

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ДЕРЕВЬЕВ К ВИБРАЦИОННЫМ НАГРУЗКАМ

Обсуждается устойчивость деревьев к вибрации почвы, вызванной движением транспорта. Исследовано затухание вибрации при переходе с почвы на деревья разных видов, которое служило основным критерием устойчивости. Среди исследованных видов наибольшей механической устойчивостью к вибрациям обладают *Pseudotsuga menziesii* (Mirbel) Franco, *Platanus orientalis* L., *Magnolia kobus* Thunb., *Corylus colurna* L., *Acer ibericum* M. Bieb. ex Willd., *Juglans nigra* L., *Larix decidua* Mill. Обсуждаются факторы, снижающие амплитуду вибрации на дереве.

Движение автомобильного и железнодорожного транспорта является источником интенсивного акустического и вибрационного фона вблизи дорог [1]. Известен негативный эффект шума и вибрации на человека, однако их действие на растительный организм исследовано недостаточно. Вибрации могут оказывать как негативное, так и положительное влияние на растения [5]. В отдельных работах исследованы реакции растений на звук [10]. 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, 7]. 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.

Механическая устойчивость (или стабильность) дерева изучается прежде всего как способность противостоять статическим и динамическим нагрузкам, например,

ветровым [9]. Механическая устойчивость определяется механическими свойствами тканей растения, жесткостью ветвей корней и ствола дерева, аэродинамической структурой кроны и корневой системы [2]. В случае вибрационной нагрузки от движения автотранспорта понятие устойчивости базируется в первую очередь на коэффициенте прохождения упругой волны из окружающей среды (почвы) на растение: $C = ((Z_2 - Z_1) / (Z_2 + Z_1))^2$, где Z_1 и Z_2 — соответственно волновое сопротивление древесных тканей и почвы [3]. Из приведенной формулы 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 позволяют подбирать состав пород деревьев с высокой механической устойчивостью к вибрационному воздействию автотранспорта. Если под устойчивостью понимать C , то ее можно определить теоретически по измеренным значениям плотности и модулю упругости древесины и почвы [3]. Однако следует учитывать, что вибрация, переданная дереву почвой, распространяясь по дереву, затухает в зависимости от вязко-эластических свойств древесных волокон, размера ствола и морфологии коры. Поэтому для определения наиболее устойчивых

к действию вибрации деревьев необходимо провести экспериментальное исследование.

Цель исследования — экспериментальное определение механической устойчивости некоторых видов деревьев к вибрации почвы.

Материалы и методы

Объект и место проведения исследования. В работе изучали деревья, произрастающие в Донецком ботаническом саду НАН Украины, прошедшие первичную интродукцию и акклиматизированные в условиях юго-востока Украины, обладающие декоративными качествами и являющиеся перспективными для применения в зеленом строительстве.

Возбуждение и регистрация вибраций почвы и дерева. Вибрацию (упругую поперечную волну) почвы индуцировали методом «тест-удара» с помощью ударника. Данный метод широко применяется в технике для определения дефектов и собственных частот конструкций, а также при исследовании колебаний растений [8]. Для регистрации вибраций использовали пьезоэлектрические датчики, которые соединяли с осциллографом фирмы «Velleman». Запись осциллограмм проводили на почве вокруг дерева на расстоянии от 0,15 м до 1 м от ствола, а также на стволе на высоте 30 см.

Определение механической устойчивости дерева к вибрациям. Затухание вибрационного сигнала на почве определяли с учетом параметров измеренной зависимости амплитуды упругой волны от пройденного ею расстояния. В качестве основного критерия механической устойчивости использовали отношение (U_0) амплитуд вибрации почвы на расстоянии 30 см от ствола дерева и на стволе на высоте 30 см. Влияние корней, расположенных вблизи поверхности почвы, на амплитуду вибрации ствола определяли при ее возбуждении в разных точках окружности вокруг ствола. Эффективность передачи вибра-

ции над поверхностными корнями определяли как разницу (ΔU_0) относительных амплитуд вибрации, прошедшей от источника к стволу над корнями и в случае их отсутствия.

