

Движение маловязкой жидкости в пористой и капиллярной структуре материала древесины

С.М. Базаров^{1а}, В.А. Соколова^{2б}, Ю.И. Беленький^{1с}, С.А. Угрюмов^{2д}

¹ Институт технологических машин и транспорта леса Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета им. С.М. Кирова, Институтский пер., 5, Санкт-Петербург, Россия

² Высшая школа технологии и энергетики Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна, ул. Ивана Черных, 4, Санкт-Петербург, Россия

^а s.bazarow@yandex.ru, ^б sokolova_vika@inbox.ru, ^с 2000klp@gmail.com, ^д ugr-s@yandex.ru

^а <https://orcid.org/0000-0001-6880-445X>, ^б <https://orcid.org/0000-0002-8077-3542>,

^с <https://orcid.org/0000-0001-6880-445X>, ^д <https://orcid.org/0000-0003-1605-5834>

Статья поступила 04.09.2023, принята 19.09.2023

В статье древесина рассмотрена как природный полимер, для которого характерны упругие, высокоэластичные и вязкотекучие деформации. Деформациям соответствуют стеклообразное, высокоэластичное и вязкотекучее состояния. В работе рассматриваются методы воздействия акустических колебаний. В термоакустических полях материал древесины переходит из твердого состояния в текучее. Описывается физическая сущность ультразвуковых процессов. Рассмотрена клапанная модель строения нативной целлюлозы. Изучены надмолекулярная структура и реакционная способность целлюлозы. Изучены три релаксационных состояния полимеров. Представлена сравнительная оценка влияния различных факторов на скорость гидролиза целлюлозы. Сделан вывод о том, что высокочастотное озвучивание древесного материала приводит к фибриллярному расширению волокон древесины и способствует переходу полимера в вязкотекучее состояние. Представлено уравнение смещения для бегущей акустической волны. Получено уравнение для вязкой среды амплитуды поглощения акустических колебаний. Математически описана диссипация кинетической энергии акустической волны при ее движении в вязкой среде. Получено движение маловязкой жидкости в круглом капилляре. Разработана математическая модель движения ультразвука в древесине с учетом реологических характеристик пород древесины.

Ключевые слова: акустические колебания; сжатие частиц; энергия; деревообработка; реология; капиллярная структура.

Movement of a low-viscosity liquid in the porous and capillary structure of wood material

S.M. Bazarov^{1а}, V.A. Sokolova^{2б}, Yu.I. Belenky^{1с}, S.A. Ugryumov^{2д}

¹ Institute of Technological Machines and Forest Transport of St. Petersburg State Forest Technical University named after S.M. Kirov; 5, Institutsky Per., St. Petersburg, Russia

² Higher School of Technology and Energy of St. Petersburg State University of Industrial Technologies and Design; 4, Ivan Chernykh St., St. Petersburg, Russia

^а sokolova_vika@inbox.ru, ^б s.bazarow@yandex.ru, ^с 2000klp@gmail.com, ^д ugr-s@yandex.ru

^а <https://orcid.org/0000-0001-6880-445X>, ^б <https://orcid.org/0000-0002-8077-3542>,

^с <https://orcid.org/0000-0001-6880-445X>, ^д <https://orcid.org/0000-0003-1605-5834>

Received 04.09.2023, accepted 19.09.2023

In the article, wood is considered as a natural polymer, which is characterized by elastic, highly elastic and ductile deformations. Deformations correspond to glassy, highly elastic and viscous states. The paper considers methods of exposure to acoustic vibrations. In thermo-acoustic fields, wood material changes from a solid to a fluid state. The physical essence of ultrasonic processes is described. The valve model of the structure of native cellulose is considered. The supramolecular structure and reactivity of cellulose have been studied. Three relaxation states of polymers have been studied. A comparative assessment of the influence of various factors on the rate of cellulose hydrolysis is presented. It is concluded that high-frequency sonication of wood material leads to fibrillar expansion of wood fibers and promotes the transition of the polymer to a viscous-flow state. A displacement equation for a traveling acoustic wave is presented. An equation for a viscous medium for the absorption amplitude of acoustic vibrations is obtained. The dissipation of the kinetic energy of an acoustic wave during its motion in a viscous medium is mathematically described. The motion of a low-viscosity liquid in a round capillary has been obtained. A mathematical model of the motion of ultrasound in wood has been developed, taking into account the rheological characteristics of wood species.

Key words: acoustic vibrations; particle compression; energy; woodworking; rheology; capillary structure.

Введение. Древесина обладает сложной структурой и механическими свойствами, которые связаны с ее полимерной природой. Деформационные свойства древесины могут быть описаны с помощью реологической модели, которая представляет собой комбинацию моделей тел Гука и Кельвина [1].

Модели тел Гука и Кельвина являются основными моделями для описания вязкоупругих и вязкотекучих материалов соответственно.

