

УДК 674.03:621.034

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОКОРКИ ЛЕСОМАТЕРИАЛОВ

Гаспарян Г. Д.

ФГБОУ ВПО «Братский государственный университет», Иркутская обл., г. Братск, ул. Макаренко, д.40)

В статье рассматриваются основные принципы окорки лесоматериалов ультразвуком в водной среде. Процесс описывается принципами математического описания элементов технических систем и физических явлений ультразвуковой окорки. Представлены материалы, позволяющие провести оценку качества окорки лесоматериалов посредством управления процессами, происходящими в жидкой среде под действием ультразвуковых волн. Описываются физические процессы, протекающие в водной среде технологического комплекса, ультразвуковой окорки лесоматериалов. При разработке системной модели ультразвуковой окорки лесоматериалов было выявлено, что ультразвуковая окорка состоит из комплекса процессов, исследования которых позволят определить наиболее оптимальные режимы технологического процесса и технических средств реализации технологического процесса. Для разработки комплексной модели в статье были решены следующие задачи: разработана структурная схема комплексной модели технических систем и технологии окорки лесоматериалов ультразвуком; разработана математическая модель технических систем и технологии окорки лесоматериалов ультразвуком в водной среде.

Ключевые слова: ультразвуковая окорка, технологические комплексы, кора, окорка лесоматериалов.

ULTRASONIC TIMBER BARKING SIMULATION

Gasparyan G. D.

Bratsk state university, Irkutsk reg., Bratsk city, Makarenko st. 40.

The article discusses the basic principles of timber ultrasonic barking in the aquatic environment. The process is described by the principles of the mathematical description of structural components and physical phenomena of ultrasonic bark. The materials that allow an assessment of the quality of timber barking through control of processes occurring in the liquid medium under the influence of ultrasonic waves. Describes the physical processes in the aquatic environment of the technological complex, ultrasonic bark timber. In developing the system model ultrasonic bark timber was found that ultrasonic barking consists of complex processes, which will allow the study to determine the most optimal modes of technological processing and technical means to implement the process. For the development of a comprehensive model of the article was solved the following problems: The structural scheme of an integrated model of technical systems and technology debarking wood ultrasound; developed mathematical model of technical systems and ultrasound technology debarking wood in the aquatic environment.

Key words: ultrasonic barking, technological complexes, bark, timber barking.

Введение

Для оценки эффективности ультразвуковой окорки лесоматериалов и разработки системной программы интродукции процесса и трансфера технологии в работе рассматривается комплекс вопросов по принципу дифференцирования технологического процесса и поэтапной разработки моделей, основанных на математических, физических и концептуальных принципах.

Цель исследования

Целью исследований является разработка комплексной модели технических систем и процессов окорки лесоматериалов ультразвуком.

Методы и результаты исследований. Комплексная модель технических систем и технологии окорки лесоматериалов ультразвуком разрабатываются по трём основным направлениям (рис. 1) [1]:

- математическое моделирование технических систем;
- математическое моделирование процессов, протекающих при ультразвуковой окорке лесоматериалов;
- концептуальное моделирование технолого-экологических аспектов ультразвуковой окорки лесоматериалов.

