

М.В. Нецветов

**ВИБРАЦИИ В ЛЕСУ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ВЕТРА
(теоретический аспект оценки частот)**

М.В. Нецветов

Донецкий национальный университет

**ВІБРАЦІЇ У ЛІСІ ПІД ДІЄЮ ВІТРУ
(ТЕОРЕТИЧНИЙ АСПЕКТ ОЦІНКИ ЧАСТОТ)**

У роботі відпрацьовано підхід до теоретичного оцінювання частотних характеристик коливань дерев під впливом вітру, виходячи з геометричних та механічних властивостей стовбурів. Розроблено узагальнені схеми зміни частот коливань дерев, що росли у фітоценозі та окремо, а також залежно від виду дерев та сезону року. Розглянуто різноманіття особистих частот коливань дерев у ході онтогенезу. Описано загальну картину зміни частот вібрацій у лісі при зростанні висоти дерев.

Ключові слова: коливання, вітер, дерево, вібрація, частота.

M.V. Netsvetov

Donetsk National University

**VIBRATIONS IN FOREST UNDER WIND ACTION
(THEORETICAL ASPECT OF FREQUENCY ANALYZING)**

It is carried out trees vibration frequency analyzing method based on geometrical proportions. Wind action on trees is on the base of model. It is making schematic model of trees vibration frequency changing under the season influence, trees species and growth character: in the forest or on the opening territory. Trees vibration diversity and changing at its ontogenesis is also shown. Making schematic model of trees vibration frequencies dependently on forest high is made.

Key words: vibrations, wind, tree, frequency.

Известные данные о биологической активности вибраций внешнего и внутреннего для организмов происхождения (Вибрационная биомеханика, 1989; Романов, 1983; Темурьянц и др., 1992; Космическая экология, 1985; Космос и биологические ритмы, 1995), а также возможность генерации колебаний в лесу ставят ряд вопросов, актуальных для биологии и биогеоценологии в прикладном и фундаментальном аспектах. Так, недостаточно ясно, какова роль вибраций в лесу при взаимодействиях в пределах синузид, парцелл, консорций, фитоценозов и биоценозов в целом. Мало изучено значение и механизмы информационного взаимодействия животных со средой посредством вибраций различного происхождения. Не менее актуальным является и вопрос о роли вибраций, генерируемых ветром путем раскачивания деревьев, в процессе почвообразования под лесом. Эту проблему необходимо рассматривать в первую очередь с позиций взаимодействия древесной растительности и почвы (Зонн, Травлеев, 1989; Бельгард, Травлеев, 1980). Наличие ряда подобных вопросов показывает необходимость рассмотрения механизмов генерации вибраций в лесных биогеоценозах, а также их характерных особенностей.

В связи с этим целью настоящей работы явилось предварительное теоретическое определение диапазона частот вибраций в лесу при воздействии ветра на древесной.

I. Физическая модель колебания деревьев. Для оценки собственных частот колебаний стволов деревьев мы придерживались физической модели – ущемленной консольной конусной балки. Как известно (Никитин, 1990), частота f гармонических колебаний является величиной, обратной периоду $T = 2\pi\sqrt{m/C}$ (где m – масса, C – жесткость), представляющего собой решение уравнения Лагранжа-Дирихле. Жесткость системы определяется из равенства изгибающей ствол дерева силы ветра $F_1 = 3E \cdot J \cdot x / l^3$ (Дрейер, 1964) (где E – модуль упругости древесины, $J = \pi d^4 / 32$ – полярный момент инерции сечения основания (Дрейер, 1964), x – смещение наивысшей точки, l – высота ствола) и линейной восстанавливающей силы $F_2 = C \cdot x$ (Никитин, 1990), являющейся реакцией на F_1 . Характер распределения изгибающей силы ветра по длине ствола отражен в выражении F_1 . Поскольку лес обладает свойством снижать силу ветра и наиболее подверженными его действию будут верхушки деревьев (Быков, 1953), мы применили выражение для случая сосредоточенной нагрузки на вершине балки (Дрейер, 1964). В выражении для