Результаты и обсуждение

Упругое возмущение на почве, вызванное ударом, индуцировало затухающую поперечную упругую волну, которая распространялась со средним коэффициентом затухания ($9,8 \pm 3,7$) дБ/м (рис. 1). Вблизи отдельных деревьев он составлял от 1,59 до 14,36 дБ/м. Распространение вибрации с почвы на дерево сопровождалось снижением ее амплитуды, величина которого зависела от места возбуждения упругой волны вокруг ствола. В эксперименте с *Platanus orientalis* L. упругое возмущение создавали на расстоянии 70 см от ствола поочередно в нескольких точках окружности вокруг дерева. Затухание вибрации было минимальным, если ее возбуждение осуществляли напротив корней, основание которых было на поверхности почвы. На рис. 2 это точки, которые соответствуют 90 и 180 градусам. Разница между минимальным и максимальным затуханием (ΔU_0) в точках 90 и 0 градусов соответственно составила 6,9 дБ.

Для всех исследованных деревьев, у которых можно было определить направление

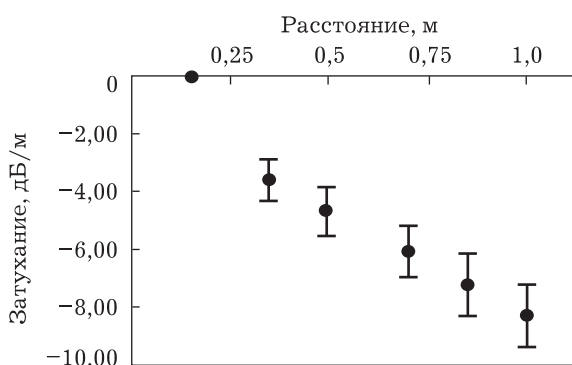


Рис. 1. Затухание амплитуды упругой волны на поверхности почвы в зависимости от пройденного ею расстояния

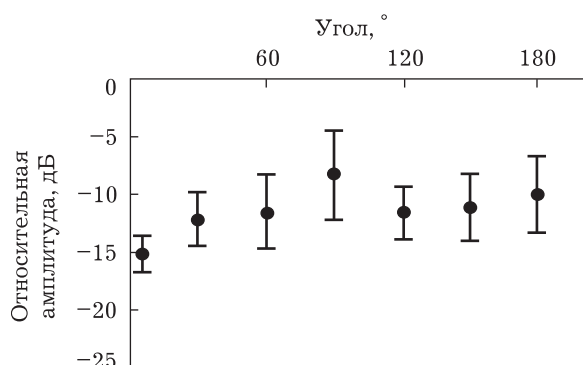


Рис. 2. Относительная амплитуда вибрации при ее прохождении с почвы на ствол *Platanus orientalis* L. в зависимости от места возмущения на почве вокруг дерева (пояснения в тексте)

роста корней вблизи поверхности почвы, были характерны более высокие значения амплитуды вибрации, если между местом ее возбуждения и стволом находились такие корни. Разница между максимальным и минимальным затуханием вибрации вокруг

Таблица 1. Разница относительных амплитуд вибрации (ΔU_0) при ее распространении по почве над поверхностными корнями дерева и при их отсутствии

Вид	ΔU_0 , дБ	Уровень значимости
<i>Acer ibericum</i> M. Bieb. ex Willd.	2,7	0,001
<i>Corylus colurna</i> L.	4,7	0,001
<i>Crataegus submollis</i> Sarg.	4,3	0,001
<i>Ginkgo biloba</i> L.	3,1	0,001
<i>Juglans nigra</i> L.	6,2	0,001
<i>Larix decidua</i> Mill.	6,3	0,001
<i>Magnolia kobus</i> Thunb.	6,9	0,050
<i>Pinus flexilis</i> James.	4,1	0,001
<i>P. ponderosa</i> Dougl. ex C. Laws.	4,4	0,001
<i>Platanus orientalis</i> L.	4,4	0,001
<i>Pseudotsuga menziesii</i> (Mirbel) Franco	7,5	0,001
<i>Quercus robur</i> L.	2,8	0,001
<i>Q. rubra</i> L.	3,3	0,078

разных деревьев значительно варьировала, но в большинстве случаев она была статистически достоверной (табл. 1).

