

УДК 630*0:534.3.001.1:681.8

АКУСТИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ДРЕВЕСИНЫ РАСТУЩИХ ДЕРЕВЬЕВ

Мазуркин П.М., Колесникова А.А., Темнова Е.Б.

Марийский государственный технический университет, Йошкар-Ола, e-mail: kaf_po@mail.ru

При выборочной обработке произрастающих деревьев первым действием всегда является отбор их по качеству древесины. В связи с этим цель статьи – показать методологическую возможность разработки и уточнения системы акустических показателей древесины (САПД) применительно к действиям отбора растущих деревьев для последующей механической обработки древесины.

Ключевые слова: дерево, древесина, акустические показатели, закономерности

ACOUSTIC INDICATORS OF WOOD OF GROWING TREES

Mazurkin P.M., Kolesnikova A.A., Temnova E.B.

Mari State Technical University, Yoshkar-Ola, e-mail: kaf_po@mail.ru

At selective processing of growing trees by the first action their selection on quality of wood always is. In this connection article purpose – to show methodological possibility of working out and specification of system of acoustic indicators of wood (SAIW) with reference to actions of selection of growing trees for the subsequent machining of wood.

Keywords: tree, wood, acoustic indicators, regularities

При выборочной обработке произрастающих деревьев первым действием всегда является отбор их по качеству древесины. Например, при рубках ухода за лесом требуется извлечь из древостоя отстающие по биометрическим показателям дерева соответственно с худшей древесиной. А при заготовке спецсортиментов приисковыми рубками, наоборот, необходимо отбирать лидирующие деревья с лучшей по качеству древесиной. Таким образом, требования к свойствам древесины в конечном итоге определяют технологические процессы в выращивании деревьев, на лесозаготовках и деревообрабатывающих предприятиях.

Проблема рационального использования имеющихся в нашей стране древесных ресурсов может быть решена только на основе применения методов измерения свойств древесины у растущих деревьев с последующим информационным сопровождением почти каждого хлыста или бревна при его механической деревообработке. Анализ различных способов показал, что для дистанционных контактных (датчики на деревообрабатывающих машинах) или бесконтактных измерений могут быть применены ультразвуковые приборы.

В связи с этим *цель статьи* – показать методологическую возможность разработки и уточнения **системы акустических показателей древесины** (САПД) применительно к действиям отбора растущих деревьев для последующей механической обработки древесины.

Среди исследователей отсутствует общепринятая система акустических показателей даже применительно к условиям изготовления чистовых заготовок из древесины, в частности для музыкальных инстру-

ментов. Например, академик Н.Н. Андреев [1] предложил показатель **акустической константы** $K = \sqrt{E/\rho^3}$, где E – статический модуль упругости для условий изгиба балки; ρ – плотность древесины. Здесь явление распространения звука в древесине сопоставляется с изгибными колебаниями деревянной балки.

По Римский-Корсакову [1] для количественной оценки акустического качества древесины применяется показатель **декремент затухания звукового колебания** $\delta = K^{-1}$. В дальнейшем исследования В.Д. Никишова [2] показали, что значение K_{\max} не является характеристикой лучшей древесины для музыкальных инструментов. Для последних важна, прежде всего, однородность значений K по всей длине заготовки древесины для деки.

Проф. В.Д. Никишов и другие показали, что скорость звука является слабо изменчивым акустическим показателем. Поэтому многие ученые дали расчетные формулы, прежде всего исходя из этой характеристики показателя v .

Например, проф. Р. Кольман [3], обрабатывая результаты прямых замеров v , дал математическое выражение $K = v/\rho$, которое в сравнении с формулой Н.Н. Андреева уже имеет иной содержательный смысл. По Р. Кольману акустическую константу можно вычислять, как характеристику ослабления звукового излучения, непосредственно в ходе проведения экспериментов и без определения значения E изгибом прямоугольного образца древесины.

Все же попытки дальнейшего применения расчетной схемы Н.Н. Андреева (аналогия между процессами изгибных колеба-

ний бруса и струны) были и в дальнейшем. Например, Д. Хольц [4] предложил вычислять скорость распространения растяжения в брусках по формулу $v = \sqrt{E/\rho}$. Однако, очевидно, что в этом случае необходимо определять в камеральных условиях, конечно же после разрушения ствола дерева на образцы-бруски, значения двух показателей E и ρ , а по формуле Р. Кольмана – только ρ . Причем значение плотности ρ можно экспериментально определять на кернах, извлеченных из растущего дерева.