восстанавливающей силы представим массу как произведение объема (V) на плотность (ρ). После соответствующих преобразований равенства $F_1 = F_2$ определяем выражение для частоты собственных колебаний ствола дерева:

$$F = 0,17d / l^2 \sqrt{E/\rho}. \quad (1)$$

Важно, что собственные частоты, как видно из формулы (1), не зависят от силы воздействующего на них ветра, поскольку отражают лишь свойства колеблющейся системы, а не вынуждающей силы (Никитин, 1990).

Проверку соответствия выведенной формулы производили путем сравнения результатов расчетов, произведенных с ее помощью, с экспериментальными и расчетными данными из работы А.М. Гришина и соавторов (Гришин, Голованов, Медведев, 2001). В указанной работе авторы исследовали колебания стального цилиндра и сосновой веточки, поэтому нами были внесены изменения, соответствующие цилиндрической консольной балке, в формулу (1). Рассчитанная нами по формуле (1) частота для стального цилиндра ($l = 53$ мм, $d = 1$ мм) равна 270 Гц, измеренная в работе А.М. Гришина и соавторов (2001) экспериментально – 312 Гц, рассчитанная теми же авторами по предлагаемой ими формуле – 365 Гц.

II. Колебания деревьев, растущих на свободе и в чистом древостое. Значения плотности и модуля упругости являются величинами, зависящими не от геометрических размеров ствола или ветвей, а от физических свойств древесины конкретной породы (Дрейер, 1964). Поэтому плотность и упругость отражают в себе видовую специфичность деревьев по упруго-механическим свойствам. Определяющими собственными частоты колебаний будут высота (l) и отношение диаметра к высоте (d/l), характеризующее конусность или «сбежность» ствола. Как известно (Сукачев, 1938; Щепотьев, Павленко, 1962 и др.), по данным параметрам между деревьями одного возраста, выросшими свободно и в фитоценозе, имеются существенные отличия. Так, для первых характерна большая конусность и меньшая высота ствола, а для вторых – почти цилиндрический удлиненный ствол. Большая по сравнению с длиной конусность в соответствии с формулой (1) определяет и более высокие собственные частоты колебаний стволов свободно растущих деревьев. Хотя в конкретном расчете необходимо учесть и разницу в массах кроны, увеличение которой в n раз приведет к снижению частоты в \sqrt{n} раз.

Индивидуальные отличия (или разнообразие) деревьев по собственным частотам колебаний стволов будут иметь место и в древостое (даже чистом) из-за дифференциации стволов или наличия различных классов жизненных состояний как результата конкуренции между растениями (Сукачев, 1938). При этом наибольшее значение в выживании отдельных деревьев будет иметь их высота, что обуславливает низкую выживаемость низкорослых особей в чистом древостое, где конкуренция в пределах одного яруса наиболее выражена (Бельгард, 1971).

Разнообразие частот колебаний стволов деревьев в чистом древостое можно проиллюстрировать, распределяя деревья подобно классификации жизненных состояний по морфологическим признакам, по Крафту (Быков, 1953). По собранным нами данным длин и диаметров сосен (*Pinus silvestris* L.) из искусственного насаждения в черте г. Донецка на рис. 1 представлена схема дифференциации деревьев по стволам и их собственным частотам. В класс 1 мы включили исключительно крупные деревья с диаметром ствола у основания $d = 0,4$ м и высотой $l = 15$ м; класс 2 – крупные с развитым стволом: 2а – $d = 0,35$ м, $l = 14$ м, 2б – $d = 0,3$ м, $l = 14$ м, 2с – $d = 0,25$ м, $l = 13$ м, 2д – $d = 0,35$ м, $l = 13$ м; класс 3 – средние, несколько отстающие в радиальном и вертикальном росте ствола: 3а – $d = 0,2$ м, $l = 13$ м, 3б – $d = 0,15$ м, $l = 12$ м; класс 4 – отстающие с тонкими стволами: 4а – $d = 0,1$ м, $l = 11$ м, 4б – $d = 0,1$ м, $l = 12$ м; класс 5 – отмирающие и отмершие с тонкими стволами разной высоты: 5а – $d = 0,07$ м, $l = 9$ м, 5б – $d = 0,07$ м, $l = 7$ м (значения плотности и модуля упругости взяты по Г. Дрейеру (1964) и А.С. Еноховичу (1983)).

