесс набухания.

Показано, что анизотропия набухания древесины обусловлена не только различием в модулях упругости по разным направлениям, но и анизотропией ее поверхностного натяжения. С использованием предложенной модели впервые рассчитаны значения поверхностного натяжения для древесины бука ($118,8 \cdot 10^{-3}$ Н/м в радиальном и $56,8 \cdot 10^{-3}$ Н/м в тангенциальном направлении) и дуба ($205,6 \cdot 10^{-3}$ Н/м и $200,9 \cdot 10^{-3}$ Н/м соответственно), что подтверждает различие в химической природе поверхности по разным направлениям.

Выявлена роль диэлектрической проницаемости как ключевого фактора, определяющего величину набухания. Предложено феноменологическое уравнение (24), учитывающее совместное действие капиллярных и электрических сил. Установлено, что высокая диэлектрическая проницаемость воды обеспечивает экранирование электростатических взаимодействий между целлюлозой и лигнином, что приводит к максимальному набуханию и повышению гибкости древесины.

Наличие в структуре древесины двух биополимеров с разной диэлектрической проницаемостью (целлюлоза – 5,3; лигнин – 8–8,5) создает на границе их раздела разность потенциалов. В совокупности с периодической морфологией и способностью к резонансным явлениям в переменном электрическом поле (наличие минимума $\tan \delta$ на определенных частотах) это позволяет рассматривать древесину как природный метаматериал.

Полученные результаты имеют значение для развития биомиметики и создания новых природоподобных функциональных материалов с заданными свойствами, включая сенсоры, композиты с управляемыми характеристиками и материалы для электроники. Дальнейшие исследования предполагают изучение влияния модификации древесины (в том числе обработки солями) на ее диэлектрические свойства и способность к набуханию.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Lin R. T. Wood as an orthotropic dielectric material // *Wood and Fiber*. 1973. № 5. Pp. 226–235.
2. Ahire D. V. Study of dielectric behavior of dry and moist acacia Indica wood at x-band frequency // *International Journal of Physics and Mathematical*

Sciences. 2013. Vol. 3. № 4. Pp. 48–53. URL: <http://www.cibtech.org/jpms.htm> (дата обращения: 15.03.2026).

3. Кочеткова Т. Д., Сусяев В. И., Волчков С. И. Диэлектрическая проницаемость хвойных пород древесины в диапазоне частот 3–12 ГГц // *Вестник СиБГАУ*. 2013. № 5. С. 101–104.

4. Hiriyama H., Kojiro K., Okahisa Y. [et al.] Combined analysis of the microstructure of wood swollen by water and/or ethanol through dynamic mechanical analysis and small-angle X-ray scattering // *Wood Science and Technology*. 2024. Vol. 58. Pp. 1991–2006.

5. Chen Y., Shi T., Lyu J. [et al.] Swelling of Chinese fir in water-ethanol mixtures // *Wood Material Science & Engineering*. 2025. № 6. Pp. 1–7. DOI: 10.1080/17480272.2025.2522988.

6. Olmi R., Bini M., Ignesti A., Riminesi C. Dielectric Properties of Wood from 2 to 3 GHz // *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy*. 2000. № 35. Pp. 135–143. DOI: 10.1080/08327823.2000.11688430.

7. Кононов Г. Н., Зайцев В. Д. Древесина как химическое сырье. История и современность. II. Анатомия древесины как фактор ее химической активности // *Лесной вестник / Forestry Bulletin*. 2020. № 6. С. 103–112. DOI: 10.18698/2542-1468-2020-6-103-112.

8. Глазков С. С., Козлов В. А., Пожидаева А. Е., Рудаков О. Б. Поверхностные энергетические характеристики композитов на основе природных полимеров // *Сорбционные и хроматографические процессы*. 2009. Т. 9. № 1. С. 58–66.

9. Горбачева Г. А., Санаев В. Г., Белковский С. Ю. Характеризация удельной поверхности древесины при эффекте памяти формы // *Лесотехнический журнал*. Древопереработка. Химические технологии. 2016. № 3. С. 76–87. DOI: 12737/21683.