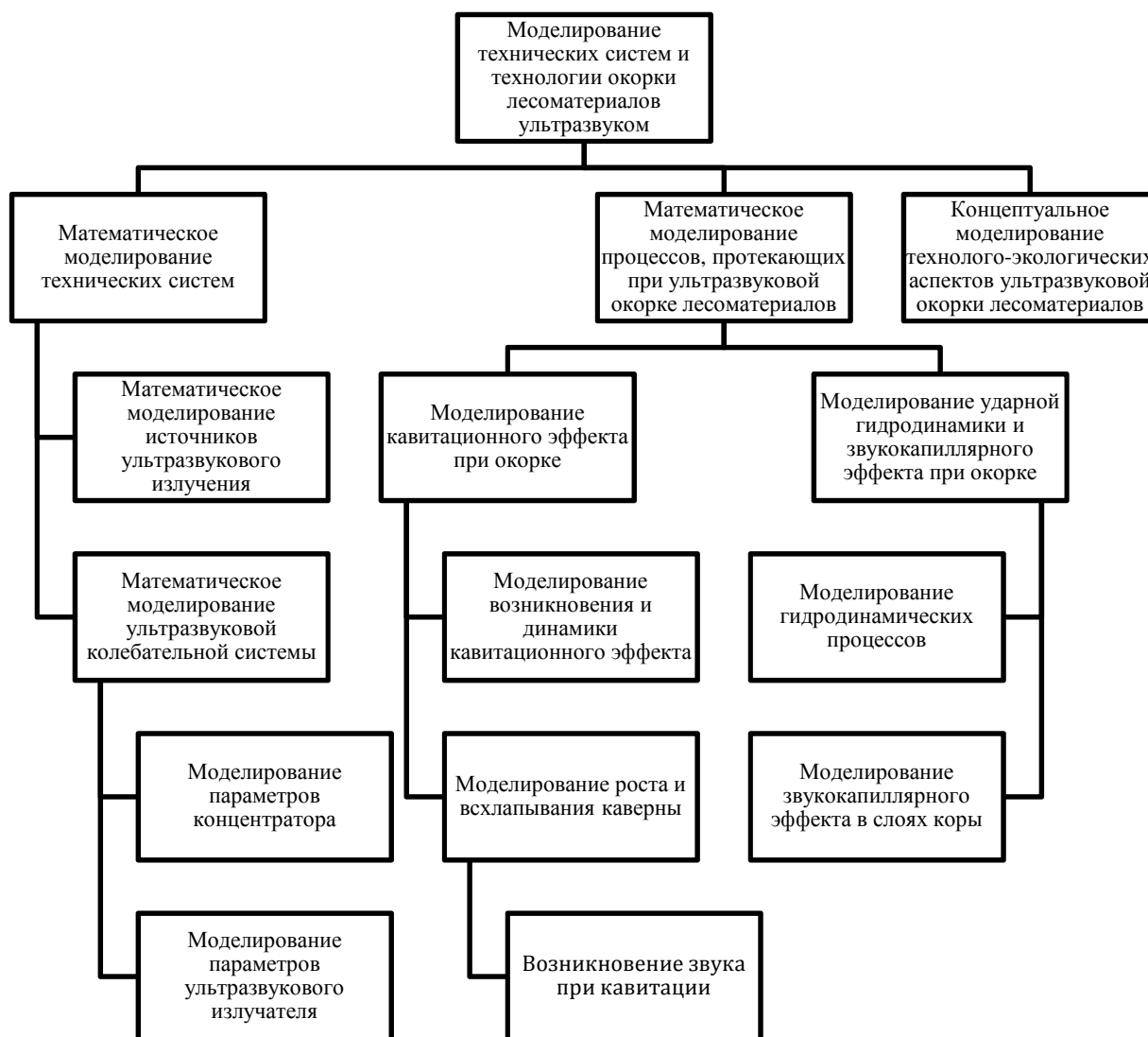


Рис. 1. Структура комплексной модели технических систем и технологии окорки лесоматериалов ультразвуком

Основываясь на структуре комплексного моделирования окорки лесоматериалов ультразвуком, разработку модели можно ориентировать по принципу технического дифферен-

цирования, позволяющего исследовать параметры отдельно каждого элемента технической системы. В связи с этим ниже представлены математические модели ультразвукового генератора и колебательной системы.

При рассмотрении колебаний упругих тел будем полагать, что материал тела однороден, изотропен и подчиняется закону Гука.

При выводе уравнения движения будем основываться на гипотезе плоских сечений. Кроме того, будем игнорировать силы инерции, связанные с поперечными движениями частиц стержня при его растяжении – сжатии. Тогда положение каждого поперечного сечения в процессе движения полностью характеризуется его продольным смещением U .

Рассмотрим элемент стержня, ограниченный двумя поперечными сечениями (рис. 2) [1]. Обозначим:

- N – поперечная сила в сечении;
- dJ – сила инерции;
- $F(Z)$ – площадь поперечного сечения;
- $U(Z)$ – смещение данного поперечного сечения вдоль оси бруса Z ;
- E – модуль упругости материала стержня (модуль Юнга);
- ρ – плотность материала стержня;
- ω – круговая частота;

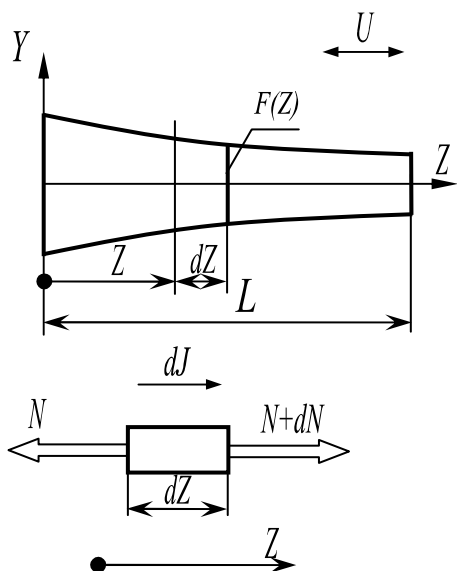


Рис. 2. Элемент стержня, ограниченный двумя поперечными сечениями

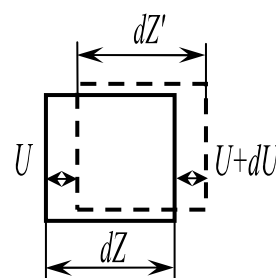


Рис. 3. Левое сечение элемента

Сила инерции выражается следующим образом [1, 2]:

