

М.В. Нецветов, Е.П. Сулова

МЕХАНИЧЕСКАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ ДЕРЕВЬЕВ И КУСТАРНИКОВ К ВИБРАЦИОННЫМ НАГРУЗКАМ

древесные растения, транспорт, вибрация, механическая устойчивость

Введение

Движение автомобильного и железнодорожного транспорта является источником интенсивного акустического и вибрационного фона вблизи дорог [5]. Несмотря на негативный эффект шума и вибрации на человека, их действие на растительный организм исследовано недостаточно. Известно, однако, что вибрации могут оказывать как негативное, так и положительное влияние на растения [7]. В единичных работах исследованы реакции растений на звук [14]. Нами ранее было показано, что вибрации с параметрами, при которых не происходит значимых изменений ростовых показателей, оказывают существенное влияние на всхожесть семян и рост проростков злаков при наличии в растворе для замачивания (или полива) химических медиаторов – солей тяжелых металлов или органических стимуляторов [4, 10]. В связи с этим становится очевидной необходимость подбора видов древесных растений для насаждений вблизи дорог с учетом их устойчивости не только к химическим загрязнителям, но и к физическому (акустическому и вибрационному) воздействию транспорта.

Целью настоящей работы было определение свойств древесно-кустарниковых растений, которые обеспечивают их механическую устойчивость к вибро-акустическим воздействиям.

Объекты и методика исследований

В работе исследовали механические свойства древесины деревьев и кустарников из коллекции Донецкого ботанического сада НАН Украины (ДБС), которые применяются в озеленении либо являются перспективными с позиций зимостойкости, засухоустойчивости и декоративности кроны или цветения [1, 3, 6, 8-9].

Нами приняты следующие теоретические предпосылки проведения экспериментальных исследований. Важнейшими механическими свойствами древесных и кустарниковых растений являются плотность (ρ) и модуль упругости (E) древесины. Как для живых растений, так и для изделий из них эти показатели являются видоспецифичными. Даже среди древесных форм они значительно варьируют. Так, виды, произрастающие на территории Европы, характеризуются минимальными значениями плотности древесины (в сухом состоянии, т.е. при 12% влажности) – ~ 400 кг/м³ для ивы белой (*Salix alba* L.), а максимальными – для самшита вечнозеленого (*Buxus sempervirens* L.) – ~ 950 кг/м³ [18]. Модуль упругости – соотношение между приложенной нагрузкой и величиной деформации, вызванной ею, – изменяется в зависимости от направления, в котором приложена сила. Он максимален в направлении роста древесных волокон. Между плотностью ρ [кг/м³] и модулем упругости E [Па]·10⁹ существует зависимость: $E=56,3 \cdot \rho^{0,84}$ для мягкой древесины и $121,1 \cdot \rho^{0,7}$ для твердой в сухом состоянии [21]. Модуль упругости также значительно варьирует от вида к виду.

Модуль упругости и плотность древесины изменяются и в зависимости от условий произрастания [16], в основном от интенсивности регулярных механических нагрузок (ветер, осадки и др.). Изменения в строении тканей в ответ на действие механических нагрузок типа прикосновения и трения (тигмоморфогенез [13]) и при изгибах и вибрациях (сейсмоморфогенез [11, 15]) носят приспособительный характер и направлены на усиление механической прочности. Так как механическая нагрузка распределена неравномерно по высоте ствола (она максимальна в нижней его части), плотность и модуль упругости изменяются соответственно. Оба эти параметра заметно варьируют при изменении влажности древесных волокон: плотность растет пропорционально влажности, а модуль упругости имеет сложную зависимость от нее [20]. Механические характеристики любых частей растения изменяются также в ответ на повреждение растительными животными или паразитами [17, 19]. Следовательно, жизнеспособность растения во многом зависит от его механических свойств, которые находятся под жестким действием отбора [16].

В контексте механической устойчивости растений к вибро-акустическим воздействиям модуль упругости и плотность приобретают особое значение, поскольку они определяют многие акустические свойства растительных тканей. Так, скорость распространения упругой волны (или звука) в волокнах древесины определяется как

$$c=(E/\rho)^{1/2}. \quad (1)$$

Акустический (или волновой) импеданс определяется как

$$z=c\rho=(E\rho)^{1/2}. \quad (2)$$

Он играет особую роль в передаче вибрации с почвы на дерево. Относительная интенсивность упругой волны, прошедшей с грунта на дерево, будет определяться следующим соотношением:

$$I_1/I_2=4z_2z_1/(1+z_2/z_1)^2, \quad (3)$$

где z_2 и z_1 – волновые сопротивления древесных волокон и почвы, соответственно. Из формулы (3) видно, что чем больше различаются волновые сопротивления почвы и древесных волокон, тем меньшая доля энергии вибрации почвы будет передана дереву. Видовые отличия растений по механическим свойствам древесины дают возможность подбора состава пород деревьев с высокой механической устойчивостью к вибрационному воздействию автотранспорта.