10. Лоскутов С. Р., Шапченкова О. А., Анискина А. А., Пастори З. Гигроскопические свойства древесины лиственных пород // *Лесной вестник / Forestry Bulletin*. 2022. № 2. С. 92–102. DOI: 10.18698/2542-1468-2022-2-92-102.

11. Чубинский А. Н., Тамби А. А., Чубинский М. А., Чаузов К. В. Физика древесины : учебное пособие по выполнению лабораторных работ. Санкт-Петербург : СПбГЛТУ, 2015. 67 с.

12. Брытков Е. В. Механика композиционных материалов. Санкт-Петербург : Балтийский государственный университет, 2012. 74 с.

13. Chen Y., Shi T., Lyu J., Peng H., Zhan T. Swelling of Chinese fir in water-ethanol mixtures // *Wood Material Science & Engineering*. 2025. № 6. Pp. 1–7. DOI: 10.1080/17480272.2025.2522988.

14. Глебов И. Т., Кузнецова О. В. Физика древесины. Екатеринбург, 2019. С. 11.

15. Hakam A., Alami Chantoufi N., El Imane N. Dielectric Properties of Atlas Cedar Wood at its Early

Stage of Decay // International Journal of Pharmacognosy and Phytochemical Research. 2017. № 9. Pp. 444–448.

16. Goreshev M. A., Litvishko E. S., Lopatin V. V. Dielectric Properties of Birch Wood in the High-Frequency Range // Russian Physics Journal. 2016. № 58. Pp. 1297–1300. DOI: 10.1007/s11182-016-0646-6.

17. Var A. A., Kardaş İ. Changes in physical, mechanical, shrinking and swelling properties of pine wood species treated with salt natural geothermal waters as environmentally safe resources // Applied Ecology and Environmental Research. 2019. № 17. Pp. 14053–14068. DOI: 10.15666/aer/1706_1405314068.

18. Боголицын К. Г., Хвилюзов С. С., Волков А. С. [и др.] Широкополосная диэлектрическая спектроскопия лигнина // Журнал

физической химии. Коллоидная химия и электрохимия. 2019. № 2. С. 307–312. DOI: 10.1134/S00444537190200.

19. Семченко И., Хахомов С., Самофалов А., Балмаков А. Метаматериалы и метаповерхности // Наука и инновации. 2020. № 8. С. 23–27.

20. Беушева О. С., Коренева Н. В., Беушев А. А. Изучение влияния морфологической структуры древесины на эксплуатационные характеристики плитного материала // Ползуновский вестник. 2022. № 3. С. 216–221. DOI: 10.25712/ASTU.2072-8921.2022.03.029. EDN TYORTX.

21. Chang S. [et al.] Solvent polarity and internal stresses control the swelling Behavior green wood during dehydration in organic solution // BioResources. 2012. № 7. Pp. 2418–2430.

© 2026 Авторы. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Об авторах:

Новиков Олег Николаевич, кандидат химических наук, ген. директор, ООО «Аусванд» (236011, Россия, г. Калининград, ул. Батальная, 104), e-mail: 81632648@mail.ru

Ван Елена Юрьевна, кандидат технических наук, доцент, Балтийский федеральный университет имени И. Канта (236016, Россия, г. Калининград, ул. А. Невского, 14), e-mail: evan@kantiana.ru.

Михайлов Владимир Геннадьевич, кандидат технических наук, доцент, Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева (650000, Россия, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28), e-mail: mvg.eohp@kuzstu.ru.

Заявленный вклад авторов:

Новиков Олег Николаевич – обзор соответствующей литературы, сбор и анализ данных, выводы, написание текста, постановка исследовательской задачи.

Ван Елена Юрьевна – научный менеджмент, концептуализация исследования.

Михайлов Владимир Геннадьевич – рецензирование и редактирование текста, научный менеджмент.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Original article

STUDY OF SWELLING OF WOOD AS A METAMATERIAL

Oleg N. Novikov ¹, Elena Yu. Van ^{2*}, Vladimir G. Mikhailov ³

¹ Ausvand LLC

² Immanuel Kant Baltic Federal University

³ T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University

* for correspondence: elenavan2007@yandex.ru



Article info

Received:

30 March 2026

Abstract.

