

ОРИГИНАЛЬНЫЕ
СТАТЬИ

УДК 58.055:674.031.772.224.3

**ВЛИЯНИЕ АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ЛИСТЬЕВ
НА КОЛЕБАНИЯ СТВОЛА КЛЕНА ЛОЖНОПЛАТАНОВОГО**

© 2012 г. М. В. Нецветов

*Донецкий ботанический сад Национальной академии наук Украины
83059 Донецк, просп. Ильича, 110*

E-mail: *disfleur76@live.fr*

Поступила в редакцию 22.10.2010 г.

Приведены результаты исследования влияния листьев и упругости древесины на частоту и затухание колебаний взрослых деревьев и семян клена ложноплатанового *Acer pseudoplatanus* L. Увеличение массы листьев приводит к снижению собственных частот колебаний семян. Основной физический механизм влияния листьев на частоту колебаний клена ложноплатанового – увеличение массы растения. Влияние листьев на затухание колебаний состоит не только в увеличении массы растения, но и в аэродинамическом сопротивлении листовых пластинок, которое зависит от высоты размещения листа. Листья, расположенные в верхней части растения, обладают максимальным аэродинамическим демпфированием, а растущие ближе к основанию в основном играют роль дополнительной массы, снижающей гашение колебаний.

Ветер, клен ложноплатановый, листья, колебания, демпфирование.

Воздействие сильных ветров на деревья является основной причиной ветровалов, которые приводят к существенным экономическим убыткам [2, 6, 15, 19]. Сохранность лесов и искусственных насаждений во многом обеспечивается снижением скорости ветра вблизи полога древостоя и в кронах деревьев [11]. Увеличение риска массового повреждения деревьев может являться результатом неудачной схемы посадки или подбора видов, несоответствующих климатическим и метеорологическим условиям произрастания [1, 5, 7, 14]. Колоссальная энергия ветра, в отдельных случаях приводящая к ветровалам и вывалам [3], рассеивается не только древостоем как целостной системой, но и отдельными деревьями. Существует несколько механизмов рассеивания энергии ветра деревом. 1) Соударение раскачивающихся ветвей одного или соседних деревьев [16, 17]. При этом удар вызывает высокочастотную вибрацию ветвей, которая распространяется по древесным волокнам и частично затухает в них, а частично передается окружающей среде – воздуху и почве в виде звуковой волны [4]. 2) Раскачивание приводит к смещению корней в почве и блокам почвы, заключенных между корнями дерева, что сопровождается значительным трением [12]. 3) Энергия ветра, преобразованная в энергию колебаний

ветвей и ствола, в местах их изгиба расходуется на преодоление внутреннего трения (вязко-эластическое демпфирование), которое определяется свойствами растительной ткани [10]. 4) Затухание колебаний дерева может усиливаться вследствие связанных колебаний нескольких ветвей с разной частотой и/или в разной фазе, стабилизируя положение ствола (структурное демпфирование) [18]. 5) Взаимодействие надземной части растения с потоком воздушной массы или раскачивание при почти полном отсутствии ветра приводит к трению между поверхностью частей растения и воздуха (аэродинамическое демпфирование) [9]. Очевидно, что аэродинамическое демпфирование значительно увеличивается листьями. Это подтверждается экспериментами на хвойных [22] и травянистых [25] видах растений.

