



УДК 621.3.029.6:674.8
DOI: 10.17238/issn0536-1036.2017.3.152

ОБОСНОВАНИЕ МЕХАНИЗМА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ КОМПОНЕНТОВ ДРЕВЕСИНЫ С ВЛАГОЙ

В.И. Врублевская, д-р техн. наук, проф.

В.О. Матусевич, канд. техн. наук

В.В. Кузнецова, ассист.

Белорусский государственный университет транспорта, ул. Кирова, д. 34, г. Гомель, Республика Беларусь, 246653; e-mail: vmatusevich@yandex.ru

Физико-механические свойства древесины зависят от количества влаги, находящейся в клеточных стенках и связанной с ее компонентами. Однако до сих пор нет четкого представления о местонахождении связанной влаги в древесинном веществе клеточных стенок. Цель исследования состояла в том, чтобы теоретически обосновать сорбционную способность компонентов древесины и смоделировать данный процесс на наноуровне с учетом размеров молекул и атомов. Для моделирования был взят основной и наиболее изученный компонент древесины – целлюлоза. Разработанная нами пространственная сферическая модель макромолекулы целлюлозы и расположение ее звеньев в элементарной ячейке позволили объяснить механизм поглощения влаги клеточной стенкой древесины на молекулярном уровне. Гидроксильные группы макромолекул целлюлозы и молекул воды имеют одну природу, так как электроотрицательность составляющих их атомов совпадает по значению, что позволяет им легко образовывать межмолекулярные водородные связи в одном слое и между соседними слоями в кристалле. Водородная связь по своему характеру является электростатической. Энергия ее примерно в 10 раз меньше энергии межатомных ковалентных связей. Электроотрицательности ОН-групп молекул целлюлозы и воды совпадают по значимости, поэтому при определенных энергетических условиях окружающей среды молекула воды, разрывая межмолекулярную водородную связь молекулы целлюлозы, тут же замыкает ее на себя. Точно также молекула воды покидает водородную связь, если она обладает достаточной кинетической энергией, чтобы сдвинуться с места. Проникновение молекул воды в кристалл целлюлозы происходит путем перемещения их из одной водородной связи в другую. Молекулы воды удерживаются в этих связях только за счет своей электроотрицательности. Таким образом, механизм взаимодействия микрокристаллита целлюлозы с влагой определяется тем, что молекулы воды удерживаются в водородных связях гидроксильных групп глюкопиранозных звеньев макромолекулы целлюлозы и имеют возможность перемещаться между ними. При внедрении молекулы воды в водородную связь расстояние между ОН-группами целлюлозы увеличивается на ее размер, и при влагопоглощении разбухание кристаллической структуры целлюлозы составляет около 12 %. Молекулы воды образуют водородные связи с лигнином и гемицеллюлозой так же, как с целлюлозой. Расчет, произ-

Для цитирования: Врублевская В.И., Матусевич В.О., Кузнецова В.В. Обоснование механизма взаимодействия компонентов древесины с влагой // Лесн. журн. 2017. № 3. С. 152–163. (Изв. высш. учеб. заведений). DOI: 10.17238/issn0536-1036.2017.3.152

веденный через молекулярные массы элементарных звеньев макромолекул, показывает, что максимальное количественное содержание физически связанной влаги в древесине составляет около 30 %, что соответствует многочисленным экспериментальным данным других исследователей.

Ключевые слова: древесина, целлюлоза, лигнин, абсорбция, связанная влага, водородная связь, микрокристаллит, электроотрицательность.

Введение

Строение древесины и ее компонентов, причины разбухания и усушки древесины изучались многими учеными. Но все предположения о нахождении влаги (в клеточных стенках) основаны на гипотезах. Например, А.М. Боровиков и Б.Н. Уголев утверждают: «Разбухание древесины вызвано тем, что связанная вода, размещаясь в клеточных стенках, раздвигает микрофибриллы» [1, с. 134]; Б.Н. Уголев – «Усушку вызывает удаление адсорбционной воды, находящейся внутри клеточной стенки между фибриллами» [12, с. 60]; Б.С. Чудинов: «...связанная влага в древесине находится в пленочном состоянии» [14, с. 4]; П.С. Серговский: «Адсорбционная влага поглощается поверхностью элементарных фибрилл и микрофибрилл и образует между ними непрерывные прослойки...» [11, с. 28].

Связанная влага в древесине находится в метастабильном состоянии с влажностью окружающей среды – воздуха, который заполняет все ее микрополости.

Цель работы – теоретическое обоснование сорбционной способности компонентов древесины и моделирование данного процесса на наноуровне с учетом размеров молекул и атомов.

Для моделирования был взят основной и наиболее изученный компонент древесины – целлюлоза ($C_6H_{10}O_5$)_n, степень полимеризации которой составляет в среднем от 50...200 до 5 000...10 000. Для всей целлюлозы, содержащейся в клеточных стенках, характерна высокая степень ориентации параллельных друг другу молекул. Зоны с параллельным расположением молекул называют мицеллами, или кристаллитами [10].