Вибрации грунта растение воспринимает корнями, расположенными близко к поверхности, и стволом. Поэтому морфология и механические характеристики коры должны иметь определенное влияние на распространение вибраций по дереву. Большое значение имеет толщина коры, которая отразится на затухании упругих волн. Другим важным свойством коры является ее слоистость, наличие воздуха между слоями, что также приводит к затуханию колебаний. Очевидной является меньшая подверженность вибрациям деревьев с доминирующим стержневым корнем перед деревьями с большим количеством горизонтальных корней в приповерхностном слое почвы, поскольку в последнем случае увеличивается площадь поверхности, воспринимающей вибрацию.

Вязкость экстракта и влажность волокон древесины также непосредственным образом отражаются на гашении колебаний, распространяемых по древесным волокнам. Так, возрастание вязкости приводит к увеличению коэффициента затухания вибрации, поскольку большая часть ее энергии тратится на внутреннее трение. От влажности затухание зависит сложным образом, но для живого растения зависимость обратно пропорциональная [20].

Форма кроны имеет большое значение в двух аспектах распространения вибраций по дереву: во-первых, низко расположенные ветви являются демпферами (т.е. способствуют затуханию) [12]; во-вторых, высота первых ответвлений и раздвоение ствола определяют максимальную длину волны, которая может распространяться по дереву, а значит и минимальную частоту. Собственная частота вибрации определяется из следующего соотношения:

$$f=c/\lambda, \quad (4)$$

где c – скорость упругой волны (скорость звука), λ – длина волны.

Толщина ствола также прямо сказывается на амплитуде проходящих по дереву вибраций. Амплитуда – обратно пропорциональна квадрату толщины вибрирующей части.

Продольный модуль упругости деревьев и кустарников измеряли стандартным методом по величине прогиба цилиндрической балки (части свежеспиленной ветви), защемленной одним концом, под действием нагрузки. Плотность (объемный вес) древесных волокон определяли методом погружения и взвешивания. Влажность определяли как отношение разности веса образца в свежеспиленном и абсолютно сухом состояниях к весу в абсолютно сухом состоянии. Все исследования проведены в феврале – начале марта 2009 г.

Результаты исследований и их обсуждение

Для исследованных древесно-кустарниковых растений из коллекции ДБС, перспективных для озеленения, характерен значительный разброс как по плотности древесины, так и по модулю упругости (табл. 1). Так, максимальными значениями модуля упругости обладают бундук двудомный (*Gymnocladus dioica* (L.) K. Koch.) и дуб красный (*Quercus rubra* L.), наименьшими – сосна гибкая (*Pinus flexilis* James), желтая (*Pinus ponderosa* C. Lawson), пихта одноцветная (*Abies concolor* (Gord. et Glend.) Lindl.), ива белая (*Salix alba* L.) и сумах пушистый (*Rhus typhina* L.). При этом сосна гибкая и сумах пушистый обладают и очень низкой плотностью древесины.

Таблица 1. Показатели основных параметров механических свойств исследованных древесно-кустарниковых растений