$$dJ = -\rho F(Z) \frac{d^2 U}{dt^2} dZ \quad (1)$$

При стационарных колебаниях с круговой частотой ω

$$dJ = \omega^2 \cdot \rho \cdot F(Z) \cdot U(Z) dZ \quad (1')$$

Уравнение системы дифференциальных уравнений, описывающих продольные колебания, записывается в соответствии с законом Гука.

Левое сечение элемента смещается вдоль оси Z на U , правое – на величину $U+dU$ (рис. 3.). Таким образом, абсолютное удлинение элемента равно:

$$\Delta L = U + \frac{\partial U}{\partial Z} dZ - U = \frac{\partial U}{\partial Z} dZ,$$

а относительное:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{dZ} = \frac{\partial U}{\partial Z} \quad (2)$$

Усилие, возникающее в сечении, связано с относительным удлинением, законом Гука для одноосного напряжённого состояния:

$$N = EF(Z)\varepsilon = EF(Z) \frac{\partial U}{\partial Z} \quad (3)$$

Окончательно система дифференциальных уравнений, описывающая свободные продольные колебания стержней переменного сечения, запишется в виде:

$$\begin{cases} \frac{\partial U}{\partial Z} = \frac{1}{EF(Z)} N(Z) \\ \frac{\partial N}{\partial Z} = -\omega^2 \rho \cdot F(Z) U(Z) \end{cases} \quad (4)$$

Волновое уравнение продольных колебаний такого стержня имеет вид

$$\begin{cases} \frac{dU_1}{dZ} = \left[EF(Z) \cdot \left(1 + \frac{\psi_0^2}{4\pi^2} \right) \right]^{-1} \cdot \left(N_1 + \frac{\psi_0}{2\pi\omega} N_1 \right) \\ \frac{dU_2}{dZ} = \left[EF(Z) \cdot \left(1 + \frac{\psi_0^2}{4\pi^2} \right) \right]^{-1} \cdot \left(N_2 - \frac{\psi_0}{2\pi\omega} N_1 \right) \\ \frac{dN_1}{dZ} = -\omega^2 \rho F(Z) U_1 \\ \frac{dN_2}{dZ} = -\omega^2 \rho F(Z) U_2 \end{cases} \quad (5)$$

На основании данной системы уравнений можно определить рациональные параметры концентратора и разработать элементы установки для окорки лесоматериалов ультразвуком [2].

На основе предложенной модели кавитирующей среды разработана методика расчета предельных параметров электронных генераторов ультразвуковых технологических аппара-

тов, таких как запас мощности и диапазон изменения частоты, для работы с жидкими средами, при условии реализации в них режима развитой кавитации.

Для оптимизации параметров ультразвуковой окорки круглых лесоматериалов возникает необходимость разработки математической модели различных процессов, происходящих при реализации технологии. Ультразвуковая окорка является сложной системой процессов, происходящих при воздействии ультразвуковых волн на различные участки слоёв коры и среды окаривания.

При исследовании показателей ультразвука основным принципом физического влияния на элементы коры является процесс возникновения кавитационного эффекта, позволяющего синтезировать различные процессы для отрыва коры от древесины. Учитывая это, разработаны математические модели возникновения кавитационного эффекта при ультразвуковой окорке, возникновения гидродинамических процессов, влияющих на физический отрыв коры от древесины.

Одним из факторов эффективной ультразвуковой окорки лесоматериалов являются показатели кавитационного эффекта, возникающего в области действия ультразвука. В связи с этим необходимо разработать комплексную модель возникновения кавитационного эффекта с параметризацией показателей возникающей при этом энергии [4,5].

Кавитационный эффект, возникающий в зоне разрушения элементов и слоёв коры, можно условно дифференцировать на два этапа: возникновение и динамика; рост и схлопывание кавитационного пузырька. Так как процесс ультразвуковой окорки происходит в водной среде, то при возникновении и динамике кавитации формируются гидродинамические течения, а при схлопывании выделяется энергия, разрушающая слои коры.