Молекулы целлюлозы полярны, что обусловлено разностью электроотрицательностей составляющих их атомов и позволяет им образовывать водородные связи [3, 9].

При построении модели использованы следующие значения размеров атомов и молекул, составляющих структурные единицы моделируемых объектов, нм: водород (H) – 0,066; кислород (O) – 0,132; вода (H₂O) – 0,200; углерод (C) – 0,154 [2, 17, 18].

Результаты моделирования

Разработанная нами пространственная сферическая модель макромолекулы целлюлозы [11, 12] и расположение ее звеньев в элементарной ячейке соответствуют увеличенной атомной микроскопической топографии кристаллических плоскостей целлюлозы, полученной авторами [15, 16]. Модель позволяет объяснить механизм поглощения влаги клеточной стенкой древесины на молекулярном уровне.

Водородная связь образуется между молекулами с активными атомами водорода и молекулами, содержащими электроотрицательные атомы, которые имеют неподеленную электронную пару. Активными называются атомы водорода, связанные с другими атомами сильно полярной ковалентной связью, например Н–О; Н–S; Н–N и т.д. Эти атомы водорода обнаруживают остаточное сродство к электрону, за счет которого они образуют дополнительную связь с атомом.

Связанная влага находится в клеточной стенке в межмолекулярных связях с компонентами древесины. Представленная пространственная сферическая модель макромолекулы целлюлозы, разработанная нами [11, 12], и расположение ее звеньев в кристалле (рис. 1) позволяют проанализировать его

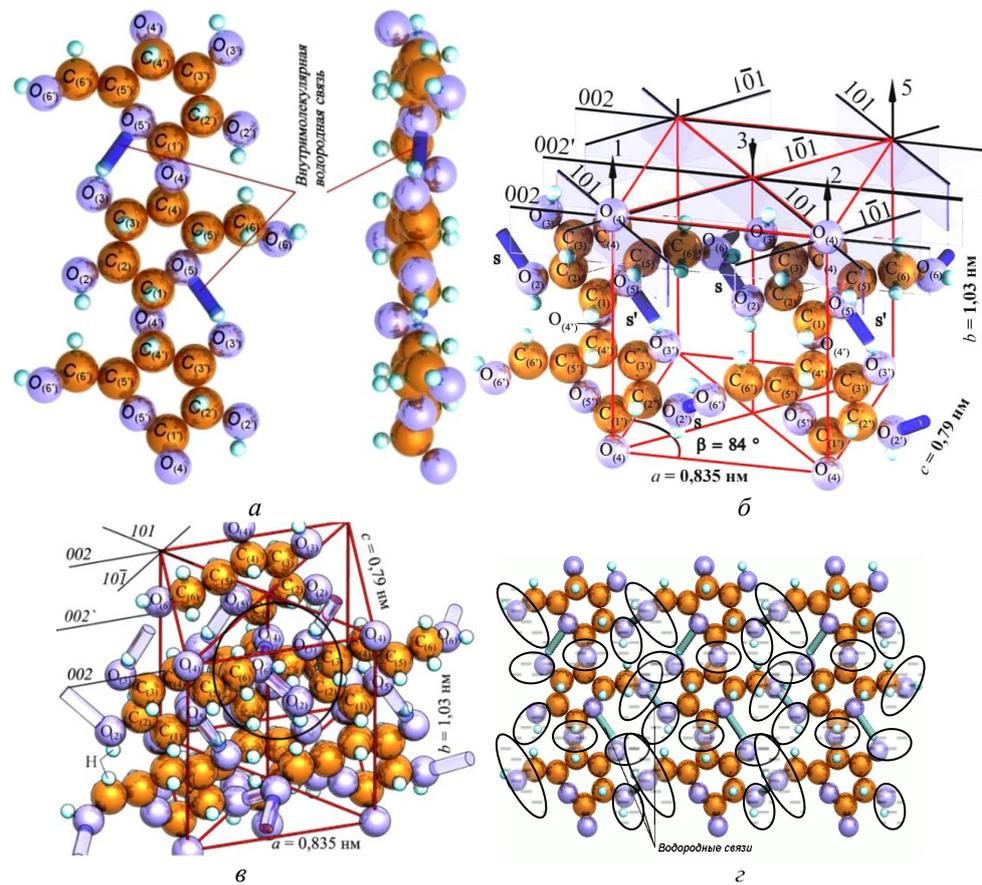


Рис. 1. Сферическая модель макромолекулы целлюлозы (а), плоскости кристаллической решетки элементарной ячейки (б), расположение звеньев решетки в кристалле (в) и области, образуемые атомами с разными значениями электроотрицательностей, действующих в молекулах целлюлозы (з)

структурные изменения при абсорбции молекул воды и объяснить механизм поглощения влаги клеточной стенкой древесины.

Имеющиеся в кристаллической целлюлозе свободные межмолекулярные пространства достаточны, чтобы молекулы воды могли проникать из одного слоя в следующий слой. Однако этого не происходит по причине полярности молекул целлюлозы.