Вид	Показатели параметров			
	E, Н/м ² ·10 ⁻⁹	ρ, кг/м ³	Z, Нс/м ³ ·10 ⁻⁵	W, %
<i>Abies concolor</i> Lindl. et Gord.	0,9±0,18	1019±7,6	9,7±0,94	92±0,1
<i>Acer campestre</i> L.	2,4±0,20	1113±9,9	16,4±0,69	76±0,1
<i>A. ibericum</i> M. Bieb. ex Willd.	6,3±0,64	1207±26,8	27,5±1,44	61±0,1
<i>Aesculus hippocastanum</i> L.	1,5±0,10	903±5,1	11,6±0,40	91±0,1
<i>Ailanthus altissima</i> (Mill.) Swingle	3,2±0,27	753±5,9	15,5±0,66	67±0,1
<i>Amorpha fruticosa</i> L.	9±0,88	670±12,0	24,5±1,23	54±0,2
<i>Aronia melanocarpa</i> (Michx.) Elliot	1,9±0,16	1013±11,4	13,8±0,58	63±0,1
<i>Berberis thunbergii</i> DC.	1,5±0,20	606±6,8	9,6±0,62	68±0,2
<i>Betula davurica</i> Pall.	9,4±1,15	1131±16,2	32,6±2,01	70±0,1
<i>B. pubescens</i> Ehrh.	4,3±0,35	980±7,1	20,6±0,83	76±0,1
<i>Buxus sempervirens</i> L.	2,7±0,25	1119±11,8	17,5±0,81	62±0,1
<i>Caragana arborescens</i> Lam.	10,9±1,23	820±8,2	29,9±1,69	67±0,1
<i>Carpinus betulus</i> L.	11,6±0,92	1110±7,4	35,8±1,44	61±0,0
<i>Colutea orientalis</i> Mill.	10,9±1,53	1014±12,7	33,3±2,34	58±0,1
<i>Cornus mas</i> L.	6,4±0,62	1007±14,5	25,4±1,25	78±0,2
<i>Corylus avellana</i> L.	6,9±0,53	835±8,0	23,9±0,93	54±0,1
<i>C. colurna</i> L.	2,1±0,20	738±5,2	12,4±0,59	110±0,2
<i>Cotoneaster horizontalis</i> Dcne.	7,7±0,90	907±16,5	26,4±1,56	81±0,2
<i>Crataegus submollis</i> Sarg.	5,1±0,41	1044±8,0	23,1±0,93	57±0,1
<i>Eucommia ulmoides</i> Oliver	6,9±0,53	857±3,3	24,3±0,94	85±0,1
<i>Fagus orientalis</i> Lipsky	6,4±0,46	1017±7,5	25,6±0,93	84±0,1
<i>Fraxinus excelsior</i> L.	1,8±0,22	789±8,8	11,8±0,75	65±0,1
<i>Ginkgo biloba</i> L.	3,5±0,23	771±7,0	16,3±0,54	83±0,1
<i>Gleditsia triacanthos</i> L.	6,1±0,52	1134±9,5	26,4±1,12	69±0,1
<i>Gymnocladus dioicus</i> (L.) K. Koch	17,4±2,06	720±14,4	35,4±2,12	57±0,2
<i>Halimodendron halodendron</i> (Pall.) Voss	4,7±0,56	942±9,4	21±1,27	63±0,1
<i>Juglans nigra</i> L.	4,8±0,31	487±3,2	15,2±0,50	26±0,0
<i>Larix decidua</i> Mill.	6,5±0,55	880±3,7	23,9±1,02	90±0,1
<i>Ligustrum vulgare</i> L.	5,9±0,58	407±2,3	15,5±0,76	73±0,1
<i>Liriodendron tulipifera</i> L.	3,9±0,29	499±2,3	14±0,52	46±0,0
<i>Magnolia kobus</i> Thunb.	6,1±0,45	851±5,8	22,8±0,84	117±0,1
<i>Mahonia aquifolium</i> (Pursh) Nutt.	2,5±0,24	1060±25,3	16,2±0,82	80±0,2
<i>Malus floribunda</i> Sieb. (ветвь)	2,7±0,27	1063±8,4	16,9±0,84	128±0,2
<i>M. floribunda</i> Sieb. (ствол)	2,9±0,64	1077±9,3	17,6±1,98	78±0,1
<i>Metasequoia glyptostroboides</i> Hu et W.C. Cheng	3,4±0,35	975±4,0	18,3±0,95	136±0,1
<i>Morus alba</i> L.	2,1±0,14	712±4,0	12,3±0,41	74±0,1
<i>Parrotia persica</i> (DC.) C.A. Mey.	8,9±0,97	1155±11,0	32,2±1,76	70±0,1
<i>Paulownia tomentosa</i> (Thunb.) Steud.	1,8±0,11	644±3,2	10,9±0,34	156±0,2
<i>Philadelphus coronarius</i> L.	4,9±0,68	809±10,1	19,8±1,39	61±0,1
<i>Pinus flexilis</i> James.	0,2±0,02	462±2,6	2,9±0,18	116±0,2
<i>P. ponderosa</i> Dougl. ex C. Laws.	0,2±0,02	876±5,8	4±0,21	100±0,1
<i>Platanus orientalis</i> L.	4,3±0,30	1037±3,8	21,1±0,75	91±0,0
<i>Platicladus orientalis</i> (L.) Franco	2,7±0,26	830±10,4	15±0,72	116±0,3
<i>Populus pyramidalis</i> Borkh.	2,1±0,20	878±19,1	13,6±0,67	104±0,4
<i>Pseudotsuga menziesii</i> (Mirbel) Franco	1,3±0,09	1026±9,9	11,6±0,41	100±0,1
<i>Pyracantha coccinea</i> (L.) M. Roem.	5,6±0,58	1029±11,8	24,1±1,25	76±0,1