Модель тела Гука описывает упругое поведение материала и позволяет предсказывать его возвращение к исходной форме после прекращения воздействия внешней силы. Это соответствует упругой деформации древесины.

Модель тела Кельвина описывает вязкотекучее поведение материала и его способность деформироваться с течением времени под постоянной силой. Это соответствует вязкотекучим свойствам древесины.

Комбинация этих двух моделей позволяет описать переходный режим между упругим и вязкотекучим состоянием, которое наблюдается в древесине при воздействии высокоградиентных термоакустических полей.

Исследования древесины в древесиноведении позволяют более глубоко понять ее механические свойства и применять эти знания для различных инженерных и научных целей, таких как разработка новых материалов, оптимизация деревообрабатывающих процессов и изучение поведения древесины в различных окружающих условиях.

Реологическая модель для природного полимера с учетом сил инерции представлена в [2].

Акустическое поле представляет собой распределение физических величин, связанных со звуком, в пространстве. Оно характеризуется такими параметрами, как акустическое давление, сила и скорость колебаний воздушных или других упругих частиц.

В акустическом поле имеются зоны высокого и низкого давления, которые образуют акустические волны. Акустические волны могут быть продольными или поперечными, в зависимости от направления колебаний. Продольные волны вызывают сжатия и расширения среды вдоль направления распространения волны, а поперечные волны вызывают колебания среды перпендикулярно направлению распространения волны.

Акустическое поле можно характеризовать не только величинами, связанными с колебаниями, но и с помощью таких параметров, как частота, амплитуда и фаза колебаний. Частота определяет количество колебаний в секунду и определяет высоту звука, а амплитуда отражает интенсивность колебаний. Фаза колебаний определяет относительную задержку в колебаниях между различными точками пространства.

Акустическое поле может распространяться в различных средах, включая воздух, воду, твердые тела и другие материалы. Оно может быть создано источниками звука, такими как колеблющийся объект или вибрации звукового динамика.

Частота ультразвуковых колебаний обычно составляет от 20 кГц до нескольких мегагерц, и они характеризуются высокой амплитудой и мощностью. В результате этих колебаний происходит активация молекул и

атомов вещества, что приводит к интенсивным физико-химическим процессам.

Одним из наиболее известных ультразвуковых методов является ультразвуковая очистка. Постоянное зондирование поверхности ультразвуковыми волнами позволяет удалить загрязнения, включая пыль, грязь, масло и ржавчину. Этот метод широко используется в различных отраслях, таких как медицина, электроника, микроэлектроника и пищевая промышленность.

Помимо очистки, ультразвуковые методы широко применяются в процессах смешивания, диспергирования и суспензирования материалов. Ультразвуковое воздействие позволяет достичь равномерного распределения частиц в жидкости или геле, что повышает качество и стабильность продукции.

Кроме того, ультразвуковые методы используются в процессах обработки, например, при формировании композитных материалов, связывании различных материалов и создании микроструктурных изменений.

Одним из преимуществ ультразвуковых методов является их экологическая безопасность. В отличие от многих химических реагентов, ультразвуковые волны не содержат вредных веществ и не приводят к загрязнению окружающей среды.

Таким образом, ультразвуковые методы являются эффективными и экологически чистыми способами изменения структуры материалов и повышения реакционной способности в различных процессах. Их применение позволяет достичь более высокой производительности, качества продукции и энергоэффективности [3].

Колебательная скорость, с которой частицы среды колеблются около среднего положения (V), $м/с$, определяется выражением:

$$v = \omega \cdot A \cos \omega (t - x/c), \text{ м/с}, \quad (1)$$

где $\omega = 2\pi \cdot f$ — круговая частота, $рад./с$; A — амплитуда смещения частиц среды, $дБ$; t — время, $с$; x — расстояние от колеблющейся частицы до источника колебания, $мм$; c — скорость распространения колебаний в среде, $м/с$; $\omega(t - x/c)$ — фаза колебания [4].

Для характеристики затухающих колебаний используются коэффициент затухания (S), логарифмический декремент (θ) и добротность (Q).

Собственная частота затухающих колебаний определяется:

$$\omega = \omega_0 \sqrt{1 - \frac{1}{4} Q^2}. \quad (2)$$

Ультразвуковая обработка может использоваться в различных отраслях промышленности [5; 6] и включает следующие преимущества:

- Высокая эффективность: ультразвуковые волны могут проникать в труднодоступные места и обрабатывать поверхности равномерно.

- Быстрота: многие технологические процессы могут быть завершены за считанные минуты или даже секунды.

- Минимальное влияние на окружающую среду: ультразвуковая обработка не требует использования агрессивных химических веществ.

– Экономичность: ультразвуковая обработка может быть более энергоэффективной и экономичной по сравнению с традиционными методами [7–10].