Скорость звука является одним из основных акустических показателей. Исходя из этого принципа В. Букур [5] предложила рассчитывать *грубый динамический модуль упругости* $E_d = v^2\rho$. Таким образом, исходные предпосылки к разработке САПД появились.

Для создания САПД был применен совершенно иной экспериментальный подход, исключая сбор массового статистического материала. Он заключается в том, что экспериментально изучается конкретное растущее дерево с его частичным разрушением в зоне извлечения керна древесины. В камеральных условиях керна древесины подвергается комплексному исследованию изменчивости САПД по радиусу ствола

(эксперименты выполнены А.А. Колесниковой). В итоге от сбора массового статистического материала многих обезличенных произрастающих деревьев перешли к изучению свойств древесины индивидуального дерева как целостного биологического организма. Аналогичные результаты были получены при рассмотрении стандартного образца древесины как сложного объекта исследования [9–17]. Поэтому основное внимание в этом случае обращается на связность отдельных показателей в САПД.

Методические предпосылки к изучению системы показателей мы нашли в статье [6], в которой одновременно рассматривались взаимосвязи между 10 параметрами. В нашем случае исследование керна древесины ели было выполнено по семи параметрам (табл. 1): R – радиус ствола дерева, мм; b – средняя ширина годичного слоя на отрезках керна, мм; ρ – плотность древесины на отрезках керна, кг/м³; v – скорость ультразвука в древесине вдоль керна, м/с; $K = v/\rho$ – акустическая константа, м⁴/(кг·с); $Z = v\rho$ – *удельное акустическое сопротивление*, кг/(м²·с) или Па·с/м; $p = v^2/\rho$ – *звуковое давление*, кг/(м·с²) или Па.

Обратные акустические показатели $\delta = K^{-1} = \rho/v$ (декремент затухания) и $v = Z^{-1} = v^{-1}\rho^{-1}$ (акустическая проводимость) в наших исследованиях не учитывались.

Таблица 1

Экспериментальные значения акустических показателей древесины

R , мм	b , мм	ρ , кг/м ³	v , м/с	K , м ⁴ /(кг·с)	Z , кПа·с/м	p , МПа
8,10	1,11	428,20	1426,40	3,33	610,78	871,22
18,20	1,71	357,49	1515,15	4,24	541,65	820,68
28,25	1,97	362,38	1523,81	4,21	552,20	841,45
38,45	-	355,11	1775,86	5,00	630,63	1119,90
48,75	1,93	361,40	1709,09	4,72	617,67	1055,65
58,38	2,00	353,40	1741,07	4,93	615,29	1071,27
68,65	-	356,40	1775,86	4,98	632,92	1123,97
78,88	1,65	369,12	1608,33	4,36	593,67	954,81
88,68	1,21	390,23	1524,19	3,91	594,78	906,56
98,65	1,28	400,56	1694,92	4,23	678,92	1150,71
108,75	1,00	419,50	1590,16	3,79	667,07	1060,75
114,00	0,90	420,07	1750,00	4,17	698,31	1286,46
129,60	0,73	412,00	1694,92	4,11	735,12	1183,57
140,00	0,70	426,24	1745,76	4,10	698,31	1299,04
150,93	0,63	443,67	1753,97	3,95	744,11	1311,29
162,40	0,69	423,44	1781,25	4,21	754,25	1343,51
174,35	0,68	429,51	1818,18	4,23	780,93	1419,86

Из вышеуказанного списка параметр R является исходным, а остальные зависят от него. После статистической идентификации