Атомы в макромолекуле целлюлозы электронейтральны. Однако атом кислорода имеет две неподеленные электронные пары, которые своей несимметричностью обеспечивают ему высокую электроотрицательность. Кислород, смещая электронную плотность атома водорода, компенсирует свою электроотрицательность только частично с образованием отрицательного заряда, при этом атом водорода в связи Н–О имеет положительный центр заряда. Образуется сетка, которая является барьером для молекул воды (рис. 1, *з*).

Следовательно, несвязанные молекулы воды в микрокристалле целлюлозы отсутствуют вследствие действия в нем сил, образуемых за счет различий электроотрицательностей, создаваемых атомами кислорода.

С помощью мультиплицирования макромолекулы целлюлозы построена пространственная модель микрокристалла целлюлозы (рис. 2), на которой отчетливо видно его слоистое строение, аналогичное предложенному в работах [15, 16].

Гидроксильные группы макромолекул целлюлозы и молекул воды имеют одну природу, что позволяет им легко об-

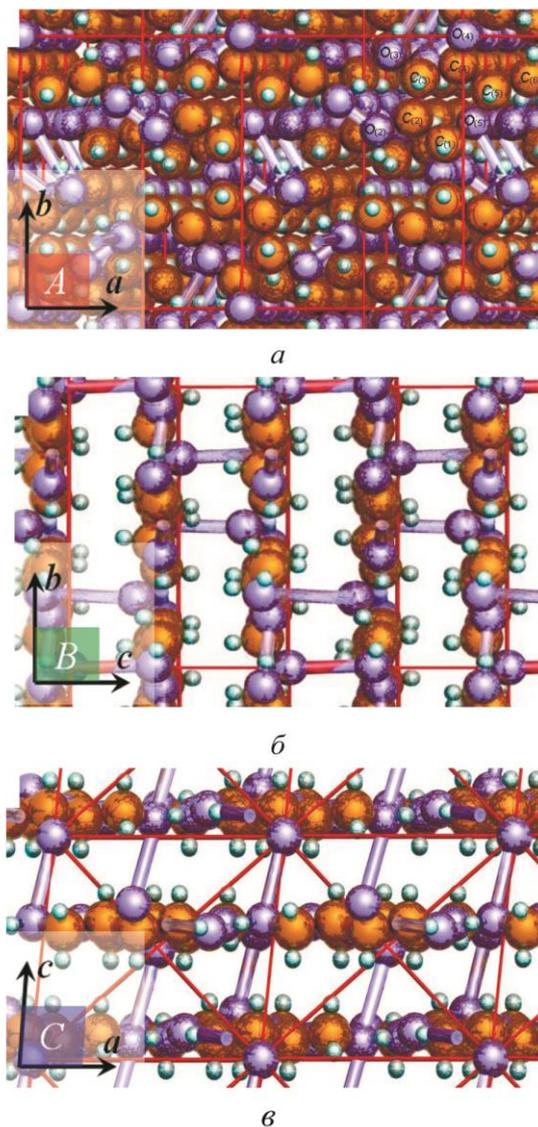


Рис. 2. Слоистое строение микрокристалла целлюлозы: *a* – вид в плоскости *ab* (фронтальный); *б* – вид в плоскости *bc* (сбоку); *в* – вид в плоскости *ac* (сверху)

разовывать межмолекулярные водородные связи в одном слое (002) и между соседними слоями (002–002') (см. рис. 1, *в*). Образование в ячейке целлюлозы водородных связей с молекулой воды показано на рис. 3 [5].