При ультразвуковой обработке суммарное давление P_T , которое воздействует на неотвержденный лакокрасочный материал, определяется уравнением:

$$P_T = P_h + P_a, \quad (3)$$

где P_h — внешнее атмосферное давление в жидкости; P_a — акустическое давление звуковых колебаний:

$$P_a = P_A \sin(2\pi ft), \quad (4)$$

где P_A — максимальная амплитуда акустического давления [6].

Звуковое давление распространяется в виде волны сквозь жидкую среду и вызывает колебания молекул, увеличивая мгновенное значение их кинетической энергии:

$$V = \frac{dx}{dt} = 2\pi f x_0 \cos(2\pi ft). \quad (5)$$

Это происходит из-за феномена дисперсии, который приводит к рассеиванию и поглощению ультразвуковых волн на молекулярном уровне. Когда ультразвуковые волны распространяются через среду, молекулы в среде колеблются и передают свою энергию другим молекулам. Это приводит к потере энергии и уменьшению амплитуды волн.

Также трение между молекулами вызывает диссипацию энергии. При прохождении ультразвуковых волн через среду молекулы совершают колебательные движения под воздействием волны. Это движение вызывает трение молекул друг о друга, что приводит к потере энергии в виде тепла.

Как результат, с увеличением расстояния от источника волновая энергия ультразвуковых волн уменьшается. Однако важно отметить, что эта потеря энергии зависит также от свойств среды, таких как ее плотность, вязкость и теплопроводность. Степень ослабления описывается уравнением:

$$I = I_0 \exp(-2al), \quad (6)$$

где a — коэффициент поглощения колебаний средой; I_0 — начальная интенсивность звуковой волны; I — интенсивность на расстоянии l от источника.

Суммарно структурные и термические потери дают общую поглощающую способность среды:

$$a = \frac{2\pi^2 f^2}{\rho c^3} \left(\frac{4}{3} \eta + \frac{(\gamma-1)K}{\gamma C_v} \right), \quad (7)$$

где η — вязкость среды; f — частота колебаний; K — коэффициент теплопроводности среды; γ — отношение молярных теплоемкостей среды; C_v — молярная теплоемкость при постоянном объеме.

Согласно формуле (7), с увеличением вязкости или частоты колебаний поглощающий эффект среды возрастает, снижая развитие кавитации [6].

Ряд экспериментальных исследований [11; 12] подтверждает, что ультразвуковые колебания могут ускорять химические процессы и реакции в средах с высокой вязкостью или высокой концентрацией, таких как лакокрасочные составы. Ультразвук стимулирует перемешивание компонентов, повышает контактную поверхность

и улучшает массообменные процессы, что способствует ускорению процессов полимеризации при отверждении лакокрасочных материалов.

При выборе технологического режима воздействия ультразвука на лакокрасочные материалы важно учитывать определенные параметры. Во-первых, необходимо превысить порог мощности источника ультразвукового воздействия, чтобы достичь развития кавитации. Развитие кавитации, т. е. образование и коллапс пузырьков, способствует интенсификации химических процессов.

Во-вторых, необходимо учесть, что выше определенной мощности источника ультразвука интенсификация процессов полимеризации может перестать возрастать или даже снижаться [6].

Описание объекта исследования. Анатомическое строение древесины влияет на ее физические и химические свойства. Это относится не только к макроструктуре и морфологическим признакам, но и к анатомическому строению клеток и тканей. Особенности строения и определяют степень восприимчивости древесины к разного рода трансформациям в результате химических, термических, механических и прочих воздействий.

Плотность упаковки макромолекул целлюлозы вдоль микрофибрилл неодинакова. Плотно упакованные участки макромолекул систематически перемежаются с участками более рыхлого строения (рис. 1). Длина плотно упакованных участков соответствует длине фрагмента макромолекулы целлюлозы из 160–200 элементарных звеньев, в то время как длина неупорядоченных (рыхлых) участков — 15–25 звеньев [13].

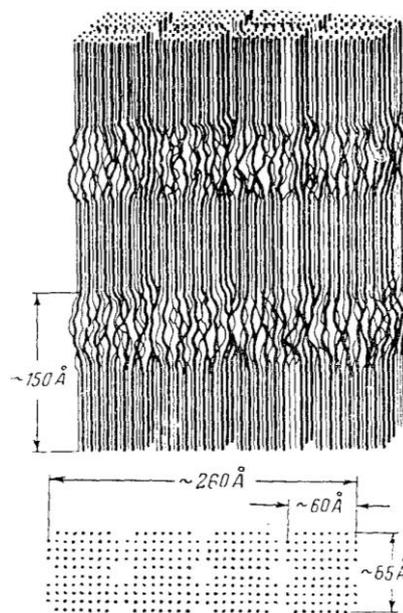


Рис. 1. Участки макромолекул

Мицеллярная теория утверждает, что целлюлоза состоит из двух основных частей: кристаллических областей (мицелл) и аморфных областей. В кристаллических областях целлюлозные цепи расположены параллельно и прочно связаны друг с другом межмолекулярными взаимодействиями. В аморфных областях цепи не имеют определенной ориентации, и здесь взаимодействие между цепями слабее. Это делает аморфную часть целлюлозы более доступной для взаимодействия с дру-

гими веществами или реакциями. В них цепи целлюлозы ориентированы случайным образом и слабо связаны между собой. Благодаря этому аморфная часть целлюлозы имеет более высокую доступность для взаимодействия с другими веществами.