Для определения отношения амплитуд упругой волны на почве у ствола и на стволе эксперимент проводили на участке вокруг дерева с отсутствием или минимальным количеством поверхностных корней. Как показано в табл. 2, максимальные значения U_0 характерны для *Pseudotsuga menziesii* (Mirbel) Franco (n=5), *Platanus orientalis* (n=1), *Magnolia kobus* Thunb. (n=1), *Larix decidua* Mill. (n=3), *Juglans nigra* L. (n=3), *Corylus colurna* L. (n=5), *Acer ibericum* M. Bieb. ex Willd. (n=5). С минимальным затуханием вибрация проходит на деревьях *Crataegus submollis* Sarg. (n=3), *Fagus orientalis* Lipsky (n=1), *Ginkgo biloba* L. (n=2), *Liriodendron tulipifera* L. (n=2), *Metasequoia glyptostroboides* Hu et W.C. Cheng (n=2), *Pinus ponderosa* Dougl. ex C. Laws. (n=1), *Quercus robur* L. (n=3), *Taxus baccata* L. (n=3). Из приведенных данных видно также, что малым затуханием обладают в основном невысокие деревья с малым диаметром ствола. Коэффициент корреляции относительной амплитуды с высотой и диаметром ствола составил 0,51 и 0,62 соответственно.

Поскольку исследованные деревья каждого вида имели близкие значения высоты и диаметра ствола, то для исследования связи между затуханием вибрации при переходе с почвы на дерево и диаметром ствола были изучены несколько деревьев *Quercus rubra* L. с разным диаметром ствола. Как показано на рис. 3, деревья с наибольшими диаметрами стволов обладают наибольшими значениями относительной амплитуды, то есть затухание вибрации на них выше.

Увеличение амплитуды вибрации при малом диаметре ствола, вероятно, обусловлено его изгибными колебаниями, которые вызывает упругая волна почвы. Данный эффект диаметра предсказан теорией С.П. Тимошенко [6] и эксперимен-

Таблица 2. Относительная амплитуда вибрации (U_0), высота и диаметр ствола дерева

Вид	U_0 , дБ	Высота, м	Диаметр основания, см
<i>Acer ibericum</i>	$-13,2 \pm 1,23$	$6,0 \pm 0,5$	$28,0 \pm 0,5$
<i>Corylus colurna</i>	$-13,6 \pm 2,49$	$9,0 \pm 1,0$	$37,5 \pm 2,5$
<i>Crataegus submollis</i>	$-3,9 \pm 1,38$	$6,0 \pm 1,0$	$28,0 \pm 2,5$
<i>Fagus orientalis</i>	$-4,7 \pm 2,06$	$6,5 \pm 0,5$	$27,5 \pm 1,0$
<i>Ginkgo biloba</i>	$-5,7 \pm 1,47$	$6,0 \pm 0,5$	$19,5 \pm 0,5$
<i>Juglans nigra</i>	$-11,4 \pm 0,94$	$9,5 \pm 1,5$	$38,0 \pm 2,5$
<i>Larix decidua</i>	$-12,1 \pm 1,57$	$8,5 \pm 1,5$	$28,0 \pm 2,0$
<i>Liriodendron tulipifera</i>	$-3,0 \pm 2,48$	$6,0 \pm 1,0$	$18,0 \pm 1,5$
<i>Magnolia kobus</i>	$-15,0 \pm 1,55$	$6,5 \pm 0,5$	$33,0 \pm 0,5$
<i>Metasequoia glyptostroboides</i>	$-5,7 \pm 3,60$	$6,5 \pm 0,5$	$23,0 \pm 0,5$
<i>Pinus flexilis</i>	$-9,7 \pm 1,16$	$2,7 \pm 0,2$	$14,0 \pm 0,5$
<i>P. ponderosa</i>	$-3,59 \pm 1,37$	$2,6 \pm 0,2$	$9,0 \pm 0,5$
<i>Platanus orientalis</i>	$-19,3 \pm 2,18$	$12,0 \pm 0,5$	$43,0 \pm 1,0$
<i>Pseudotsuga menziesii</i>	$-21,7 \pm 1,48$	$10,5 \pm 2,0$	$34,0 \pm 2,0$
<i>Quercus robur</i>	$-3,28 \pm 0,81$	$12,0 \pm 1,0$	$35,5 \pm 3,0$
<i>Taxus baccata</i>	$-4,24 \pm 1,25$	$2,7 \pm 0,5$	$5,5 \pm 1,5$