The report is devoted to the study of the phenomenon of swelling of wood as a porous material.

Research in this area is relevant for calculating the behavior of wood as a structural material, for targeted modification of wood to obtain new composites and the use of wood as a metamaterial, including in electronics. A

Accepted for publication:
15 June 2026

Accepted:
01 July 2026

Keywords: wood, swelling, swelling, swelling agent, capillary forces, pressure swelling, dielectric constant, metamaterial

mathematical model of wood swelling under the action of capillary forces has been developed. Equations are derived in which the morphological and physico-chemical properties of wood are related to the value of the volumetric swelling coefficient. Based on experimental data, using the model, the values of the surface tension of wood in the tangential and radial directions are determined. Anisotropy in the radial and tangential directions is found. The model as a whole provides a phenomenological description of the process. The surface tension of organic swelling agents is close in magnitude. Whereas the dielectric constant has a wide range of values and is the second significant factor determining the amount of swelling. The dependence on surface tension is nonlinear. The role of dielectric constant in swelling is revealed. The linear correlation in the equations of dependence of the swelling coefficient on the dielectric properties of the swelling agent confirms the role of permittivity. The material is characterized by anisotropy in the magnitude of the dielectric constant and exhibits resonator properties in an alternating electric field. The presence of two biopolymers in the wood structure with very different properties, in particular the dielectric constant, defines wood as a composite, in the volume of which surfaces are formed at the boundary of phases with different polarities. At the same time, shielding these charges with salts reduces the strength and affects swelling. The strength is reduced, which means that the influence of electric charges is significant. Wood can be attributed to natural metamaterials or their predecessor. Studies of the properties of wood as an anisotropic dielectric with periodic morphology can be used in biomimetics to create new nature-like functional metamaterials with a given set of properties.

For citation: Novikov O.N., Van E.Yu., Mikhailov V.G. Study of swelling of wood as a metamaterial. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*=Bulletin of the Kuzbass State Technical University. 2026; 3(175):47-56. (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1999-4125-2026-3-47-56, EDN: CZFNMP

REFERENCES

1. Lin R.T. Wood as an orthotropic dielectric material. *Wood and Fiber*. 1973; 5:226-235.
2. Ahire D.V. Study of dielectric behavior of dry and moist acacia indica wood at x-band frequency. *International Journal of Physics and Mathematical Sciences*. 2013; 3(4):48-53. URL: <http://www.cibtech.org/jpms.htm> (date of access: 15.03.2026).
3. Kochetkova T.D., Suslyaev V.I., Volchikov S.I. Dielectric constant of coniferous wood species in the frequency range of 3-12 GHz. *Bulletin of SibSAU*. 2013; 5:101-104.
4. Hiriyama H., Kojiro K., Okahisa Y. [et al.] Combined analysis of the microstructure of wood swollen by water and/or ethanol through dynamic mechanical analysis and small-angle X-ray scattering. *Wood Science and Technology*. 2024; 58:1991-2006.
5. Chen Y., Shi T., Lyu J. [et al.] Swelling of Chinese fir in water-ethanol mixtures. *Wood Material Science & Engineering*. 2025; 6:1-7. DOI: 10.1080/17480272.2025.2522988.
6. Olmi R., Bini M., Ignesti A., Riminesi C. Dielectric Properties of Wood from 2 to 3 GHz. *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy*. 2000; 35:135-143. DOI: 10.1080/08327823.2000.11688430.
7. Kononov G.N., Zaitsev V.D. Wood as a Chemical Raw Material. History and Modernity. II. Anatomy of Wood as a Factor of Its Chemical Activity. *Forestry Bulletin*. 2020; 6:103-112. DOI: 10.18698/2542-1468-2020-6-103-112.
8. Glazkov S.S., Kozlov V.A., Pozhidaeva A.E., Rudakov O.B. Surface energy characteristics of composites based on natural polymers. *Sorption and chromatographic processes*. 2009; 9(1):58-66.
9. Gorbacheva G.A., Sanaev V.G., Belkovsky S.Yu. Characterization of the specific surface area of wood with the shape memory effect. *Forestry journal. Wood processing. Chemical technologies*. 2016; 3:76-87. DOI: 12737/21683.
10. Loskutov S.R., Shapchenkova O.A., Aniskina A.A., Pastori Z. Hygroscopic properties of hardwood. *Forestry Bulletin*. 2022; 2:92-102. DOI: 10.18698/2542-1468-2022-2-92-102.
11. Chubinsky A.N., Tambi A.A., Chubinsky M.A., Chazov K.V. Physics of wood: a tutorial on completing laboratory work. St. Petersburg: SPbGLTU; 2015. 67 p.
12. Brytkov E.V. Mechanics of composite materials. Saint Petersburg: Baltic State University; 2012. 74 p.
13. Chen Y., Shi T., Lyu J., Peng H., Zhan T. Swelling of Chinese fir in water-ethanol mixtures. *Wood Material Science & Engineering*. 2025; 6:1-7. DOI: 10.1080/17480272.2025.2522988.
14. Glebov I.T., Kuznetsova O.V. Physics of wood. Ekaterinburg, 2019. P. 11.
15. Hakam A., Alami Chantoufi N., El Imane N. Dielectric Properties of Atlas Cedar Wood at its Early Stage of Decay. *International Journal of*