Вид	Показатели параметров			
	E, Н/м ² ·10 ⁻⁹	ρ, кг/м ³	Z, Нс/м ³ ·10 ⁻⁵	W, %
<i>Quercus robur</i> L.	6,4±0,55	944±17,2	24,5±1,08	73±0,2
<i>Q. rubra</i> L.	17,8±1,82	1041±11,0	43±2,21	63±0,1
<i>Rhus typhina</i> L.	1,0±0,06	544±4,0	7,2±0,23	86±0,2
<i>Robinia pseudoacacia</i> L.	3,9±0,45	735±15,0	16,9±0,99	63±0,2
<i>Salix alba</i> L.	0,9±0,05	835±6,0	8,5±0,27	100±0,1
<i>Sophora japonica</i> L.	5±0,47	1029±13,6	22,6±1,07	79±0,1
<i>Sorbus aria</i> (L.) Crantz	5±0,41	1038±10,2	22,8±0,93	77±0,1
<i>S. alnifolia</i> (Siebold et Zucc.) K. Koch	3,7±0,44	1150±23,0	20,5±1,26	80±0,2
<i>S. domestica</i> L.	1,9±0,20	1124±16,1	14,6±0,78	59±0,1
<i>S. latifolia</i> Pers.	2,5±0,36	1012±11,9	15,9±1,15	63±0,1
<i>S. torminalis</i> (L.) Crantz	3,3±0,23	1154±10,9	19,4±0,68	67±0,1
<i>Spiraea ×vanhouttei</i> (Briot) Zabel	7,2±0,52	1102±8,5	28,3±1,03	46±0,0
<i>Symphoricarpos albus</i> (L.) S. F. Blake	6,8±0,66	416±2,5	16,9±0,82	64±0,1
<i>Syringa josikaea</i> Jacq.	5,3±0,46	723±5,9	19,6±0,85	82±0,1
<i>S. vulgaris</i> L.	2,2±0,20	1014±9,8	14,9±0,68	66±0,1
<i>Taxus baccata</i> L.	8,8±0,76	907±7,6	28,3±1,23	77±0,1
<i>Tilia caucasica</i> Rupr.	2,1±0,18	850±7,1	13,3±0,57	108±0,2
<i>T. cordata</i> Mill.	2,1±0,16	815±7,0	13,2±0,51	111±0,2
<i>T. japonica</i> (Miq.) Simonkai	2,2±0,16	853±4,3	13,6±0,49	134±0,1
<i>T. platyphyllos</i> Scop.	2,4±0,21	955±6,4	15,1±0,66	93±0,1
<i>T. tomentosa</i> Moench	2,9±0,22	942±7,3	16,5±0,64	97±0,1
<i>Ulmus laevis</i> Pall.	1±0,07	963±8,4	9,6±0,35	84±0,1

Примечания: E – модуль упругости древесины, ρ – плотность древесины, Z – акустический импеданс древесины, W – влажность древесины.

Все исследованные деревья можно разделить на группы по расположению в границах доверительных интервалов степенных зависимостей E от ρ. Как показано на рис. 1, деревья и кустарники были разбиты на 6 групп (сплошные линии – границы интервалов). В группу I вошли в основном хвойные с низкими значениями модуля упругости. В группы II-III попали древесные и кустарниковые растения с невысокими и средними значениями модуля упругости. Растения IV группы характеризуются средним или высоким значением модуля упругости, V – высоким. В VI группу вошли растения двух видов – бундук двудомный и дуб красный, которые характеризуются модулем упругости больше 15 ГН/м², что в ~1,5 раза выше соответствующих значений в V-ой группе. Растения некоторых видов могут значительно отличаться между собой по механическим свойствам волокон. Так, для березы даурской (*Betula davurica* Pall.) (n=5 деревьев) значение модуля упругости варьирует в пределах от 1,5 до 9,4 ГН/м², а плотность – от 900 до 1130 кг/м³. Для метасеквойи глиптостробусовидной (*Metasequoia glyptostroboides* Hu et W.C. Cheng) (n=2) модуль упругости – 1,1-3,4 ГН/м². Такой разброс значений может быть связан с тем, что условия произрастания отражаются на механических свойствах растений всех видов [16], при этом у растений отдельных видов такая зависимость особенно выражена [2]. Для большинства исследованных видов растений отклонение от среднего значения модуля упругости не превышало 15 %, а плотности – 1,5 %.

Скорость звука и акустическое сопротивление тканей исследованных деревьев и кустарников имеют более четко определяемую зависимость от модуля упругости древесины, чем от её плотности (рис. 2). С позиций подбора пород древесных растений, устойчивых к вибрациям, передаваемым через грунт, наиболее важным параметром является волновое сопротивление. Как было отмечено выше, оно определяется плотностью и модулем упругости древесных волокон. В распределении исследованных растений по акустическому импедансу выделяется максимум в интервале 17,1-22,9·10⁵ Н·с/м³ (рис. 3). В этот интервал попадают деревья с сильно отличающимися значениями плотности и модуля упругости древесины. Например, минимальное зна-