тальными исследованиями [8], в ходе которых было выяснено, что изгибные колебания большой амплитуды характерны для растений с относительно небольшим диаметром.

Другим важным критерием при выборе пород, устойчивых к вибрации, является толщина коры и ее морфологические особенности. У крупных деревьев *Quercus rubra* толщина коры на высоте 50 см составляет более 1,5 см, она плотно и равномерно покрывает ствол. Для определения роли коры в гашении вибрации проведен эксперимент в двух вариантах: 1) при возбуждении упругой волны ударником по стволу и регистрации ее на расстоянии 50 см от ствола; 2) после освобождения от коры части ствола, куда наносили удар и регистрировали вибрацию. В результате было выявлено, что после удаления коры изменение амплитуды составило 10,8 дБ, то есть она возросла в 12 раз.

У *Corylus colurna* кора чешуйчатая, ее верхние слои неплотно прилегают к нижним и фактически являются демпферами (смягчителями вибраций). В эксперименте мы провели две серии опытов: в первой из-

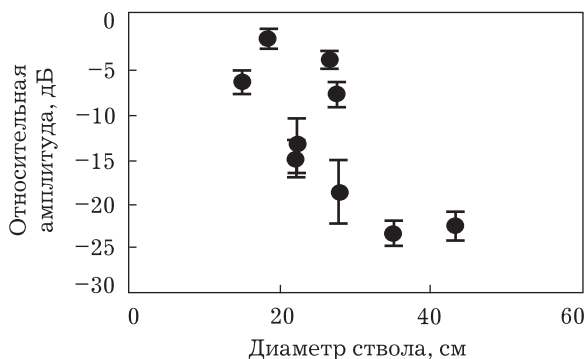


Рис. 3. Зависимость относительной амплитуды вибрации при переходе с почвы на дерево от диаметра ствола *Quercus rubra* L.

меряли вибрации при интактной коре, во второй — после снятия верхнего слоя. Было выяснено, что разница в амплитуде вибрации при ее стандартном возбуждении при интактной и снятой коре составляет 7,4 дБ. Таким образом, при наличии коры амплитуда была ниже примерно в 5,5 раза.

Выводы

Затухание амплитуды вибрации при ее прохождении с почвы на деревья исследованных

видов варьирует от $-(3,28 \pm 0,81)$ до $-(21,7 \pm 1,48)$ дБ. Деревья с малым диаметром ствола являются менее устойчивыми к вибрации почвы из-за возбуждения изгибных колебаний большой амплитуды. Затухание вибрации на стволе дерева в значительной степени обусловлено наличием и морфологическими свойствами коры. При наличии корней, расположенных близко к поверхности почвы, затухание вибрации при переходе с почвы на дерево снижается. Среди исследованных видов максимальным затуханием вибрации при переходе с почвы на ствол обладают *Pseudotsuga menziesii*, *Platanus orientalis*, *Magnolia kobus*, *Corylus colurna*, *Acer ibericum*, *Juglans nigra*, *Larix decidua*.