были получены математические модели, по которым максимальные относительные погрешности приведены в табл. 2:

$$b_R = 0,05704 \exp(0,01369R) + 0,3503R^{0,5436} \exp(-0,0003015R^{1,8535}); \quad (1)$$

$$\rho_R = 500,10 \exp(-0,03492R^{0,8196}) + 0,2573R^{1,7278} \exp(-0,009231R); \quad (2)$$

$$v_R = 1404,68 \exp(0,001467R) + 2,0004e - 05R^{5,7964} \exp(-0,1278R); \quad (3)$$

$$K_R = 1,1222 \exp(0,006658R) + 0,5324R^{0,7114} \exp(-0,01961R); \quad (4)$$

$$Z_R = 609669,0 \exp(-0,008065R) + 1582,2R^{1,2584} \exp(-0,002937R); \quad (5)$$

$$p_R = 917,02e - 06 \exp(-0,0002082R^{2,0711}) + 5251R^{3,3261} \exp(-0,03969R) + 1087300R^{1,3729}. \quad (6)$$

Таблица 2

Максимальная относительная погрешность формул, %

Параметры	<i>R</i>	<i>b</i>	ρ	<i>v</i>	<i>K</i>	<i>Z</i>	<i>p</i>
<i>R</i>	×	-	-	-	-	-	-
<i>b</i>	12,40	×	-	-	-	-	-
ρ	5,15	6,97	×	-	-	-	-
<i>v</i>	8,03	15,53	15,51	×	-	-	-
<i>K</i>	10,45	17,13	16,82	12,41	×	-	-
<i>Z</i>	8,07	9,14	16,63	10,98	45,0	×	-
<i>K</i>	18,00	17,83	41,0	11,65	48,0	14,70	×

Примечание. Полужирным шрифтом выделены лучшие значения по столбцам, а курсивом – по строкам.

Далее были получены математические модели влияния ширины годичного слоя (второй столбец табл. 2):

$$\rho_b = 1361,1 \exp(-1,7866b^{0,1574}) + 178,90; \quad (7)$$

$$v_b = 1513,04 \exp(0,1061b) - 97,706b^{3,4120} \exp(-0,8502b); \quad (8)$$

$$K_b = 5,2956 \exp(-0,3869b) + 2,3704b^{6,0792} \exp(-2,1350b); \quad (9)$$

$$Z_b = 1084040 \exp(-0,75706b) + 153320b^{1,1873}; \quad (10)$$

$$p_b = 3231,00e - 06 \exp(-1,4197b^{0,8051}) + 296,03e - 06b^{1,2357}. \quad (11)$$

Влияние плотности древесины описывается статистическими моделями:

$$v_\rho = 8364,00 \exp(-1,8908\rho) + 447,20\rho^{0,2439} \exp(-0,0003501\rho); \quad (12)$$

$$K_\rho = 6,9123 \exp(-9,686e - 06\rho^{1,8584}) + 0,6352; \quad (13)$$

$$Z_\rho = 1663,3\rho. \quad (14)$$

Модель $p = f(\rho)$ некорректна из-за высокой относительной погрешности.

Далее были получены уравнения:

$$K_v = 0,008003v^{0,8459}; \quad (15)$$

$$Z_v = 392,2v; \quad (16)$$

$$p_z = 0,000061443Z^{2,3469} \exp(-1,386e - 06Z). \quad (18)$$

указывает на то, что между звуковым давлением p (по В. Букур [5] – это грубый динамический модуль упругости) и удельным акустическим сопротивлением Z в древесине существует тесная взаимосвязь. Причем при некотором уровне акустического сопротивления достигается максимум звукового давления. Именно этот факт указывает на то, что удельное акустическое сопротивление (или, наоборот, акустическая проводимость) становится основным показателем в САПД. Акустическая константа приобретает вспомогательный характер.

$$p_v = 394,58v^2. \quad (17)$$

Модели Z_K и p_K недостаточно достоверны.

Все формулы соответствуют биотехническому закону [7] и следующая формула

Анализ данных табл. 2 показывает, что наиболее адекватна модель ρ_R при максимальной относительной погрешности 5,15%, то есть доверительная вероятность формулы (2) составляет не менее 95%. При этом влияние радиуса ствола дерева значимо также для показателей v и Z , а затем только для показателя K . Удельное акустическое сопротивление Z более значимо может быть использовано при анализе акустических свойств древесины, чем показатель акустической константы.

Общеизвестно, что чем проще математическое выражение исследуемого явления, тем оно объективнее. Поэтому формулы (1)–(6), учитывающие влияние радиуса ствола дерева, являются достаточно сложными. Поэтому формула (7) для показателя ρ_b значительно проще.