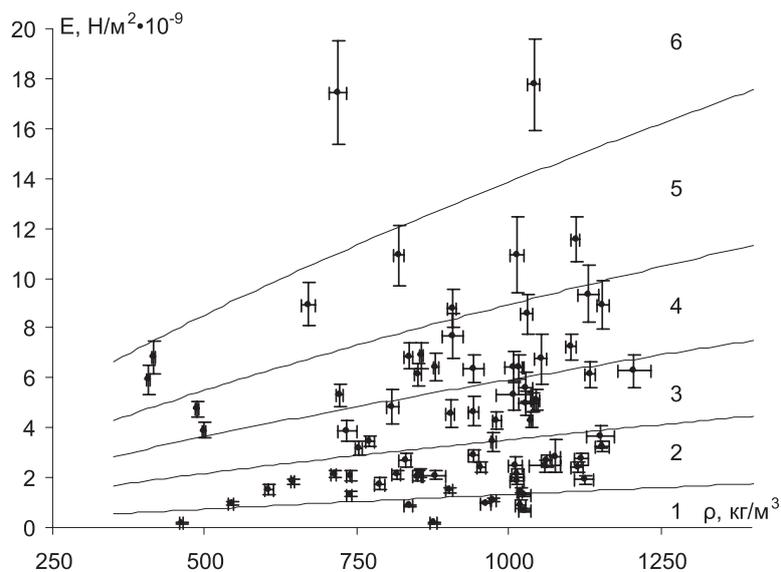


Рис. 1. Распределение деревьев и кустарников в поле модуля упругости (E) и плотности (ρ) древесных волокон. Сплошные линии представляют собой теоретические зависимости модуля упругости от плотности:

$$E_1=0,004 \cdot \rho^{0,84}, E_2=0,028 \cdot \rho^{0,7}, E_3=0,047 \cdot \rho^{0,7}, E_4=0,071 \cdot \rho^{0,7}, E_5=0,11 \cdot \rho^{0,7}$$

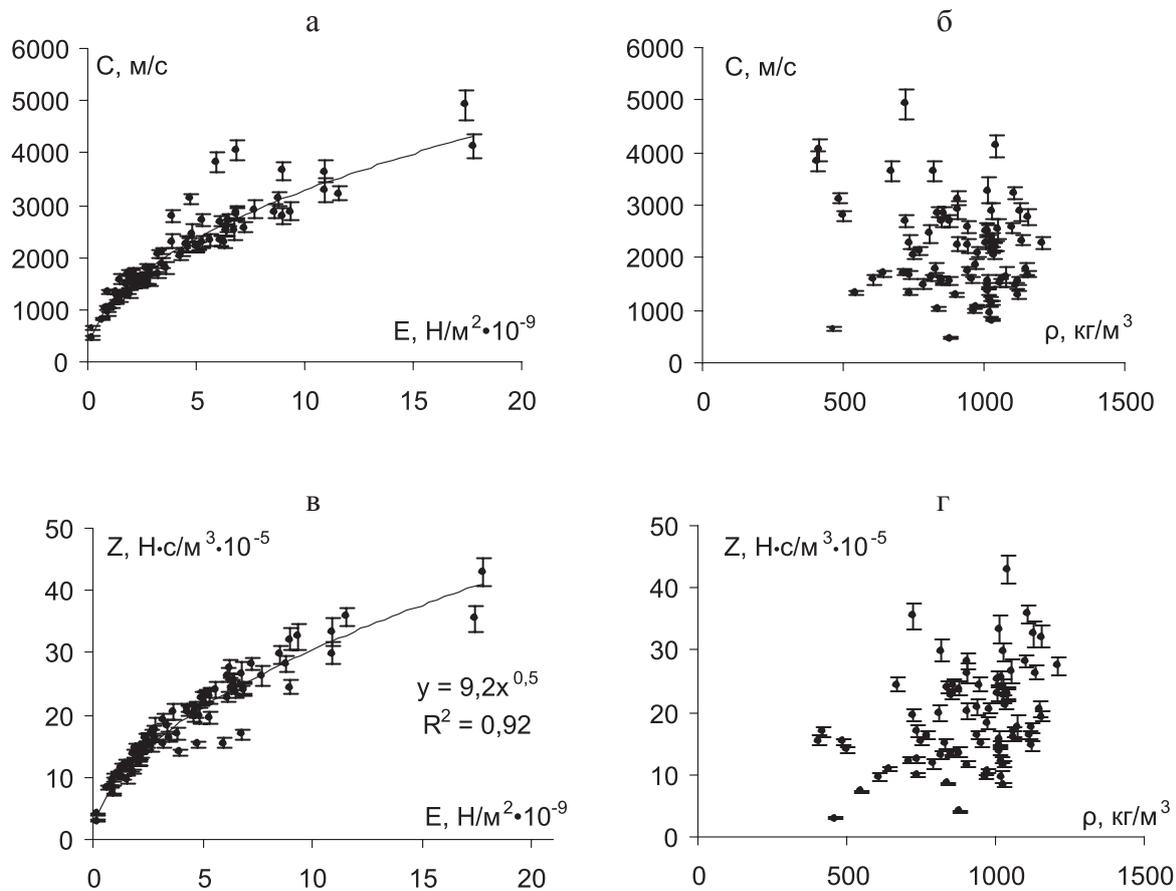


Рис. 2. Зависимость скорости звука (C) и акустического импеданса (Z) от модуля упругости (E) (а, в) и плотности (ρ) (б, г) древесных волокон