Перспективы дальнейших исследований. Полученные результаты определяют два направления дальнейших исследований: 1) исследование влияния аэродинамической структуры кроны и механических свойств древесных волокон на устойчивость деревьев к вибрациям грунта и к ветровым нагрузкам; 2) формирование схем зеленых насаждений, ограничивающих распространение вибраций грунта, которые индуцируются движением транспорта.

1. Нецветов М., Сулова О. Вибраційний вплив автомобільного транспорту на дерева придорожних смуг // Вісн. Львів. ун-ту. Сер. біол. — 2008. — Вип. 48. — С. 75–82.

2. Нецветов М.В., Хиженков П.К., Сулова Е.П. Введение в вибрационную экологию. — Донецк, 2009. — 165 с.

3. Нецветов М.В., Сулова Е.П. Механическая устойчивость деревьев и кустарников к вибрационным нагрузкам // Промышленная ботаника. — 2009. — С. 60–67.

4. Нецветов М.В. Совместное действие вибрации и химических медиаторов на рост ячменя // Промышленная ботаника. — 2008. — С. 35–40.

5. Растительная клетка при изменении геофизических факторов / Под ред. В.Ф. Машанского. — К.: Наук. думка, 1984. — 136 с.

6. Тимошенко С.П., Гудьер Дж. Теория упругости. — М.: Наука, 1975. — 576 с.

7. Хиженков П.К., Нецветов М.В. Накопление свинца растениями под влиянием электрических токов и вибраций // Экологія та ноосферологія. — 2006. — № 1–2. — С. 51–54.

8. Casas J., Magal C., Sueur J. Dispersive and non-dispersive waves through plants: implications for arthropod vibratory communication // Proc. R. Soc. B. — 2007. — 274. — P. 1087–1092.

9. James K.R., Haritos N., Ades P.K. Mechanical stability of trees under dynamic loads // Am. J. Bot. — 2006. — 93. — P. 1522–1530.

10. Jeong M.-J., Shim C.-K., Lee J.-O. et al. Plant gene responses to frequency-specific sound signals // Mol. Breeding. — 2008. — 21. — P. 217–226.

Рекомендовал к печати П.Е. Булах

М.В. Нецветов

Донецкий ботанический сад НАН України, Україна, м. Донецьк

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ВИЗНАЧЕННЯ МЕХАНІЧНОЇ СТІЙКОСТІ ДЕРЕВ ДО ВІБРАЦІЙНИХ НАВАНТАЖЕНЬ

Обговорюється стійкість дерев до вібрації ґрунту, спричиненої рухом транспорту. Досліджено згасання вібрації при переході з ґрунту на дерева різних видів, яке слугувало основним критерієм стійкості. Серед досліджених видів дерев найбільшу механічну стійкість до вібрацій мають *Pseudotsuga menziesii* (Mirbel) Franco, *Platanus orientalis* L., *Magnolia kobus* Thunb., *Corylus colurna* L., *Acer ibericum* M. Bieb. ex Willd., *Juglans nigra* L., *Larix decidua* Mill. Обговорюються чинники, що знижують амплітуду вібрації на дереві.

M.V. Netsvetov

Donetsk Botanical Garden, National Academy of Sciences of Ukraine, Ukraine, Donetsk

EXPERIMENTAL EXAMINATION OF TREES MECHANICAL STABILITY UNDER SOILBORNE VIBRATIONS

The trees stability under transport traffic vibrations is discussed in the paper. It is studying the vibration damping on the stem of several species. Among examined species the most stable to vibrations ones are *Pseudotsuga menziesii* (Mirbel) Franco, *Platanus orientalis* L., *Magnolia kobus* Thunb., *Corylus colurna* L., *Acer ibericum* M. Bieb. ex Willd., *Juglans nigra* L., *Larix decidua* Mill. There are factors of plantborne vibration damping discussed in the paper.