Исследования акустической кавитации позволяют получать наиболее адекватные результаты по воспроизводимости условий эксперимента, а также дают возможность проведения измерений физических параметров в кавитационной области. Заметим, что близкие по природе физико-химические эффекты имеют место и при целом ряде воздействий другой физической природы, таких как лазерная кавитация, гидродинамическая кавитация, электрогидравлический взрыв, ударное механическое воздействие на взвесь пузырьков в жидкости и т.п. Тем не менее устоявшаяся акустическая терминология широко используется и в настоящее время, поэтому мы также будем пользоваться этими общепринятыми терминами.

Энергия запасается при расширении пузырька от равновесного радиуса R до максимального радиуса R_{\max} под воздействием растягивающих сил, возникающих в жидкости в фазе разрежения акустической волны. Величину запасенной энергии можно оценить как $W = \Delta V \cdot P_0$, где ΔV – изменение объёма пузырька при уменьшении его радиуса с R_{\max} до R_{\min} , P_0 – давление в окружающей жидкости, которое при акустической кавитации можно

принять равным статическому давлению. Если принять условие, $R_{\max} \gg R_{\min}$, что обычно имеет место при кавитации, то для энергии получим

$$W = \frac{3}{4} \pi R_{\max}^3 \cdot P_0. \quad (6)$$

Явление кумуляции энергии кавитационным пузырьком на качественном уровне легко объяснимо. Эффект заключается в том, что первоначально запасенная энергия преобразуется вначале в кинетическую энергию жидкости, сферически-симметричное движение которой по направлению к центру пузырька обуславливает бесконечное (для вакуумного пузырька) увеличение скорости сжатия, что выражается в появлении сингулярностей в решениях гидродинамических уравнений.

Впервые математическое описание процесса сжатия кавитационного пузырька получил Рэлей [3]. Он исследовал динамику пустого (вакуумного) пузырька, причем его модель учитывала только инерциальные силы и пренебрегала вязкостью, поверхностным натяжением жидкости и давлением парогазовой смеси внутри пузырька и имела вид:

$$R\ddot{R} + \frac{3}{2} \dot{R}^2 = -\frac{P_0}{\rho}. \quad (7)$$

при начальных условиях:

$$R(t) = R_0; \quad \dot{R}(t) = \dot{R}_0$$

где $R(t)$ – текущий радиус пузырька, а точки обозначают производные по времени t , P_0 – статическое давление в жидкости, ρ – плотность жидкости.

Учет давления газа в пузырьке и изменяющегося давления в жидкости, а также вязкости и поверхностного натяжения, позволяет получить более универсальное уравнение динамики кавитационного пузырька, называемое уравнением Рэля – Плессета:

$$R\ddot{R} + \frac{3}{2} \dot{R}^2 = \frac{1}{\rho} \left(P_g - P_0 - P(t) - \frac{2\sigma}{R} - \frac{4\mu\dot{R}}{R} \right) = 0, \quad (8)$$

где P_g – давление газовой смеси в пузырьке, $P(t)$ – внешнее переменное давление, μ – коэффициент вязкости жидкости, σ – коэффициент поверхностного натяжения жидкости.

Уравнение Рэля – Плессета хорошо описывает динамику пульсаций газового пузырька в процессе его расширения и большей части фазы сжатия.

Критерием перехода от сжатия с бесконечно возрастающей скоростью к сжатию за бесконечное время служит число Рейнольдса

$$Re = \frac{R_0}{\mu} \sqrt{\frac{P_0}{\rho}}. \quad (9)$$

При $Re > Re^*$ (малая вязкость), где Re^* – некоторое критическое число, скорость границы полости \dot{R} неограниченно возрастает при $R \rightarrow 0$ по такому же закону, как и в задаче Рэлея, $\dot{R} \sim R^{-3/2}$, но с меньшим значением коэффициента пропорциональности (часть энергии превращается в тепло за счет диссипации). При $Re < Re^*$ (большая вязкость) вязкость сильно препятствует ускорению жидкости, захлопывание пузырька происходит медленно, за бесконечное время. Кумуляция энергии, характерная для задачи Рэлея, отсутствует. В промежуточном случае при $Re = Re^*$ пузырек захлопывается за конечное время; скорость \dot{R} при $R \rightarrow 0$ неограниченно растет, но слабее, чем R^{-1} .

Численное интегрирование уравнений динамики пузырька дает для критического числа Рейнольдса значение $Re^* = 8.4$. Для данной жидкости, находящейся под данным давлением, т. е. при заданных ρ, μ и P_0 , можно говорить критическом радиусе пузырька R^* . При $R_0 < R^*$ кумуляция полностью устраняется вязкостью. Реально, критический радиус чрезвычайно мал; например, для воды $R^* \approx 0,8$ мкм.