Взаимодействие целлюлозы с другими веществами в аморфной части может происходить за счет различных сил, таких как ван-дер-ваальсовы силы, гидрофобные взаимодействия и водородные связи. Это позволяет целлюлозе образовывать комплексы с другими веществами, такими как полимеры, липиды, белки и другие органические и неорганические соединения.

Таким образом, мицеллярная теория объясняет, что целлюлоза имеет не только кристаллическую структуру, но и аморфную часть, которая обладает высокой активностью и способностью взаимодействовать с другими веществами.

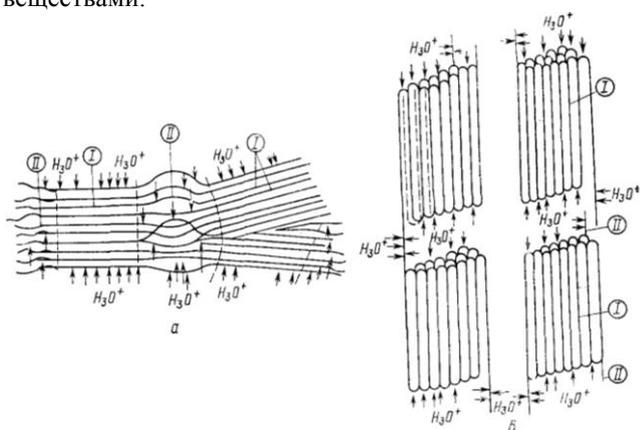


Рис. 2. Надмолекулярная структура и реакционная способность целлюлозы: *a* — по В.И. Шаркову; *б* — по Г.А. Петропавловскому; I — упорядоченные фракции; II — неупорядоченные фракции (стрелками показано направление действия ионов катализатора)

Г.А. Петропавловским была предположена клапанная модель строения нативной целлюлозы [14]. По его мнению, нативная целлюлоза является высококристаллическим веществом и состоит из микроблоков, построенных из пачек складчатых молекул (рис. 2). Кристаллические блоки (пачки) связываются в продольном направлении участками проходных молекул цепей. Границы раздела отдельных блоков и участки проходных цепей представляют аморфную фазу. Эти зоны являются своеобразными клапанами, которые предохраняют целлюлозные фибриллы от действия диспергирующих сил, возникающих при набухании целлюлозы в жидких средах.

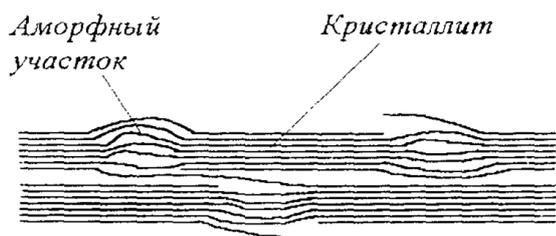


Рис. 3. Модель «бабочка» фибриллы

Типичный представитель фибриллярных аморфно-кристаллических полимеров — целлюлоза, которая образует природные растительные волокна. В фибриллах

все оси кристаллитов ориентированы в одном направлении. Структуру таких полимеров, в том числе целлюлозы, описывают моделью «бабочка» фибриллы (рис. 3). В микрофибриллах наблюдается правильное чередование кристаллических и аморфных участков, например, в соответствии с моделью Гесса.

Различают фибриллярные (волоконистые) полимеры и полимеры, не имеющие волоконистого строения [14]. Фибриллы состоят из чередующихся кристаллических участков (кристаллов) и аморфных участков. Резкой фазовой границы, и тем более поверхности раздела, между участками нет, т. е. фазы следует рассматривать в структурном понимании. В синтетических аморфно-кристаллических блочных полимерах оси кристаллов не имеют одного направления, и кристаллиты как бы вкраплены в аморфную фазу. С современных позиций структура аморфно-кристаллических полимеров хорошо укладывается в рамки кластерной теории. Кристаллиты — это кластеры с максимальной степенью упорядоченности, т. е. имеющие кристаллическую решетку, соединенные проходными макромолекулами, образующими аморфные участки [15].

Полимеры, в зависимости от характера теплового движения, могут находиться в трех релаксационных состояниях:

1. Стеклообразное состояние, в котором возможны только колебательные движения атомов в макромолекулах; стеклообразный полимер находится в твердом агрегатном состоянии.

2. Высокоэластическое состояние, в котором возможны колебательные движения звеньев и сегментов, их взаимная подвижность; высокоэластичный полимер также находится в твердом агрегатном состоянии; это состояние существует только у полимеров и служит одним из признаков полимерного состояния вещества.