Частота и затухание колебаний дерева имеют большое значение для устойчивости к действию ветра [8, 13, 22], который обладает временной и пространственной неоднородностью, особенно при взаимодействии с древесным пологом. Появление внезапных локальных усилений скорости воздушного потока происходит с частотами значительно ниже 1 Гц, поэтому увеличение частоты колебаний дерева снижает риск резонансного поглощения энергии ветра [8]. Вместе с тем, в

моделях взаимодействия дерева с ветром демпфирующее влияние аэродинамического сопротивления листьев на колебания дерева либо не учитывается, либо листья принимаются как точечные массы, распределенные вдоль ствола или побегов [20]. В связи с этим целью настоящей работы было определение влияния массы, площади и аэродинамического сопротивления листьев на динамические характеристики (частоту и декремент затухания колебаний стволов) взрослых деревьев и семян клена ложноплатанового (*Acer pseudoplatanus* L.).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследование проведено в 2009 г. на взрослых (35–37 лет) деревьях клена ложноплатанового. Для определения влияния различных видов затухания исследованы 4–5-летние сеянцы высотой от 1.1 до 1.8 м с минимальными числом и длиной ветвей. Все опытные растения произрастали на территории дендрария Донецкого ботанического сада (Украина). Основные морфологические характеристики деревьев приведены в табл. 1 и 2.

Для проведения экспериментов выбирали экземпляры, вблизи которых отсутствовали препятствия для свободных колебаний. Все исследования проведены в летний период, в безветренную погоду, что обеспечивало точность определения величины затухания. Ствол растений отклоняли на уровне $1/3$ высоты h на величину $x \sim 0,015–0,017 \cdot h$ и отпускали. Колебания регистрировали с помощью осциллографа HPS 10 фирмы “Velleman” (Бельгия) и пьезоэлектрического датчика, прикрепленного к стволу у его основания. Декремент затухания (величина, характеризующая рассеивание механической энергии) и частоту колебаний стволов определяли на основании уравнения затухающих колебаний [14]. Сезонные изменения модуля упругости (модуля Юнга) древесины определяли на ветвях 3–4-летнего возраста по методике К.Дж. Никласа [18].

Таблица 1. Основные морфологические показатели взрослых кленов ложноплатановых

№	Высота ствола, м	Диаметр, м		
		основания ствола	ствола на высоте груди	кроны
1	10.0	0.130	0.115	3.2
2	9.0	0.105	0.100	2.5
3	9.5	0.190	0.160	3.6
4	8.5	0.090	0.075	2.2

Для определения различных механизмов затухания колебаний были проведены следующие серии экспериментов. В первой серии регистрировали колебания 10 интактных растений в облиственном состоянии. Во второй серии исключали аэродинамическое демпфирование колебаний листьями путем замещения листовых пластинок пластилиновыми сферами с массой, равной массе листьев. При этом сохранялась возможность колебания сфер на черешках. В третьей серии пластилиновые сферы прикрепляли непосредственно к стволу, что позволило определить влияние массы размещенных на стволе листьев на колебания семян. В 4-й серии опыт повторяли после полной дефолиации и без пластилиновых сфер.

В отдельном эксперименте проводили исследование влияния массы листовых пластинок на затухание колебаний на сеянце № 2, который

Таблица 2. Основные морфологические показатели сеянцев кленов ложноплатановых

№	Высота ствола, м	Диаметр, м		Число листьев, шт.	Масса, г	
		основания ствола	вершины ствола		листьев	ствола
1	1.26	0.011	0.0030	45	45.62	59.02
2	1.21	0.010	0.0030	28	39.45	48.21
3	1.32	0.012	0.0032	23	55.66	69.00
4	1.10	0.008	0.0029	35	40.47	49.45
5	1.08	0.010	0.0030	10	10.05	31.14
6	1.34	0.013	0.0030	12	19.71	65.65
7	1.39	0.011	0.0030	18	24.54	67.06
8	1.37	0.011	0.0040	29	22.33	87.03
9	1.85	0.012	0.0040	14	24.10	80.66
10	1.34	0.010	0.0040	14	11.03	46.64

Таблица 3. Распределение массы листьев по длине ствола сеянца № 2 на различных этапах дефолиации, г