Из приведенной схемы (см. рис. 1) видно, что деревья с малым диаметром относительно высоты (классы 4 – 5) обуславливают нижнюю границу в общем диапазоне частот, а деревья с большой конусностью (классы 2 – 3) – верхнюю. Можно предположить, что на протяжении жизни каждое дерево проходит несколько более или менее «низко-»

и «высокочастотных» этапов из-за неравномерного радиального и вертикального прироста (Сукачев, 1938; Сидельник, 1980; Щепотьев, Павленко, 1962 и др.). Так, в периоды интенсивного роста ствола в высоту, недостаточно компенсируемого увеличением конусности, собственные частоты колебаний будут снижаться. А по достижении возраста, при котором рост в высоту замедляется и практически останавливается, увеличение диаметра приведет к увеличению значения собственной частоты колебаний ствола.

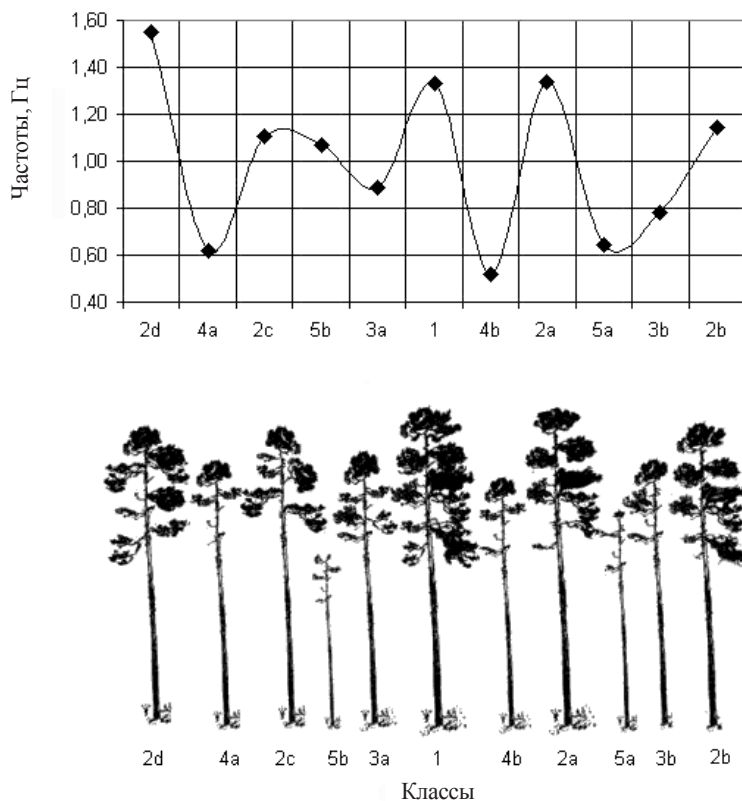


Рис. 1. Дифференциация сосны обыкновенной (*Pinus silvestris* L.) по собственным частотам стволов и их геометрическим параметрам (пояснения к классам даны в тексте)

Даже деревья, не достигшие старости, отмирающие или отмершие еще молодыми из-за потери в плотности и массе кроны, могут стать более «высокочастотными». Ветви дерева также будут иметь собственные частоты колебаний, не обязательно совпадающие с частотой ствола, что, по всей видимости, будет причиной наличия у дерева колебаний с несколькими модулированными частотами. Выявляя, таким образом, колебательные свойства отдельных деревьев и древостоя в целом, можно глубже подойти к пониманию жизненных форм и экологических характеристик того или иного вида.