3. Вязкотекучее состояние, в котором существует подвижность макромолекул в целом и элементов надмолекулярной структуры; вязкотекучий полимер находится уже в жидком агрегатном состоянии.

При повышении температуры происходят переходы полимера из одного релаксационного состояния в другое. При охлаждении происходят переходы в обратном направлении. Все переходы нефазовые. Кристаллические полимеры в результате фазового перехода (плавление) также способны переходить в релаксационное высокоэластическое состояние и обратно (кристаллизация).

При нагревании твердого полимера, стеклообразного или кристаллического, тепловая энергия переходит в кинетическую энергию макромолекул. Тепловое движение нарушает межмолекулярное взаимодействие, и полимер сначала переходит в высокоэластическое релаксационное состояние (оставаясь твердым по агрегатному состоянию), а затем уже в вязкотекучее (жидкое агрегатное состояние). Переходы полимера из одного состояния в другое — как нефазовые, так и фазовые — происходят не при каких-то определенных температурах (температурных точках), а в некоторых интервалах температур. Средние температуры этих интервалов называют температурами перехода.

Температуру перехода аморфного полимера из стеклообразного состояния в высокоэластическое состояние (и обратно) называют температурой стеклования (T_g).

Иногда эту температуру называют температурой размягчения (T_r). Температуру перехода из высокоэластического состояния в вязкотекучее (и обратно) называют температурой текучести (T_t). Интервал между температурой стеклования и текучести ($T_s...T_t$) соответствует интервалу высокоэластического состояния. Таким образом, у полимеров существуют две температурные характеристики — температура стеклования и текучести.

Температуры перехода полимеров зависят от строения полимера, молекулярной массы, молекулярной неоднородности и гибкости цепей. Соединения со сравнительно низкой молекулярной массой (олигомеры) практически не имеют высокоэластического состояния. Чем ниже молекулярная масса, тем ниже температура текучести T_t и стеклования T_s , и становится более узким интервал высокоэластического состояния. С увеличением молекулярной массы этот интервал расширяется вследствие большего влияния молекулярной массы на T_t , чем на T_s .

Уровень внутримолекулярной упорядоченности определяется степенью связей между атомами внутри молекулы целлюлозы. Он может быть выражен через индексы кристалличности, которые характеризуют количество и размеры кристаллических областей в молекуле целлюлозы. Большое количество и большие размеры кристаллических областей обеспечивают высокую внутримолекулярную упорядоченность, что способствует более быстрому гидролизу целлюлозы.

Межмолекулярная упорядоченность определяется связями между молекулами целлюлозы в трехмерном пространстве. Она может быть выражена через факторы, влияющие на пространственную ориентацию молекул, такие как длина цепи, расстояние между цепями, наличие взаимодействий между молекулами и т. д. Более высокая межмолекулярная упорядоченность также способствует более быстрому гидролизу целлюлозы.

Надмолекулярная упорядоченность определяется организацией молекул целлюлозы в более крупные структуры, такие как микро- и макрофибриллы. Она может быть выражена через факторы, влияющие на структуру этих структур — такие, как длина и диаметр фибрилл, упорядоченность и ориентация фибрилл и т. д. Более высокая надмолекулярная упорядоченность также способствует более быстрому гидролизу целлюлозы.

В целом более высокая степень упорядоченности на всех уровнях (внутримолекулярном, межмолекулярном и надмолекулярном) способствует повышению реакционной способности целлюлозы и более быстрой скорости ее гидролиза [16; 17].

Применение химических методов включает обработку целлюлозы различными реагентами, такими как кислоты, щелочи, перекись водорода и другие окислители, а также различные растворители, реагенты для замещения гидроксильных групп, модификация с помощью функциональных групп и т. д.

Механические методы включают измельчение, перемешивание, холодное и горячее обезжиривание, механическую активацию и др.

Механохимические методы включают механическую активацию целлюлозы в сочетании с применением химических реагентов.

Радиационные методы включают облучение целлюлозы ионизирующими и неионизирующими излучениями.

Ультразвуковые методы включают обработку целлюлозы ультразвуком, что приводит к механическому и химическому разрушению структуры.

Электрохимические методы основаны на воздействии электрического тока на целлюлозу в присутствии электролитического раствора.

Каждый из этих методов может быть использован для снижения интенсивности межмолекулярного взаимодействия в целлюлозе и повышения ее реакционной способности.

Краткая характеристика некоторых методов приведена в таблице.