Pharmacognosy and Phytochemical Research. 2017; 9:444-448.

16. Goreshnev M.A., Litvishko E.S., Lopatin V.V. Dielectric Properties of Birch Wood in the High-Frequency Range. *Russian Physics Journal*. 2016; 58:1297-1300. DOI: 10.1007/s11182-016-0646-6.

17. Var A.A., Kardaş İ. Changes in physical, mechanical, shrinking, and swelling properties of pine wood species treated with salt natural geothermal waters as environmentally safe resources. *Applied Ecology and Environmental Research*. 2019; 17:14053-14068. DOI: 10.15666/aecer/1706_1405314068.

18. Bogolitsyn K.G., Khviyuzov S.S., Volkov A.S. [et al.] Broadband dielectric spectroscopy of lignin. *Journal of Physical Chemistry. Colloid Chemistry and*

Electrochemistry. 2019; 2:307-312. DOI: 10.1134/S00444537190200.

19. Semchenko I., Khakhomov S., Samofalov A., Balmakov A. Metamaterials and metasurfaces. *Science and Innovation*. 2020; 8:23-27.

20. Beusheva O.S., Koreneva N.V., Beushev A.A. Study of the influence of the morphological structure of wood on the performance characteristics of board material. *Polzunovsky Vestnik*. 2022; 3:216-221. DOI: 10.25712/ASTU.2072-8921.2022.03.029. EDN: TYORTX.

21. Chang S. [et al.] Solvent polarity and internal stresses control the swelling Behavior of green wood during dehydration in organic solution. *BioResources*. 2012; 7:2418-2430.

© 2026 The Authors. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

The authors declare no conflict of interest.

About the authors:

Oleg N. Novikov, Candidate of Chemical Sciences, general director, Auswund Ltd (236011, Russia, Kaliningrad, Batalnaya Street, 104), e-mail: 81632648@mail.ru

Elena Iu. Van, Candidate of Technical Sciences, associate professor, Immanuel Kant Baltic Federal University (236016, Russia, Kaliningrad, 14 A. Nevsky str.), e-mail: evan@kantiana.ru

Vladimir G. Mikhailov, Candidate of Technical Sciences, associate professor, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University (650000, Russia, Kemerovo, Vesenniyaya street 28), e-mail: mvg.eohp@kuzstu.ru

Contribution of the authors:

Oleg N. Novikov – review of relevant literature, data collection and analysis, conclusions, writing, and formulation of the research problem.

Elena Iu. Van – research management, study conceptualization.

Vladimir G. Mikhailov – review and editing of the text, research management.

All authors have read and approved the final manuscript.