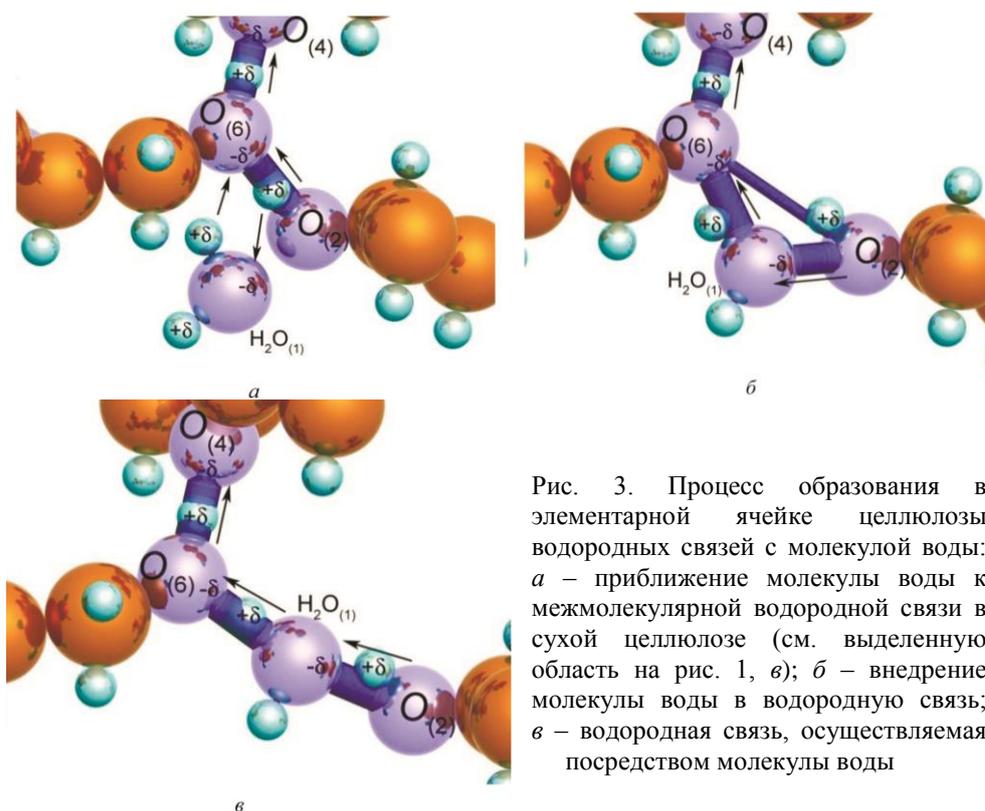


Рис. 3. Процесс образования в элементарной ячейке целлюлозы водородных связей с молекулой воды: *а* – приближение молекулы воды к межмолекулярной водородной связи в сухой целлюлозе (см. выделенную область на рис. 1, *в*); *б* – внедрение молекулы воды в водородную связь; *в* – водородная связь, осуществляемая посредством молекулы воды

Водородная связь (обозначена на рис. 3 стрелками) по своему характеру является электростатической. Энергия ее составляет 4...33 кДж/моль, что примерно в 10 раз меньше межатомных (ковалентных) связей (табл. 1) [3]. Тем не менее, она в значительной степени определяет как физические, так и химические свойства соединений.

Т а б л и ц а 1

Энергия межатомных (ковалентных) связей				
Вид связи	C–C	C–O	H–C	H–O
Энергия, кДж/моль	348	344	415	466

Электроотрицательности OH-групп молекул целлюлозы и воды совпадают по значимости, поэтому молекула воды, разрывая межмолекулярную водородную связь, внедряется в нее и тут же замыкает на себя (рис. 3).

Однако Н-взаимодействие является электростатическим, и магнитные свойства атома распространяются не в одном направлении, а в пространстве. Следовательно, атом кислорода молекулы воды, приближающейся к водородной связи $O_{(2)}H...O_{(6)}$ (рис. 3, *a*), будет оказывать на атом водорода этой группы точно такое же воздействие, как на атом $O_{(6)}$ (рис. 3, *б*). При этом прямая водородная связь $O_{(2)}H...O_{(6)}$ перестанет существовать, но будет осуществляться посредством молекулы воды $O_{(2)}H...OH_2...O_{(6)}$ (рис. 3, *в*). Этот процесс назван нами «внедрением», поскольку как такового разрыва водородной связи не происходит.

Точно также молекула воды покидает водородную связь $O_{(2)}H...OH_2...O_{(6)}$, если она обладает достаточной кинетической энергией, чтобы сдвинуться с места, и Н-связь $O_{(2)}H...O_{(6)}$ восстанавливается (рис. 4).