Методы снижения интенсивности межмолекулярного взаимодействия целлюлозы и растительного сырья

Методы активации	Параметры обработки	Эффективность обработки
Термическая обработка	160–200 °С	Превращение целлюлозы в легкогидролизуемое состояние на 13–17 %
Радиализ	Дозы излучения, $MГр$: 0,6–1,0	Перевод целлюлозы в легкогидролизуемое состояние на 50–70 %
	Дозы излучения, $MГр$: 1,0–2,0	Превращение полисахаридов в олигомеры
Высокочастотное озвучивание	Частота ультразвука 24 КГц	Фибриллярное расщепление волокон
Взрывное дефибрирование	Автогидролиз при 220–230 °С в течение 2,5–3,0 мин	Перевод в растворимое состояние около 50 % от массы древесины

Таким образом, можно предположить, что высокочастотное озвучивание древесного материала приводит к фибриллярному расширению волокон древесины и способствует переходу полимера в вязкотекучее состояние.

Акустические колебания могут иметь различные частоты в зависимости от источника и среды, в которой они распространяются. Инфразвуковые колебания имеют низкую частоту и могут быть слышимы только при очень больших амплитудах. Слышимые звуки имеют частоты от, примерно, 20 Гц до 20 000 Гц и являются наиболее распространенными акустическими колебаниями, которые человек может воспринимать. Ультразвуковые колебания имеют частоты выше слышимого диапазона, и они имеют широкое применение во многих областях, таких как медицина, индустрия и научные исследования. Гиперзвуковые колебания имеют частоты, превышающие 1 ГГц, и часто связаны с явлениями, происходящими на молекулярном уровне.

Параметры акустических колебаний, такие как интенсивность, скорость, давление и коэффициент поглощения, могут быть использованы для характеристики состояния среды, через которую распространяются колебания, а также процессов теплопереноса.

Например, интенсивность звука связана с энергией, переносимой звуковой волной, а скорость колебаний позволяет определить скорость распространения волны и связанные с этим свойства среды. Коэффициент поглощения показывает, насколько сильно звук поглощается или ослабляется при прохождении через среду.

Изучение акустических колебаний и акустических полей позволяет лучше понять различные физические процессы, происходящие в упругих средах, и применить это знание в таких областях, как разработка звукоподавляющих материалов и акустическая диагностика [18].

Смещение для бегущей акустической волны можно представить уравнением:

$$S = A \exp([i(\omega t - kx)]), \quad (8)$$

где A — амплитуда смещения; ω — частота колебания; k — волновое число.

Амплитуда колебательной скорости:

$$A * = \omega A, \quad (9)$$

– амплитуда ускорения:

$$A ** = \omega^2 A^2, \quad (10)$$

– амплитуда плотности кинетической энергии:

$$E_K = 1/2 \rho \omega^2 A^2, \quad (11)$$

– амплитуда плотности импульса:

$$P_K = \rho \omega A, \quad (12)$$

– амплитуда интенсивности звуковых колебаний:

$$I = 1/2 \rho c \omega^2 A^2, \quad (13)$$

где c — скорость распространения акустических колебаний в среде;

– амплитуда смещения:

$$A = (2I/\rho c)^{1/2} \omega^{-1}. \quad (14)$$

Для вязкой среды амплитуды поглощения акустических колебаний принимают вид:

– амплитуда колебательной скорости:

$$A * = \omega A e^{-\alpha x}, \quad (15)$$

– амплитуда ускорения:

$$A ** = \omega^2 A^2 e^{-2\alpha x}, \quad (16)$$

– амплитуда плотности кинетической энергии:

$$E_{KП} = 1/2 \rho \omega^2 A^2 e^{-2\alpha x}, \quad (17)$$

– амплитуда плотности импульса:

$$P_{KП} = \rho \omega A e^{-\alpha x}, \quad (18)$$

– амплитуда интенсивности звуковых колебаний:

$$I = 1/2 \rho c \omega^2 A^2 e^{-2\alpha x}, \quad (19)$$

и амплитуда смещения:

$$A = (2I/\rho c)^{1/2} \omega^{-1} e^{-\alpha x}. \quad (20)$$

Диссипацию кинетической энергии акустической волны при ее движении в вязкой среде можно оценить формулой:

$$E_{кд} = E_K e^{-2\alpha}. \quad (21)$$

Течению жидкости в поровой структуре древесины можно поставить в соответствие уравнение:

$$V = -K \frac{dp}{dx} = K(p_\alpha + \text{sign } 2\sigma/d)/x \quad (22)$$

или:

$$V = K(p_\alpha + \text{sign } 2\sigma/d) / \int v dt. \quad (23)$$

Здесь $K = Cd^2g/v$ — коэффициент фильтрации; d — средний размер поры; v — кинематическая вязкость; p_α — акустическое давление (из условия прилипания жидкости к материалу древесины); x — глубина проникновения жидкости; σ — капиллярное давление; sign — определяет характер смачиваемости – не смачиваемости жидкости.