Далее еще раз выпишем наипростейшие математические модели (табл. 3).

1. $Z_p = 1663,3\rho$, $\Delta_{\max} = 16,63\%$, то есть акустическое сопротивление изменяется прямо пропорционально плотности древесины в действительности, а не только по исходному выражению $Z = \nu\rho$. Сопо-

ставлением двух выражений получаем $\nu_z^* = 1663,3$ м/с.

2. $Z_v = 1663,3\nu$, $\Delta_{\max} = 10,98\%$, то есть **акустическое сопротивление является замечательным показателем качества древесины**. Причем числа 1,6633 и 0,3922 весьма близки к числам «золотого сечения» 1,618 и 0,382. Поэтому попутно выдвигаем гипотезу о том [8], что чем ближе значения коэффициентов пропорциональности к соотношениям чисел Фибоначчи, тем лучше еловая древесина для изготовления музыкальных инструментов. Сравнение с $Z = \nu\rho$ показывает, что $\rho_z^* = 392,2$ кг/м³.

Таблица 3

Расчетные значения основных акустических показателей древесины

R, м	Удельное акустическое сопротивление, кПа с/м				Звуковое давление, МПа		Акустическая константа, м ⁴ /(кг с)	
	Z_p	$\Delta, \%$	Z_v	$\Delta, \%$	p_v	$\Delta, \%$	K_v	$\Delta, \%$
8,10	712,2	-16,6	559,5	8,4	802,8	7,9	3,73	-12,0
18,20	594,6	-9,8	594,3	-9,7	905,8	-10,4	3,92	7,5
28,25	602,8	-9,2	597,0	-8,2	916,2	-8,9	3,94	6,4
38,45	590,7	6,3	696,5	-10,4	1244,4	-11,1	4,49	10,2
48,75	601,9	2,6	670,3	-8,5	1152,6	-9,2	4,34	8,1
58,38	587,9	4,5	682,9	-11,0	1196,1	-11,6	4,41	10,5
68,65	592,9	6,3	696,5	-10,0	1244,4	-10,7	4,49	9,8
78,88	614,0	-3,4	630,8	-6,2	1020,7	-6,9	4,13	5,3
88,68	649,0	-9,1	597,8	-0,5	916,7	-1,1	3,94	-0,8
98,65	666,3	1,9	664,8	2,1	1133,5	1,5	4,31	-1,9
108,75	697,8	-4,6	623,7	6,5	997,7	5,9	4,09	-7,9
114,00	698,7	-0,1	686,4	1,7	1208,4	6,1	4,43	-6,2
129,60	685,3	6,8	664,8	9,6	1133,5	4,2	4,31	-4,9
140,00	709,0	-1,5	684,7	1,9	1202,6	7,4	4,42	-8,1
150,93	738,0	0,8	687,9	7,6	1213,9	7,4	4,44	-12,4
162,40	704,1	6,6	698,6	7,4	1251,9	6,8	4,50	-6,9
174,35	701,2	10,2	713,1	8,7	1304,4	8,1	4,58	-8,3

Примечание. Максимальные значения погрешности подчеркнуты.

3. $p_v = 394,58\nu^2$, $\Delta_{\max} = 11,65\%$, то есть звуковое давление не зависит от плотности древесины (исходная форма была $p = \nu^2\rho$), поэтому формула для вычисления p_p и не получилась (по табл. 2 погрешность равна 41,0%). При этом $\rho_p^* = 394,58$ кг/м³, значение близко к ρ_z^* и оно близко также к средней плотности древесины на всей рабочей части зерна.

4. $K_v = 0,008\nu^{0,8459}$, $\Delta_{\max} = 12,41\%$ и в этом случае декремент затухания звуковых колебаний будет равен

$$\delta = K^{-1} = 125,0\nu^{-0,8459}. \quad (19)$$

Формулы для вычислений Z_p , p_v и K_v замечательны и они позволяют надеяться на то, что непосредственно в лесу с помощью переносного ультразвукового прибора возможно измерение акустических показате-

лей древесины произрастающих деревьев, а затем вычисление плотности древесины по формуле

$$\rho = 0,0006012 Z. \quad (20)$$

Из данных табл. 3 видно, что в дальнейшем можно построить двухфакторные модели с дополнительным учетом в предыдущих формулах радиуса ствола дерева, влияющего на акустические показатели по волновой закономерности (это видно по изменению знаков погрешности). Исследования показали возможность оценки качества древесины растущих деревьев по показателям, зависящим от скорости распространения ультразвуковых волн.