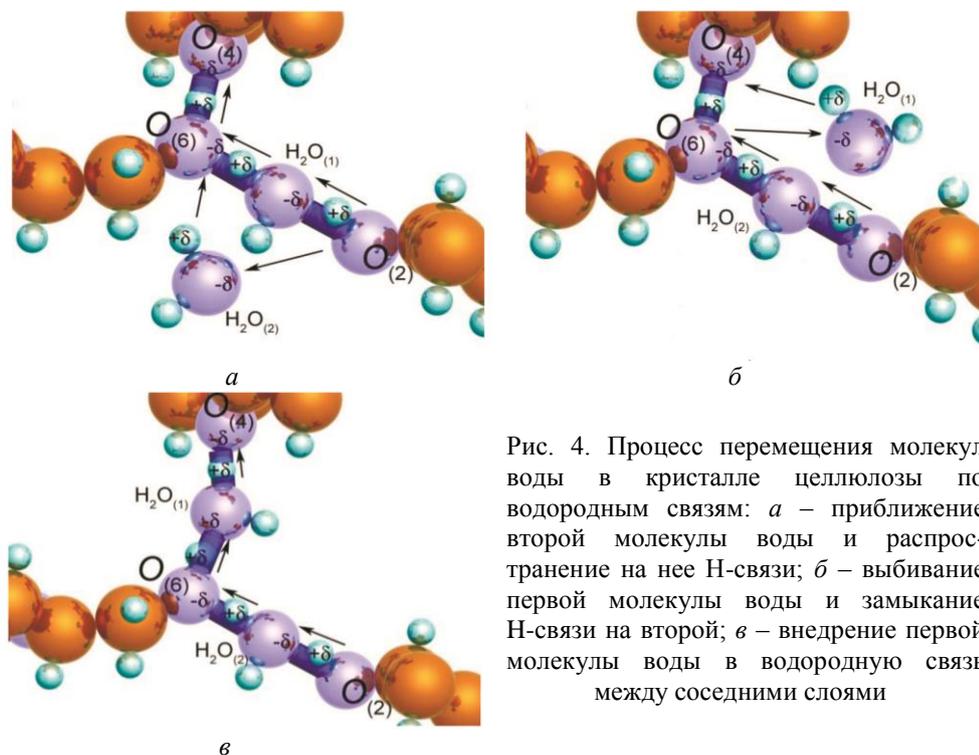


Рис. 4. Процесс перемещения молекул воды в кристалле целлюлозы по водородным связям: *a* – приближение второй молекулы воды и распространение на нее Н-связи; *б* – выбивание первой молекулы воды и замыкание Н-связи на второй; *в* – внедрение первой молекулы воды в водородную связь между соседними слоями

Если к первой молекуле воды $H_2O_{(1)}$, находящейся в Н-связи (рис. 4, *a*), приближается вторая молекула воды $H_2O_{(2)}$, обладающая определенной скоростью и, соответственно, кинетической энергией, то в зоне их взаимодействия наблюдаются следующие явления:

распространение Н-связи как на $H_2O_{(1)}$, так и на $H_2O_{(2)}$ (рис. 4, *a*);

передача кинетической энергии при соударении от $H_2O_{(2)}$ к $H_2O_{(1)}$, которая выходит из Н-связи $O_{(2)}H...O_{(6)}$ и движется к связи $O_{(6)}H...O_{(4)}$ (рис. 4, *б*);

внедрение $H_2O_{(1)}$ в водородную связь $O_{(6)}H \dots O_{(4)}$ между соседними слоями (рис. 4, в).

Таким образом, проникновение молекул воды в кристалл целлюлозы происходит путем перемещения их из одной водородной связи в другую. Молекулы воды удерживаются в этих связях только за счет своей электроотрицательности.

Механизм взаимодействия микрокристаллита целлюлозы с влагой определяется тем, что молекулы воды удерживаются в его водородных связях гидроксильных групп глюкопиранозных звеньев и имеют возможность перемещаться между ними с одного слоя в соседний [5].

При внедрении молекулы воды в водородную связь (рис. 4, в) расстояние между OH -группами $O_{(2)}H \rightarrow O_{(6)}H$ и $O_{(6)}H \rightarrow O_{(4)}$ увеличивается на размер (диаметр) молекулы воды: $d_{H_2O} = 0,2$ нм. При этом разбухание кристаллической структуры целлюлозы составляет около 12 % (рис. 5) [5].

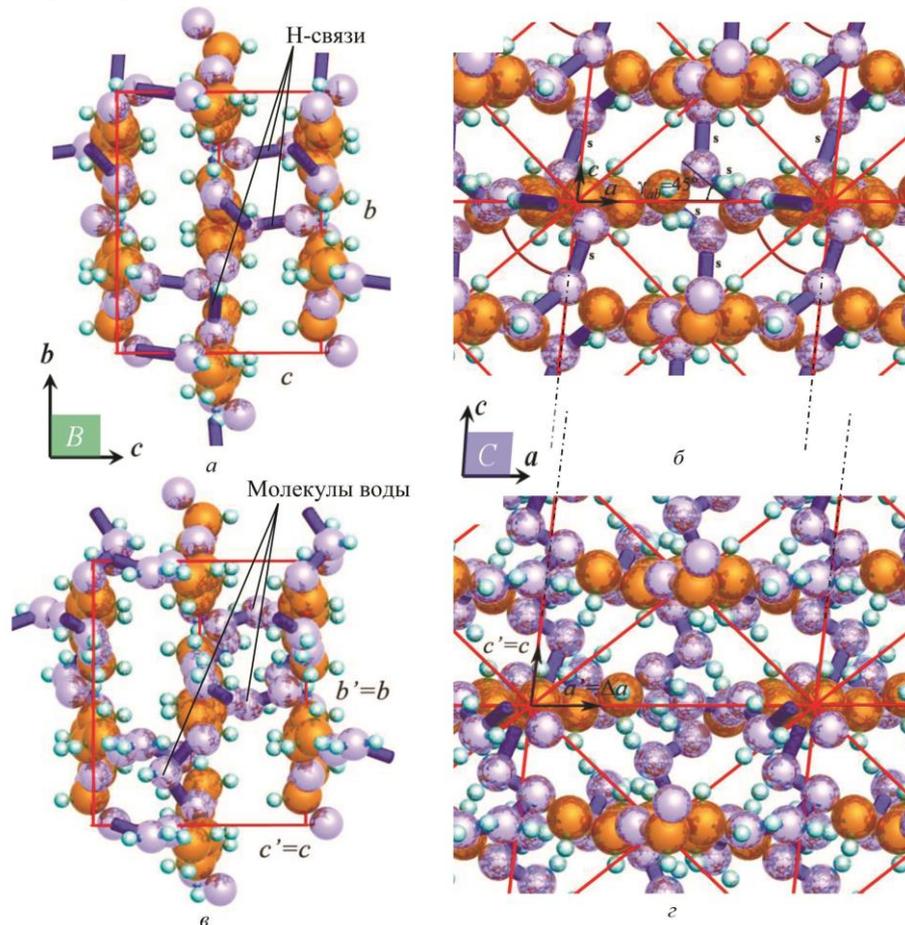


Рис. 5. Межмолекулярные водородные связи в сухой целлюлозе (а, б) и при абсорбции молекул воды (в, з)

Нами принято допущение, что молекулы воды образуют водородные связи с лигнином и гемицеллюлозами так же, как с целлюлозой. Соответственно, максимальное количественное содержание физически связанной влаги в древесине определяется ее химическим составом.