Полученное уравнение запишем в виде:

$$m dm/dt = K(p_\alpha + \text{sign } 2\sigma/d), \quad (24)$$

где принято обозначение:

$$\int v dt = m, v = dm/dt. \quad (25)$$

Решение имеет вид:

$$m^2 = 2K(p_\alpha + \text{sign } 2\sigma/d)t, \quad (26)$$

или:

$$m = 2K(p_\alpha + \text{sign } 2\sigma/d)t^{1/2}, \quad (27)$$

тогда скорости заполнения поровой структуры материала древесины соответствует формула:

$$V = 1/2 [2K(p_\alpha + \text{sign } 2\sigma/d)t^{-1/2}]. \quad (28)$$

За период акустического колебания жидкость проникает на глубину:

$$X = K(\rho \omega^2 A^2 + \text{sign } 2\sigma/d)^{1/2} \omega^{-1/2}. \quad (29)$$

Движению маловязкой жидкости в круглом капилляре соответствует уравнение, записанное в цилиндрической системе координат:

$$-\partial p_\alpha / \partial x + \mu(\partial^2 v / \partial r^2 + r^{-1} \partial v / \partial r) = 0 \quad (30)$$

или:

$$-\partial p / \partial x + \mu r [\partial(r \partial v / \partial r)] / \partial r = 0, \quad (31)$$

здесь μ — динамическая вязкость.

Решение этого уравнения при граничном условии $V = 0$ при $r = R$, где R — радиус капилляра, описывает

эпюру скорости движения в поперечном сечении капилляра:

$$V = -(1/4\mu)(R^2 - r^2)\partial p_\alpha/\partial x, \quad (32)$$

На оси капилляра для максимальной скорости можно записать уравнение:

$$V_m = (1/4\mu)R^2 p/x, \quad (33)$$

или:

$$V_m = (1/4\mu)R^2 p_\alpha / \int V_m dt, \quad (34)$$

и решение:

$$V_m = (R/2)(p_\alpha/2\mu t)^{1/2}, \quad (35)$$

тогда глубина проникновения:

$$X = R(p_\alpha/2\mu)t^{1/2}. \quad (36)$$

Периоду акустического колебания соответствуют скорость на оси капилляра:

$$V_m = (R/2)(p_\alpha/2\mu t)^{1/2}, \quad (37)$$

и глубина заполнения:

Литература

1. Говядин И.К. Технология изделий из древесно-полимерных композитов методом 3D печати: дис. ... канд. техн. наук. Архангельск: САФУ, 2020. 190 с.
2. Базаров С.М., Семенова Н.И. Движение материала древесины в вязкотекучем состоянии. СПб.: СПбЛТА, 2007. 68 с.
3. Кобцева Г.П. Способы получения нетканых материалов. Понятие о нетканых материалах [Электронный ресурс]. URL: <https://studfile.net/preview/5404774/page:13/> (дата обращения: 18.08.2023).
4. Гаспарян Г.Д. Разработка и обоснование параметров установки для окорки лесоматериалов ультразвуком: дис. ... канд. техн. наук. Братск: БГУ, 2005. 160 с.
5. Коновалова Н.Н. Установление оптимальных режимов комбинированной обработки древесины дуба ультразвуком и теплом для ускорения созревания коньячных спиртов при их резервуарной выдержке: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М.: МГУПП, 2004. 28 с.
6. Сундуков С.К. Особенности технологии нанесения лакокрасочных покрытий на изделия машиностроения с использованием ультразвука: дис. ... канд. техн. наук. М.: МАДИ, 2013. 191 с.
7. Абрамов В.О. Мощный ультразвук в металлургии и машиностроении. М.: Янус-К, 2006. 688 с.
8. Шутилов В.А. Основы физики ультразвука. Л.: Изд-во ЛГУ, 1980. 280 с.
9. Сиротюк М.Г. Экспериментальные исследования ультразвуковой кавитации // Мощные ультразвуковые поля. М.: Наука, 1968. С. 167-220.
10. Панов А.П. Ультразвуковая высокоамплитудная очистка поверхности // Воздействие мощного ультразвука на межфазную поверхность металлов. М.: Наука, 1986. С. 217-259.
11. Хмелев В.Н. Многофункциональные ультразвуковые аппараты и их применение в условиях малых производств, сельском и домашнем хозяйстве. Барнаул: АлтГТУ, 1997. 160 с.

$$X = R(p_\alpha/2\mu)t^{1/2}. \quad (38)$$

Результаты и их обсуждение. Для разработки математической модели движения ультразвука в древесине были учтены реологические характеристики древесины, такие как ее упругие и вязкопластические свойства. Это позволяет учесть поведение древесины под воздействием ультразвука, предсказать изменение ее анатомических и химических свойств [18].

Основой для разработки модели является аналогия с моделью вязкоупругого материала. В данной модели учитывается как упругость, так и вязкость древесины, что позволяет учесть ее деформацию и разрушение под действием ультразвука.

Направление движения ультразвука в древесине определяется реологическими свойствами материала и силами инерции. Реологическая модель для природного полимера, учитывающая эти факторы, была применена для решения задачи моделирования движения ультразвука в древесине.