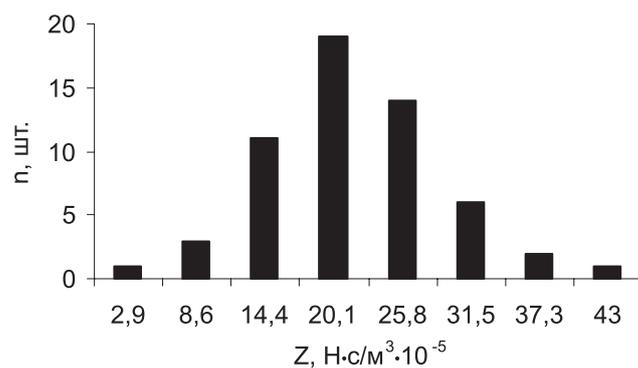


Рис. 3. Распределение деревьев и кустарников по акустическому импедансу (Z) древесных волокон

чение модуля упругости в данной группе – $2,7 \text{ ГН/м}^2$ (*Buxus sempervirens*), а максимальное – $6,1 \text{ ГН/м}^2$ (*Magnolia kobus*). Плотность древесины растений в данном интервале варьирует в пределах от $722,9 \text{ кг/м}^3$ (*Syringa josikaea*) до $\sim 1119\text{-}1153 \text{ кг/м}^3$ (*Buxus sempervirens*, *Sorbus torminalis* и *S. alnifolia*). То есть, сочетание относительно низкого значения плотности древесины при высоком значении её модуля упругости (или наоборот) обуславливает среднее по всей выборке значение акустического импеданса. Левое и правое крылья распределения по данному параметру почти симметричны.

Поскольку акустический импеданс древесины выше, чем у почвы, то, согласно формуле (3), для снижения энергии вибрации, переданной дереву от грунта и индуцированной движением транспорта, необходимо подбирать породы деревьев с максимальными значениями акустического импеданса. Поэтому в выборке исследуемых растений мы отобрали те из них, акустический импеданс которых выше $\sim 19 \cdot 10^5 \text{ Н·с/м}^3$. Почва – чернозем обыкновенный – в условиях города Донецка характеризуется акустическим импедансом – $1,1\text{-}1,3 \cdot 10^5 \text{ Н·с/м}^3$. Это, в соответствии с формулой (3), обуславливает передачу на отобранные деревья не более 25% энергии вибрации грунта (табл. 2). На графике распределения видов деревьев и кустарников в поле модуля упругости и плотности древесины соответствующие значения расположены в правом верхнем углу (см. рис. 1).

Другая физическая характеристика древесины – влажность – является весьма важной при распространении вибраций по дереву. Для живых деревьев рост влажности волокон приводит к увеличению затухания вибраций. Как показано в таблице 1, виды древесных растений с высокой влажностью обладают в основном низкими значениями волнового сопротивления, т.е. более высокими значениями передаваемой от почвы энергии. Вместе с тем, максимальные значения волнового импеданса (минимум процента переданной энергии вибрации) соответствуют влажности от 57 до 70 %. В рассматриваемой группе максимальные значения влажности выше 90% характерны для *Magnolia kobus*, *Metasequoia glyptostroboides* и *Platanus orientalis*.

Выводы

Исследованные виды древесно-кустарниковых растений, произрастающие на территории Донецкого ботанического сада, значительно различаются по механическим свойствам волокон. Модуль упругости древесины изменяется от $0,2 \text{ ГНм}^2$ (*Pinus flexilis*, *P. ponderosa*) до $>17 \text{ ГНм}^2$ (*Quercus rubra*). Плотность древесины в свежеспиленном состоянии варьирует от 407 кг/м^3 (*Ligustrum vulgare*) до $>1200 \text{ кг/м}^3$ (*Acer ibericum*, *Quercus rubra*, *Sorbus aria*, *Syringa vulgaris* и др.). Сочетание этих параметров обуславливает значительный разброс видов по проценту передаваемой дереву с почвы энергии упругой волны. Наиболее перспективные по декоративности и засухоустойчивости в условиях юго-востока Украины и, вместе с тем, механически устойчивые к вибрациям виды могут быть пригодными для посадки в первом ряду вдоль дорог при дополнительном учете устойчивости к аэрополлютантам. К ним относятся: *Quercus rubra*, *Carpinus betulus*, *Betula davurica*, *Acer ibericum*, *Cotoneaster horizontalis*, *Fagus orientalis*, *Philadelphus coronarius*, *Syringa josikaea*, *Metasequoia glyptostroboides*, *Platanus orientalis*, *Sorbus aria* и некоторые другие. Древесные растения с низкими значениями плотности и модуля упругости древесины, и соответственно высокими значениями энергии вибрации, передаваемой дереву через грунт, более пригодны для посадки в наиболее удаленных от дороги рядах. К ним относятся в первую очередь *Abies concolor*, *Berberis thunbergii*, *Pinus flexilis* и *P. ponderosa*.