Расчет предела поглощения влаги произведен через молекулярные массы M_r элементарных звеньев макромолекул (целлюлозы, гемицеллюлозы и лигнина). Так как каждое элементарное звено природного полимера может присоединять конечное число молекул воды, то количество всей связанной воды в компонентах древесного вещества будет пропорционально суммарному количеству молекул воды, присоединенных одной единицей каждого компонента [6, 13].

Молекулярная масса глюкопиранозного звена макромолекулы целлюлозы M_r ($C_6H_{10}O_5$) = 162,135, молекулярная масса воды M_r (H_2O) = 18,015. Глюкопиранозное звено макромолекулы целлюлозы может образовать 3 водородные связи с помощью гидроксильных групп $O_{(2)}H$, $O_{(3)}H$ и $O_{(6)}H$, а следовательно, может присоединить 3 молекулы H_2O . Таким образом, доля присоединенной воды к массе глюкопиранозного звена составит 0,333 (33,3 %).

Однако химический состав древесины различных пород, произрастающих в различных условиях, сильно отличается (табл. 2, 3) [7].

Т а б л и ц а 2

Максимальное содержание физически связанной влаги

Порода древесины	Химический состав древесины, %					Количество поглощенной компонентом влаги, %				Всего поглощенной влаги, %
	Зола и экстрактивные вещества	Целлюлоза	Лигнин	Пентозаны	Гексозаны	Целлюлоза	Лигнин	Пентозаны	Гексозаны	
Береза пушистая (<i>Betula pubescens</i>)	1,65	45,80	21,20	22,00	4,00	15,27	4,51	9,00	1,33	30,11
Береза бородавчатая (<i>Betula verrucosa</i>)	6,28	31,00	19,50	28,30	4,90	10,33	4,15	11,58	1,63	27,70
Осина (<i>Populus tremula</i>)	4,36	47,20	21,30	22,80	0,00	15,73	4,54	9,33	0,00	29,60
Сосна (<i>Pinus silvestris</i>)	6,90	51,90	28,20	11,20	8,60	17,30	6,01	4,58	2,87	30,75
Ель обыкновенная (<i>Picea excelsa</i>)	3,10	52,40	28,10	10,00	13,50	17,47	5,98	4,09	4,50	32,04

Примечание. Экстрактивные вещества гидрофобны.

Т а б л и ц а 3

Основные характеристики компонентов древесины

Показатель	Целлюлоза	Лигнин	Пентозаны	Гексозаны
Молекулярная масса M_r	162,135	169,191	132,110	162,135
Количество водородных связей мономерной структурной единицы	3	2	33	3
Массовая доля воды в компоненте, %	33,33	21,30	40,91	33,33

В древесине березы, произрастающей в Республике Беларусь, содержание целлюлозы около 41 %, т. е. ее целлюлоза может связать только $0,333 \cdot 41 \% = 13,7 \%$ воды.

Аналогично ведется расчет для гемицеллюлоз и лигнина. При этом фенолпропановая структурная единица лигнина $[C_9H_{13}O_3]_n$ может связать 2 молекулы воды [4, 10]. Гемицеллюлоза представляет собой смесь полисахаридов (гексозанов $[C_6H_{10}O_5]_n$ и пентозанов $[C_5H_8O_4]_n$), элементарные звенья которых содержат 2 или 3 свободные ОН-группы [10].

Полученный теоретический результат влагопоглощения для различных пород древесины, химический состав которых приведен в табл. 2, соответствует многочисленным экспериментальным данным [8, 12, 14].

Вышесказанное свидетельствует о том, что только связанная вода (молекулы воды, внедрившиеся в водородные связи компонентов древесины) вызывает ее разбухание и обуславливает изменение ее физико-механических свойств.

Выводы

1. Механизм взаимодействия целлюлозы, лигнина и гемицеллюлоз с влагой определяется тем, что молекулы воды удерживаются за счет межмолекулярных водородных связей и имеют возможность перемещаться между ними в поперечном направлении в зависимости от энергетического состояния окружающей среды, что обуславливает метастабильное состояние древесины.

2. При внедрении молекулы воды в водородную связь расстояние между макромолекулами увеличивается, что приводит к разбуханию кристаллической структуры целлюлозы на 12 %.

3. Максимальное количественное содержание физически связанной влаги в древесине составляет около 30 % и определяется химическим составом древесного вещества при образовании предельного числа водородных связей компонентов древесины с молекулами воды.