III. Зависимость собственных частот колебаний от сезона и вида дерева. Для одного и того же дерева средних географических широт переход от зимнего сезона к летнему сопровождается увеличением плотности древесины. Неодинаковая степень сезонного изменения плотности должна обусловить различные диапазоны вариации собственных частот деревьев разных видов при одинаковой конусности (табл. 1, по данным плотностей различных пород А.С. Еноховича (1983)). С увеличением высоты «ранг» дерева в ряду видов по собственным частотам стволов может изменяться.

IV. Тип леса, ветер и характер вибраций. Как было рассмотрено выше, низкорослые деревья или кустарники имеют более высокие собственные частоты колебаний, чем деревья верхних ярусов. Можно предположить, что продвижение от невысокой древесно-кустарниковой опушки вглубь леса будет сопровождаться снижением собственных частот колебаний стволов, поскольку даже при наличии древесно-кустарникового подлеска ветер (основная причина колебаний) в нижних ярусах будет заметно ослаблен при невысокой скорости.

Таблица 1

Диапазоны изменений собственных частот колебаний стволов различных древесных пород

l, м	Частоты, Гц					
	липа	осина	сосна	дуб	паклен	ясень
10	0,5 - 2,4	0,5 - 2,3	0,5 - 2,2	0,5 - 2,1	0,4 - 1,9	0,4 - 1,1
15	0,3 - 1,6	0,3 - 1,6	0,3 - 1,5	0,3 - 1,4	0,3 - 1,2	0,3 - 0,7
20	0,2 - 1,2	0,2 - 1,2	0,2 - 1,1	0,2 - 1	0,2 - 0,9	0,2 - 0,6
25	0,2 - 1	0,2 - 0,9	0,2 - 0,9	0,2 - 0,8	0,2 - 0,7	0,2 - 0,6

Повторим, что важнейшим свойством собственных частот колебаний является их независимость от внешней вынуждающей силы (формула (1)). Однако кроме колебаний стволов и ветвей деревьев с собственными частотами ветер может стать причиной более высокочастотных колебаний, создающих гул или акустический шум в лесу, который генерируется при несимметричном отрыве потока воздуха от сечений частей растений при условии $Re = \rho \cdot v \cdot d / \mu > 60$, где Re – число Рейнольдса, критерий, характеризующий соотношение между инерционными силами и силами вязкости потока воздуха; ρ – плотность воздуха; v – скорость ветра; d – диаметр обтекаемого сечения; μ – коэффициент динамической вязкости газа (Гришин, 2001). Частоты возникающих таким образом колебаний будут зависеть от скорости ветра отнесенной к диаметру обтекаемой части дерева: $f = Sh \cdot v / d$, где $Sh = 0,2$ – число Струхала; v – скорость ветра; d – диаметр обтекаемого сечения (Физические величины, 1991).

Таблица 2

Частоты колебаний стволов и ветвей растений при несимметричном отрыве потока воздуха, Гц

Диаметр, м	Скорость ветра, м/с							
	0,1	0,8	5	10	20	30	50	100
< 0,1	4,0	32	200,0	400,0	800,0	1200,0	2000,0	4000,0
0,1	0,4	3	18,6	37,2	74,4	111,6	186,1	372,1
0,2	0,1	1	6,2	12,5	24,9	37,4	62,3	124,6
0,3	0,1	0,6	3,6	7,2	14,4	21,6	36,1	72,1
0,4	0,1	0,4	2,5	5,0	10,0	15,0	25,0	50,1
0,5	0,0	0,3	2,1	4,2	8,3	12,5	20,9	41,7
0,6	0,0	0,3	1,7	3,5	7,0	10,4	17,4	34,8
0,7	0,0	0,2	1,4	2,9	5,8	8,7	14,5	29,0
0,8	0,0	0,2	1,2	2,4	4,8	7,2	12,1	24,2
1,0	0,0	0,2	1,0	2,0	4,0	6,0	10,1	20,1

При сильном ветре даже достаточно крупные ветви и небольшие стволы будут колебаться с частотами в звуковом диапазоне (20 Гц и выше) (табл. 2, Re и Sh – по данным справочника «Физические величины» (1991) и А.М. Гришина (2001)).