Таблица 2. Перечень устойчивых к вибрациям видов древесно-кустарниковых растений и соответствующие коэффициенты прохождения упругой волны

Вид	1-R, %
<i>Acer ibericum</i> Bieb.*	17,5+3,51
<i>Amorpha fruticosa</i> L.	19,5+3,90
<i>B. pubescens</i> Ehr.	22,0+4,39
<i>Betula davurica</i> Pall.*	14,6+2,92
<i>Caragana arborescens</i> Lam.	15,9+3,18
<i>Carpinus betulus</i> L.*	13,5+2,69
<i>Colutea orientalis</i> Mill.	14,6+2,92
<i>Cornus mas</i> L.	18,8+3,76
<i>Corylus avellana</i> L.*	19,5+3,90
<i>Cotoneaster horizontalis</i> Dcne.*	18,1+3,63
<i>Crataegus submollis</i> Sarg*	20,3+4,05
<i>Eucommia ulmoides</i> Oliver	19,5+3,90
<i>Fagus orientalis</i> Lipsky*	18,1+3,63
<i>Gleditsia triacanthos</i> L.	18,1+3,63
<i>Gymnocladus dioicus</i> (L.) K. Koch	13,8+2,76
<i>Halimodendron halodendron</i> Voss	22,0+4,40
<i>Larix decidua</i> Mill.*	19,5+3,90
<i>Magnolia kobus</i> Thunb.*	20,3+4,05
<i>Metasequoia glyptostroboides</i> Hu et W.C. Cheng*	25,1+5,03
<i>Parrotia persica</i> (DC.) C.A. Mey.	15,0+3,00
<i>Philadelphus coronarius</i> L.*	22,9+4,58
<i>Platanus orientalis</i> L.*	22,0+4,39
<i>Pyracantha coccinea</i> (L.) M. Roem.	19,5+3,90
<i>Q. rubra</i> L.*	11,4+2,28
<i>Quercus robur</i> L.*	19,5+3,90
<i>S. aria</i> (L.) Crantz*	20,3+4,05
<i>S. torminalis</i> (L.) Crantz*	24,0+4,80
<i>Sophora japonica</i> L.	20,3+4,05
<i>Sorbus alnifolia</i> (Siebold et Zucc.) K. Koch	22,9+4,58
<i>Spiraea×vanhouttei</i> (Briot) Zabel*	17,0+3,39
<i>Syringa josikaea</i> Jacq.*	22,9+4,58
<i>Taxus baccata</i> L.*	17,0+3,39

Примечание: * – вид перспективный по декоративности, зимостойкости и засухоустойчивости

1. Дацько А. М. Интродукция видов рода *Sorbus* L. в Донецком ботаническом саду НАН Украины / А. М. Дацько // Промышленная ботаника. – 2004. – Вып. 4. – С. 121–124.
2. Древесные породы мира: в 3-х т. / [ред. Воробьев Г. И.]. – М.: Лесн. пром-сть, 1982. – Т. 2. – 352 с.
3. Лихацкая Е. Н. Исследование урожайности видов рода *Tilia* L. в Донецком ботаническом саду / Е. Н. Лихацкая // Відновлення порушених природних екосистем: 3-я міжнародн. наук. конф., 7–9 жовтня 2008 р.: мат. конф. – Донецьк, 2008. – С. 520–522.
4. Нецветов М. В. Совместное действие вибрации и химических медиаторов на рост ячменя / М. В. Нецветов // Промышленная ботаника. – 2008. – С. 35–40.
5. Нецветов М. Вибраційний вплив автомобільного транспорту на дерева придорожніх смуг / М. Нецветов, О. Сусллова // Вісник Львів. ун-ту. Серія Біологічна. – 2008. – Вип. 48. – С. 75–82.
6. Поляков А. К Хвойные на юго-востоке Украины / А. К. Поляков, Е. П. Сусллова. – Донецк: Норд-Пресс. – 2004. – 195 с.
7. Растительная клетка при изменении геофизических факторов / [К. М. Сытник, Е.Л. Кордюм, Е. М. Недуха и др.]; под. ред. В. Ф. Машанского. – К.: Наук. думка, 1984. – 136 с.