4. Полученные результаты свидетельствуют о том, что только связанная вода (молекулы воды, внедрившиеся в водородные связи компонентов древесины) вызывает разбухание древесины и способствует изменению ее физико-механических свойств.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Боровиков А.М., Уголев Б.Н. Справочник по древесине. М.: Лесн. пром-сть, 1989. 296 с.
2. Зоммер К., Вюни К.Х., Цеттлер М. Химия: справ. / под общ. ред. Р.А. Лидина. 3-е изд. М.: Дрофа, 2003. 384 с.
3. Левитина Т.П. Справочник по органической химии: учеб. пособие. СПб.: Паритет, 2002. 448 с.
4. Лигнины (структура, свойства и реакции) / под ред. К.В. Сарканена, К.Х. Людвига; пер. с англ.: А.В. Оболенской, Г.С. Чиркина, В.П. Щеголева под ред. В.М. Никитина. М.: Лесн. пром-сть, 1975. 629 с.

5. Матусевич В.О. Структурные изменения клеточных стенок древесины и их роль в интенсификации СВЧ-сушки древесных вкладышей подшипников скольжения: дис. ... канд. техн. наук. Гомель, 2011. 130 с.

6. Невзорова А.Б., Врублевский В.Б., Матусевич В.О., Врублевская В.И. Подшипники скольжения самосмазывающиеся на основе модифицированной древесины (теория, технология и практика): моногр. Гомель: БелГУТ, 2011. 254 с.

7. Никитин В.М., Оболенская А.В., Щеголев В.П. Химия древесины и целлюлозы. М.: Лесн. пром-сть, 1978. 368 с.

8. Перелыгин Л.М., Уголев Б.Н. Древесиноведение: учеб. для лесотехн. техникумов. М.: Лесн. пром-сть, 1971. 286 с.

9. Рабинович В.А., Хавин З.Я. Краткий химический справочник. Л.: Химия, 1977. 376 с.

10. Роговин З.А., Шорыгина Н.Н. Химия целлюлозы и ее спутников. М.; Л.: Госхимиздат, 1953. 679 с.

11. Серговский П.С., Рассев А.И. Гидротермическая обработка и консервирование древесины: учеб для вузов. 4-е изд., испр. и доп. М.: Лесн. пром-сть, 1987. 360 с.

12. Уголев Б.Н. Древесиноведение и лесное товароведение: учеб. Изд. 2-е, стер. М.: Академия, 2006. 270 с.

13. Химия древесины / под ред. Б.Л. Браунинга. М.: Лесн. пром-сть, 1967. 415 с.

14. Чудинов Б.С. Вода в древесине: моногр. Новосибирск: Наука, 1984. 272 с.

15. Baker A.A., Helbert W., Sugiyama J., Miles M.J. Surface Structure of Native Cellulose Microcrystals by AFM // Applied Physics. A: Materials Science and Processing. 1998. Vol. 66, iss. 7. Pp. 559–563.

16. Horikawa Y., Itoh T., Sugiyama J. Preferential Uniplanar Orientation of Cellulose Microfibrils Reinvestigated by the FTIR Technique // Cellulose. 2006. Vol. 13, iss. 3. Pp. 309–316.

17. O'Sullivan A.C. Cellulose: the Structure Slowly Unravels // Cellulose. 1997. No. 4. Pp. 173–207.

18. Zugenmaier P. Crystalline Cellulose and Cellulose Derivatives: Characterization and Structures. Berlin: Springer, 2008. 285 p.

Поступила 26.01.17

UDC 621.3.029.6:674.8

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2017.3.152

Substantiation of the Interaction Mechanism of Wood Components and Water

V.I. Vrublevskaya, Doctor of Engineering Sciences, Professor

V.O. Matusevich, Candidate of Engineering Sciences

V.V. Kuznetsova, Assistant

Belarusian State University of Transport, ul. Kirova, 34, Gomel, 246653, Republic of Belarus; e-mail: vmatusevich@yandex.ru

For citation: Vrublevskaya V.I., Matusevich V.O., Kuznetsova V.V. Substantiation of the Interaction Mechanism of Wood Components and Water. *Lesnoy zhurnal* [Forestry journal], 2017, no. 3, pp. 152–163. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2017.3.152