Кроме того, сильный ветер, проникая в нижние ярусы, будет вызывать и оба типа колебаний в подлеске. Понятно, что чем богаче видовой состав деревьев в лесу, тем «насыщеннее» будут возникающие во время сильных ветров вибрации. Байрачные леса, включая несколько типов трофотопов, отличаются богатством видов древесно-кустарниковой растительности (Бельгард, 1971; Белова, Травлеев, 1999).

На основе изложенных выше данных (см. рис. 1, табл. 1 и 2) можно составить общую схему (рис. 2) генерации вибраций в лесу по разрезу через балку при сильном и слабом ветре. При ее составлении учтены наиболее характерные для байраков виды деревьев различных ярусов (дуб, липа, ясень, клен полевой, клен татарский и др.), окру-

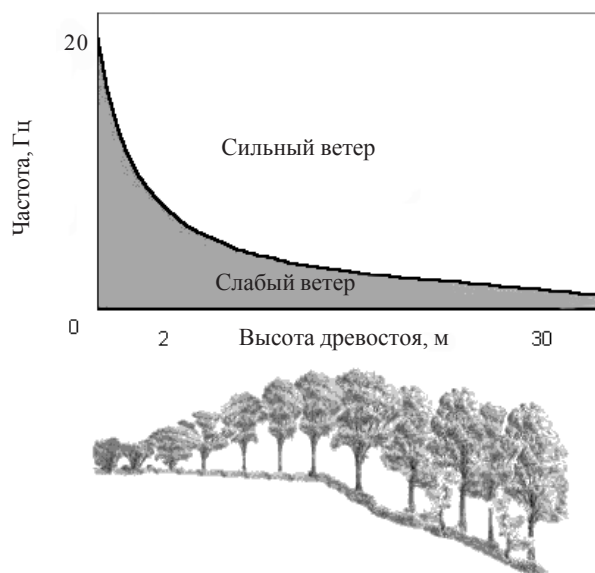


Рис. 2. Зависимость частот вибраций в лесу, возникающих под действием ветра, от высоты древесно-кустарниковой растительности

женных кустарниками при переходе к плакору. Верхний предел диапазона частот вибрации в лесу будет определяться более «легковесными» (например, *Tilia L.*) деревьями с выраженным конусом ствола, а нижний – более тяжелыми (*Quercus L.*, *Acer L.*), а также удлиненными, с небольшим диаметром ствола. Исходя из характеристик климата и эдафотопов степи и степного леса, можно заключить, что при переходе к более увлажняемым территориям вибрации вне сильных ветров имеют сверхнизкочастотный характер (~ 20 Гц), дополняющийся при сильном ветре более высокими частотами звукового диапазона (> 20 Гц).

ВЫВОДЫ

Частоты собственных колебаний стволов и ветвей деревьев не зависят от вынуждающей их силы ветра (или какой-либо другой), а определяются характером ее (силы) распределения вдоль ствола (или ветви), длиной последнего и отношением диаметра к длине – конусностью. Остальные показатели (модуль упругости и плотность) не зависят от геометрии ствола или ветви.

Дифференцированность стволов деревьев одного вида в древостое определяет их различия по собственным частотам колебаний. В связи с разными особенностями формирования кроны и стволов деревьев, растущих в древостое и на свободе, они характеризуются различием собственных частот колебаний стволов и ветвей.