8. Суслова Е. П. Интродукция и перспективы использования в зеленом строительстве *Magnolia kobus* DC. на юго-востоке Украины / Е. П. Суслова // Промышленная ботаника. – 2006. – Вып. 6. – С. 83–86.
9. Суслова Е. П. Редкие виды древесных растений в городских насаждениях г. Донецка / Е. П. Суслова, А. К. Поляков // Відновлення порушених природних екосистем: 3-я міжнародн. наук. конф., 7-9 жовтня 2008 р.: мат. конф. – Донецьк, 2008. – С. 520-522.
10. Хиженков П. К. Накопление свинца растениями под влиянием электрических токов и вибраций / П. К. Хиженков, М. В. Нецветов // Экологія та ноосферологія. – 2006. – №1-2. – С. 51–54.
11. Biddington N. L. The effect of mechanically-induced stress in plants: a review / N. L. Biddington // Journal of plant growth regulation. – 1986. – 4. – P. 103-123.
12. Brüchert F. The effect of wind exposure on the tree aerial architecture and biomechanics of Sitka spruce (*Picea sitchensis*, Pinacea) / F. Brüchert, B. Gardiner // American Journal of Botany. – 2006. – 93. – P. 1512-1521.
13. Jaffe M. J. Thigmomorphogenesis: the response of plant grows and development to mechanical stimulation / M. J. Jaffe // Planta. – 1973. – 114. – P. 143-157.
14. Jeong M.-J. Plant gene responses to frequency-specific sound signals / M.-J. Jeong, C.-K. Shim, J.-O. Lee et al. // Mol. Breeding. – 2008. – 21. – P.217-226.
15. Mitchell C. A. Seismomorphogenic regulation of plant growth / C. A. Mitchell, C. J. Severson, J. A. Wott, P. A. Hammer // Journal of the American Society of Horticultural Science. – 1975. – 100. – P. 891-898.
16. Read J. Plant biomechanics in an ecological context / J. Read, A. Stokes // American Journal of Botany. – 2006. – 93. – P. 1546-1565.
17. Sanson G. D. The biomechanics of browsing and grazing / G. D. Sanson // American Journal of Botany. – 2006. – 93. – P. 1531-1545.
18. Sell J. Eigenschaften und Kenngrößen von Holzarten / J. Sell. – Zürich: LIGNUM, 1989. – 270 p.
19. Sun D. Trampling resistance, stem flexibility and leaf strength in nine Australian grasses and herbs / D. Sun, M. J. Little // Biological Conservation. – 1993. – 65. – P. 35-41.
20. Wegst U. G. K. Wood for sound / U. G. K. Wegst // American Journal of Botany. – 2006. – 93. – P. 1439-1448.
21. *Wood Handbook*: wood as an engineering material. General Technical Report 113. – Madison, U. S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Product Laboratory, 1999. – 285 p.

Донецкий ботанический сад НАН Украины

Получено 15.07.2009

УДК 58.031

МЕХАНИЧЕСКАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ ДЕРЕВЬЕВ И КУСТАРНИКОВ К ВИБРАЦИОННЫМ НАГРУЗКАМ

М. В. Нецветов, Е. П. Суслова

Донецкий ботанический сад НАН Украины

В статье рассмотрен механический аспект устойчивости древесно-кустарниковых растений к вибрационному воздействию транспорта. Вибрации, вызванные транспортным потоком, распространяясь по дорожному полотну и почве, передаются на деревья и кустарники придорожных полос. Энергия вибрации, переданной растению, зависит от механических свойств его тканей (плотность, модуль упругости, скорость звука, акустический импеданс), которые, таким образом, определяют его устойчивость к вибрационному воздействию. Наиболее низкие значения относительной энергии вибрации, переданной дереву или кустарнику от почвы, имеют такие виды из коллекции Донецкого ботанического сада: *Acer ibericum* M. Bieb. ex Willd., *Betula davurica* Pall., *Carpinus betulus* L., *Cotoneaster horizontalis* Dcne., *Fagus orientalis* Lipsky, *Metasequoia glyptostroboides* Hu et W.C. Cheng, *Philadelphus coronarius* L., *Platanus orientalis* L., *Quercus rubra* L., *Sorbus aria* (L.) Crantz, *Syringa josikaea* Jacq., *Syringa josikaea* и некоторые другие.

UDC 58.031

MECHANICAL STABILITY OF TREES AND SHRUBS UNDER VIBRATION LOADS

M.V. Netsvetov, E.P. Suslova

Donetsk Botanical Garden, National Academy of Sciences of Ukraine

The paper considers mechanical aspect of stability of trees under transportation vibrations. Traffic-induced vibrations spreading along the roadbed and the ground are transmitted to trees and shrubs in the road zone. The energy of vibrations transmitted to plants depends on mechanical properties of their tissue, i.e. density, Young's modulus, sound velocity and acoustical impedance; thus the latter determine mechanical stability of trees under vibration loads. The lowest values for relative vibration energy transmitted to a tree or shrub from the ground are typical of the following trees from the collection of Donetsk Botanical Garden: *Acer ibericum* M. Bieb. ex Willd., *Betula davurica* Pall., *Carpinus betulus* L., *Cotoneaster horizontalis* Dcne., *Fagus orientalis* Lipsky, *Metasequoia glyptostroboides* Hu et W.C. Cheng, *Philadelphus coronarius* L., *Platanus orientalis* L., *Quercus rubra* L., *Sorbus aria* (L.) Crantz, *Syringa josikaea* Jacq., *Syringa josikaea*, and some others.