The physical and mechanical properties of wood depend on the amount of moisture in the cell walls, associated with its components. However, we still have no clear idea of the location of bound moisture in the wood substance of the cell walls. The goal of research is to substantiate theoretically the sorption ability of wood components and to simulate this process at the nanoscale, taking into account the size of molecules and atoms. We consider cellulose as the main and most studied component of wood for modeling. The developed spatial spherical model of the cellulose macromolecule and the arrangement of its building blocks in the unit cell make it possible to explain the mechanism of moisture absorption by the cell wall of wood at the molecular level. The hydroxyl groups of cellulose macromolecules and water molecules are of one nature, since the electronegativity of their constituent atoms is the same, which allows them to form easily the intermolecular hydrogen bonds in one layer and between adjacent layers in the crystal. The hydrogen bond is electrostatic in nature. Its energy is about 10 times less than the energy of interatomic covalent bonds. The electronegativity of OH-groups of cellulose and water molecules coincide in importance; therefore, under certain energy conditions of the environment, the water molecule, breaking the intermolecular hydrogen bond of the cellulose molecule, immediately closes it on itself. Similarly, the water molecule leaves the hydrogen bond, if it has sufficient kinetic energy to move. The penetration of water molecules into a cellulose crystal occurs by moving them from one hydrogen bond to another. Water molecules are retained in these bonds only due to their electronegativity. Thus, the interaction mechanism of cellulose microcrystalline with moisture is determined by the fact that water molecules are retained in the hydrogen bonds of the hydroxyl groups of the glucopyranose units of the cellulose macromolecule and are able to move between them. When the water molecule is introduced into the hydrogen bond, the distance between the OH-groups of cellulose is increased by its size; and at a moisture absorption the swelling of the cellulose crystalline structure is about 12 %. Water molecules form hydrogen bonds with lignin and hemicellulose in the same way as with cellulose. The calculation, made through the molecular masses of building blocks of macromolecules, demonstrates, that the maximum quantitative content of physically bound moisture in wood is about 30 %, which corresponds to numerous experimental data of other researchers.

Keywords: wood, cellulose, lignin, absorption, bound moisture, hydrogen bond, microcrystallite, electronegativity.

REFERENCES

1. Borovikov A.M., Ugolev B.N. *Spravochnik po drevesine* [Wood Reference]. Moscow, 1989. 296 p.
2. Sommer K., Wunsch K.-H., Zettler M. *Wissensspeicher Chemie*. Berlin, 1998. 384 p.
3. Levitina T.P. *Spravochnik po organicheskoy khimii* [Handbook of Organic Chemistry]. Saint Petersburg, 2002. 448 p.
4. Sarkanen K.V., Ludwig C.H., eds. *Lignins: Occurrence, Formation, Structure and Reactions*. New York, 1971. 916 p.
5. Matusevich V.O. *Strukturnye izmeneniya kletochnykh stenok drevesiny i ikh rol' v intensivifikatsii SVCh-sushki drevesnykh vkladyshey podshipnikov skol'zheniya*: dis. ... kand. tekhn. nauk [Structural Changes in the Cell Walls of Wood and Their Role in the Intensification of Microwave Drying of Wood Plain Bearing Liners: Cand. Eng. Sci. Diss.]. Gomel, 2011. 130 p.

6. Nevzorova A.B., Vrublevskiy V.B., Matusevich V.O., Vrublevskaya V.I. *Podshipniki skol'zheniya samosmazyvayushchiesya na osnove modifitsirovannoy drevesiny (teoriya, tekhnologiya i praktika)* [Self-Lubricating Plain Bearings on the Basis of Modified Wood (Theory, Technology and Practice)]. Gomel, 2011. 254 p.
7. Nikitin V.M., Obolenskaya A.V., Shchegolev V.P. *Khimiya drevesiny i tsellyulozy* [Chemistry of Wood and Cellulose]. Moscow, 1978. 368 p.
8. Perelygin L.M., Ugolev B.N. *Drevesinovedenie* [Wood Science]. Moscow, 1971. 286 p.
9. Rabinovich V.A., Khavin Z.Ya. *Kratkiy khimicheskiy spravochnik* [Brief Chemical Handbook]. Leningrad, 1977. 376 p.
10. Rogovin Z.A., Shorygina N.N. *Khimiya tsellyulozy i ee sputnikov* [Chemistry of Cellulose and Its Satellites]. Moscow; Leningrad, 1953. 679 p.
11. Sergovskiy P.S., Rassev A.I. *Gidrotermicheskaya obrabotka i konservirovanie drevesiny* [Hydrothermal Processing and Preserving of Wood]. Moscow, 1987. 360 p.
12. Ugolev B.N. *Drevesinovedenie i lesnoe tovarovedenie* [Wood Science and Forest Commodity Science]. Moscow, 2006. 270 p.
13. Browning B.L., ed. *The Chemistry of Wood*. New York, 1963. 689 p.
14. Chudinov B.S. *Voda v drevesine* [Water in Wood]. Novosibirsk, 1984. 272 p.
15. Baker A.A., Helbert W., Sugiyama J., Miles M.J. Surface Structure of Native Cellulose Microcrystals by AFM. *Applied Physics. A: Materials Science and Processing*, 1998, vol. 66, iss. 7, pp. 559–563.
16. Horikawa Y., Itoh T., Sugiyama J. Preferential Uniplanar Orientation of Cellulose Microfibrils Reinvestigated by the FTIR Technique. *Cellulose*, 2006, vol. 13, iss. 3, pp. 309–316.
17. O'Sullivan A.C. Cellulose: the Structure Slowly Unravels. *Cellulose*, 1997, no. 4, pp. 173–207.
18. Zugenmaier P. *Crystalline Cellulose and Cellulose Derivatives: Characterization and Structures*. Berlin, 2008. 285 p.

Received on January 26, 2017