Уравнение (10) более точно описывает динамику кавитационного пузырька с учетом сжимаемости, но только до скоростей движения, сравнимых со скоростью звука в жидкости c_0 :

$$\begin{aligned} & R \left(1 - \frac{2}{c_0} \dot{R} \right) \ddot{R} + \frac{3}{2} \left(1 - \frac{3}{4c_0} \dot{R} \right) \dot{R}^2 + \\ & + \frac{1}{\rho} \left[P_0 - P_s - P_m \sin \omega \cdot t + \frac{2\sigma}{R} + \frac{4\mu\dot{R}}{R} - \left(P_0 + \frac{2\sigma}{R_0} \right) \left(\frac{R_0}{R} \right)^{3\gamma} \right] + \\ & + \frac{1}{\rho c_0} R \dot{R} \left(1 - \frac{1}{c_0} \dot{R} \right) \frac{dP(R)}{dR} = 0. \end{aligned} \quad (10)$$

На конечной стадии захлопывания пузырька скорость стенки пузырька может превышать c_0 . В этом случае применяется уравнение Кирквуда – Бете [5], выведенное с допущением о сферичности волн конечной амплитуды, образующихся при схлопывании полости:

$$\begin{aligned} & R \left(1 - \frac{2}{c_0} \dot{R} \right) \ddot{R} + \frac{3}{2} \left(1 - \frac{3}{4c_0} \dot{R} \right) \dot{R}^2 + \\ & + R \left(1 + \frac{1}{c_0} \dot{R} \right) H - \frac{1}{c_0} \dot{R} \left(1 - \frac{1}{c_0} \dot{R} \right) R \frac{dH}{dR} = 0, \end{aligned} \quad (11)$$

где

$$\begin{aligned} H = \int_{P_\infty}^{P(R)} \frac{dP}{\rho} = \frac{n}{n-1} \cdot \frac{A^n}{\rho} \left\{ \left[\left(P_0 + \frac{2\sigma}{R_0} \right) \cdot \left(\frac{R_0}{R} \right)^{3\gamma} - \frac{2\sigma}{R} + B \right]^{\frac{n-1}{n}} - \right. \\ \left. - \left(P_0 - P_m \sin \omega \cdot t + B \right)^{\frac{n-1}{n}} \right\}; \end{aligned}$$

$$c = [c_0^2 + (n-1)H]^{\frac{1}{2}}$$

где A , B , n – постоянные коэффициенты, значения которых для воды $A = 300$ МПа, $B = 300$ МПа, $n = 7$.

Заключение

Таким образом, на основании разработанных математических моделей можно определить комплекс показателей технических систем, технологий и технологических комплексов окорки лесоматериалов ультразвуком в водной среде. Это позволит разработать комплекс рекомендаций по реализации технологического процесса ультразвуковой окорки лесоматериалов.

Список литературы

1. Гаспарян Г.Д. Разработка и обоснование параметров установки для окорки лесоматериалов ультразвуком: дис. ... канд. техн. наук / Гаспарян Гарик Давидович; науч. рук. Г. Л. Козин; Братский государственный университет. – Братск, 2005. – 160 с.
2. Гаспарян Г. Д. Теоретические и экспериментальные исследования воздействия ультразвуковых волн на кору лесоматериалов с целью его окорки. – Деп. в ВИНТИ №1399-В2006, 2006.
3. Закиров К. Р. Численное моделирование роста и схлопывания пузырьков в сжимаемой жидкости: дис. ... канд. физ.-мат. наук / Закиров Камилль Рависович; науч. рук. И. Ш. Ахатов; Уфимский научный центр. Институт механики. – Уфа, 2005. – 105 с.
4. Brenner M. P., Hilgenfeldt S. and Lohse D. (2002). Single-bubble sonoluminescence // Rev. Mod. Phys. – 2002. – V.74. – P. 425-483.
5. Flannigan D. J. and Suslick K. S. (2005). Molecular and atomic emission during single-bubble cavitation in concentrated sulfuric acid Acoustics // Research Letters Online. – 2005. – V 6. – № 3. – P.157-161.

Рецензенты:

Иванов Виктор Александрович, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Лесные машины и оборудование» ФГБОУ ВПО «Братский государственный университет», г. Братск.

Огар Пётр Михайлович, д-р техн. наук, профессор, проректор по научной деятельности ФГБОУ ВПО «Братский государственный университет», г. Братск.