Подробнее о моделировании: набрать в Google «Мазуркин Петр Матвеевич». Статья подготовлена и опубликована при поддержке гранта 3.2.3/12032 МОН РФ.

Список литературы

1. Римский-Корсаков А.В., Дьяконов Н.А. Музыкальные инструменты. – М.: Росгизместпром, 1952.
2. Никишов В.Д. Исследование механических свойств древесины неразрушающими методами: дис. ... канд. техн. наук. – М.: МЛТИ, 1976. – 192 с.
3. Kollman F. Holz und Gehall-theorie und Metzsurwendung // Holz-Zentralblatt. – 1983. – №14. – 2 Februar.
4. Holz D. Uber einige Zusammenhange zwischen forstlich-biologischen und akustischen Eigenschaften von Klangholz (Resonanzholz) // Holztechnologie. – 1984. – №1. – S. 31–36.
5. Bucur V. Devermination ohe Module D’Vong ohe bois Par une Methode dynamigve sur caroffes de Sondage // Ann. Sei. Forest. – 1981. – № 38(2). – P. 283–298.
6. Полубояринов О.И., Федоров Р.Б. Качество древесины культур сосны плантационного типа на Северо-западе Европейской части СССР // Лесоводство, лесные культуры и почвоведение: межвуз. сб. научн. тр. – Л.: ЛТА, 1991. – С. 89–95.
7. Мазуркин П.М. Биотехническое проектирование (справочно-методическое пособие). – Йошкар-Ола: МарПИ, 1994. – 348 с.
8. Колесникова А.А., Мазуркин П.М., Макарьева Т.А. Золотое сечение в акустике древесины // Циклы природы и общества. Часть 1. – Ставрополь: Изд-во Ставро. ун-та, 1996. – С. 137-138.
9. Варсегова Л.Ю., Мазуркин П.М., Фадеев А.Н. Практикум по экологическому древоведению; под ред. проф. П.М. Мазуркина. – Йошкар-Ола: МарГТУ, 2010. – 42 с.
10. Мазуркин П.М., Варсегова Л.Ю. Испытание растущего дерева / П.М. Мазуркин, Л.Ю. Варсегова // Успехи современного естествознания. – 2010. – № 4. – С. 38–43.
11. Мазуркин П.М., Варсегова Л.Ю. Измерение ширины годичного слоя на керне древесины // Успехи современного естествознания. – 2010. – № 4. – С. 31–37.
12. Мазуркин П.М., Варсегова Л.Ю. Измерение ширины годичных слоев сердцевин и присердцевинной зоны растущего дерева с использованием кернов // Деревообр. пром-сть. – 2010. – № 2. – С. 25–26.
13. Мазуркин П.М., Варсегова Л.Ю. Ультразвуковое испытание древесины растущего дерева на радиальных кернах // Деревообр. пром-сть. – 2010. – № 3. – С. 29–30.
14. Темнова Е.Б., Мазуркин П.М. Время распространения ультразвуковых колебаний через конусные насадки в эталонном образце из оргстекла // Казанская наука. – Казань: Изд-во Казанский Изд. Дом, 2010. – № 1. – С. 23–28.
15. Мазуркин П.М., Темнова Е.Б. Динамичность показателей прохождения ультразвука через прямоугольные образцы древесины ели разной длины // Казанская наука. – Казань: Изд-во Казанский Изд. Дом, 2010. – № 2. – С. 20–25.
16. Мазуркин П.М., Темнова Е.Б. Ультразвуковые показатели древесины ели, определённые на отрезках стандартного образца // Деревообработ. пром-сть. – 2010. – № 4. – С. 21–23.
17. Мазуркин П.М., Темнова Е.Б. Масштабный фактор ультразвуковых испытаний древесины ели вдоль волокон на стандартном образце // Современные наукоемкие технологии. – 2010. – № 6. – С. 57–69.