При одинаковых геометрических пропорциях деревья разных видов отличаются по собственным частотам колебаний стволов. Такое видовое отличие может изменяться при различной высоте древостоя.

Сезонные вариации плотности древесины обуславливают изменение собственных частот колебаний стволов и ветвей деревьев в течение года. Ширина диапазона сезонных изменений частот зависит от вида дерева при одинаковых геометрических параметрах.

Каждое дерево в течение жизни претерпевает изменения собственных частот колебаний стволов в зависимости от характера динамики вертикального и радиального роста, а именно вследствие неравнозначного изменения конусности (d/l) и высоты (l).

Общий характер вибраций в лесу определяется несколькими причинами — как зависимыми, так и не зависимыми от силы ветра. Разнообразие частот вибраций в каждом конкретном типе леса будет определяться богатством его видового состава.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- Белова Н.А., Травлеев А.П. Естественные леса и степные почвы. – Д.: ДДУ, 1999. – 348 с.
- Бельгард А.Л. Степное лесоведение. – М.: Лесн. пром-сть, 1971. – 336 с.
- Бельгард А.Л., Травлеев А.П. Изучение взаимодействия растительности с почвами в лесных биогеоценозах степной Украины в свете воззрений С.В. Зонна // Вопросы биологической диагностики лесных биогеоценозов Присамарья. – Д.: ДГУ, 1980. – С. 5-12.
- Быков Б.А. Геоботаника. – Алма-Ата: АН Каз. ССР, 1953. – 457 с.
- Вибрационная биомеханика. Использование вибрации в биологии и медицине / К.В. Фролов, А.С. Миркин, В.Ф. Машанский и др. – М.: Наука, 1989. – 142 с.
- Гришин А.М., Голованов А.Н. Медведев В.В. О возникновении колебаний элементов лесных горючих материалов и их влиянии на режимы воспламенения и горения // Прикладная механика и техническая физика. – 2001. – Т. 42, № 4. – С. 127-135.
- Дрейер Г. Учение о прочности и упругости. – М.: Машиностроение, 1964. – 416 с.
- Енохович А.С. Справочник по физике и технике. – М.: Просвещение, 1983. – 255 с.
- Зонн С.В., Травлеев А.П. Географо-генетические аспекты почвообразования, эволюции и охраны почв. – К.: Наук. думка, 1989. – 216 с.
- Космическая экология / В.Г. Сидякин, Н.А. Темуриянц, В.Б. Макеев, Б.М. Владимирский. – К.: Наук. думка, 1985. – 176 с.
- Космос и биологические ритмы / Б.М. Владимирский, В.Г. Сидякин, Н.А. Темуриянц, В.Б. Макеев, В.П. Самохвалов. – Симферополь, 1995. – 206 с.
- Лоренц К. Обратная сторона зеркала. – М.: Республика, 1998. – 393 с.
- Никитин Н.Н. Курс теоретической механики. – М.: Высш. шк., 1990. – 607 с.
- Романов С.Н. Биологическое действие механических колебаний. – Ленинград: Наука, 1983. – 208 с.
- Сидельник Н.А. Изучение динамики приростов древесных стволов как показателя биогеоценологических связей в лесных насаждениях Присамарья // Вопросы биологической диагностики лесных биогеоценозов Присамарья. – Д.: ДГУ, 1980. – С. 93-100.
- Сукачев В.Н. Дендрология с основами лесной геоботаники. – Ленинград, 1938. – 576 с.
- Темуриянц Н.А., Владимирский Б.М., Тишкин О.Г. Сверхнизкочастотные электромагнитные сигналы в биологическом мире. – К.: Наук. думка, 1992. – 188 с.
- Физические величины: Справочник / А.П. Бабичев, Н.А. Бабушкина, А.М. Братковский и др. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 1232 с.
- Щепотьев Ф.Л., Павленко Ф.А. Быстрорастущие древесные породы. – М.: Сельхозиздат, 1962. – 374 с.

Надійшла до редколегії 27.02.03