Аналитическое исследование формирования параметров состояния акустических колебаний в материале древесины представляет научный интерес.

12. Розенберг Л.Д. Физика и техника мощного ультразвука // Физические основы ультразвуковой технологии. М.: Наука, 1970. 689 с.
13. Славянский А.К., Шарков В.И., Ливеровский А.А. Химическая технология древесины. М.: Гослбумиздат, 1962. 581 с.
14. Петропавловский Г.А. Гидрофильные частично замещенные эфиры целлюлозы и их модификация путем химического сшивания. Л.: Наука. 1988. 298 с.
15. Азаров В.И., Буров А.В., Оболенская А.В. Химия древесины и синтетических полимеров. 2-е изд., испр. СПб.: Лань, 2010. 624 с.
16. Bazarov S., Belenkiy Y., Sokolova V., Solovvey A. Two-criteria technical and economic optimization of forest transportation problem // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. IV scientific-technical conference «Forests of Russia: policy, industry, science and education», 2019. P. 012064.
17. Blokh A.G., Bazarov S.M., Nakhman Y.V. Some general laws governing droplet size distribution on atomisation of a liquid // Thermal Engineering. 1967. V. 14. № 7. P. 45.
18. Лодж А.С. Эластичные жидкости. М.: Наука, 1969. 464 с.
19. Соколова В.А., Базаров С.М., Угрюмов С.А. Движение ультразвука в древесине // Системы. Методы. Технологии. 2021. № 2 (50). С. 76-80.

References

1. Govyadin I.K. Technology of products from wood-polymer composites using 3D printing: dis. ... kand. tekhn. nauk. Arhngel'sk: SAFU, 2020. 190 p.
2. Bazarov S.M., Semenova N.I. The movement of wood material in a viscous state. SPb.: SPbLTA, 2007. 68 p.
3. Kobceva G.P. Methods for obtaining nonwoven materials. The concept of nonwoven materials [Elektronnyj resurs]. URL: <https://studfile.net/preview/5404774/page:13/> (data obrashcheniya: 18.08.2023).
4. Gasparyan G.D. Development and substantiation of the parameters of the installation for the debarking of timber by ultrasound: dis. ... kand. tekhn. nauk. Bratsk: BGU, 2005. 160 p.

5. Konovalova N.N. Establishment of optimal modes of combined processing of oak wood with ultrasound and heat to accelerate the maturation of cognac spirits during their tank aging: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk. M.: MGUPP, 2004. 28 p.
6. Sundukov S.K. Features of the technology of applying paint and varnish coatings on engineering products using ultrasound: dis. ... kand. tekhn. nauk. M.: MADI, 2013. 191 p.
7. Abramov V.O. Powerful ultrasound in metallurgy and mechanical engineering. M.: YAnus-K, 2006. 688 p.
8. SHutilov V.A. Fundamentals of the Physics of Ultrasound. L.: Izd-vo LGU, 1980. 280 p.
9. Sirotyuk M.G. Experimental studies of ultrasonic cavitation // Powerful ultrasonic fields. M.: Nauka, 1968. P. 167-220.
10. Panov A.P. Ultrasonic high-amplitude surface cleaning // Influence of powerful ultrasound on the interfacial surface of metals. M.: Nauka, 1986. P. 217-259.
11. Hmelev V.N. Multifunctional ultrasonic devices and their application in small-scale production, agriculture and households. Barnaul: AltGTU, 1997. 160 p.
12. Rozenberg L.D. Physics and technology of high-power ultrasound // Physical foundations of ultrasonic technology. M.: Nauka, 1970. 689 p.
13. Slavyanskij A.K., SHarkov V.I., Liverovskij A.A. Chemical technology of wood. Textbook for technological and forestry universities. M.: Goslebumizdat, 1962. 581 p. (Это УЧЕБНИК)
14. Petropavlovskij G.A. Hydrophilic partially substituted cellulose ethers and their modification by chemical crosslinking. L.: Nauka. 1988. 298 p.
15. Azarov V.I., Burov A.V., Obolenskaya A.V. Chemistry of wood and synthetic polymers. 2-e izd., ispr. SPb.: Lan', 2010. 624 p.
16. Bazarov S., Belenkiy Y., Sokolova V., Solovyev A. Two-criteria technical and economic optimization of forest transportation problem // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. IV scientific-technical conference «Forests of Russia: policy, industry, science and education», 2019. P. 012064.
17. Blokh A.G., Bazarov S.M., Nakhman Y.V. Some general laws governing droplet size distribution on atomisation of a liquid // Thermal Engineering. 1967. V. 14. № 7. P. 45.
18. Lodzh A.S. Elastic fluids. M.: Nauka, 1969. 464 p.
19. Sokolova V.A., Bazarov S.M., Ugryumov S.A. The movement of ultrasound in wood // Systems. Methods. Technologies. 2021. № 2 (50). P. 76-80.