Высота, м	Этапы дефолиации					
	0	1	2	3	4	5
1.21	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.00
1.20	3.22	3.22	3.22	3.22	3.22	3.22
1.18	3.47	3.47	3.47	3.47	3.47	0.00
1.08	4.56	4.56	4.56	0.00	0.00	0.00
0.95	6.39	6.39	6.39	0.00	0.00	0.00
0.85	5.65	5.65	5.65	5.65	0.00	0.00
0.77	7.03	7.03	0.00	0.00	0.00	0.00
0.24	8.14	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Сумма	39.45	31.31	24.28	13.33	7.69	3.22

поэтапно лишали листьев (табл. 3). Влияние размера листовой пластинки на затухание колебаний изучали путем последовательного прикрепления к верхушке сеянца № 6 нескольких пар листьев разного размера. Участок ветви длиной 1.5 см с парой листьев закрепляли на стволе двумя иглами-“невидимками”. Массой игл пренебрегали. Все опыты проводили в 5-кратной повторности. Достоверность отличий результатов в различных сериях определяли в соответствии с критерием Манна–Уитни.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Сезонные вариации динамических параметров взрослых деревьев. В период покоя в феврале 2009 г. при положительной температуре 0.3–2.5°C измеренные значения частоты колебаний стволов деревьев составили 0.39–0.55 Гц, декремента затухания – 0.149–0.165 (рис. 1). В период вегетации при сформированных листовых пластинках (май) значения частот колебаний снизились до 0.28–0.35 Гц, а значения декремента затухания возросли до 0.190–0.265. После окончания вегетации (октябрь), но при наличии сухих листьев на деревьях (в основном в верхней части), динамические параметры деревьев практически не изменились. Исключение составляют лишь деревья № 2 и 4. После завершения листопада (ноябрь), при сохранении положительных температур, значения частот существенно возросли по сравнению с периодом вегетации и составляли 0.37–0.55 Гц, а значения декрементов затухания снизились до 0.136–0.212. В период покоя осенью 2009 г. частоты колебаний деревьев, кроме деревьев № 1 и 4, были незначительно ниже (в среднем на 5%), чем до начала вегетации зимой того же года. У разных деревьев изменение декремента затухания было неоднозначным, но в

среднем он остался неизменным. Таким образом, увеличение массы ветвей, произошедшее за один вегетационный период, не оказало существенного влияния на затухание и частоту колебаний.

Снижение температуры до отрицательных значений, которое происходило непрерывно в течение 7 суток (от –0.2 до –12.75°C, в момент измерения – –10.5°C), привело к увеличению частоты колебаний стволов на 9–11% и снижению декре-

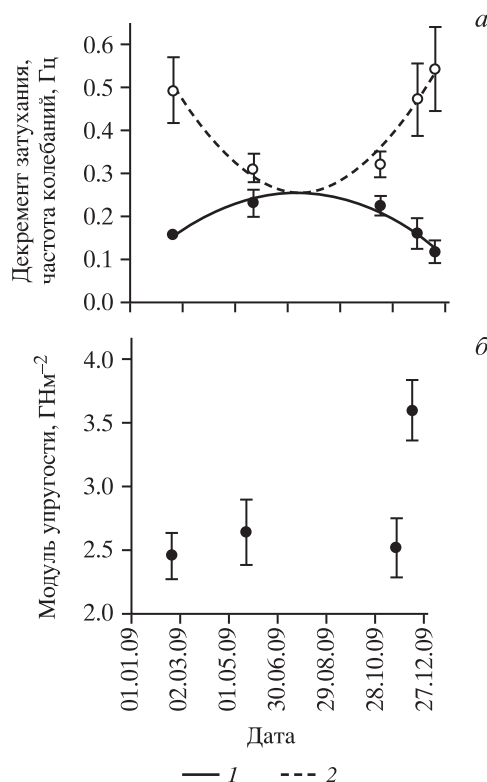


Рис. 1. Сезонные изменения динамических и механических свойств взрослых кленов ложноплатановых: а – декремент затухания (1) и частота (2); б – модуль упругости.

Таблица 4. Частота колебаний стволов сеянцев в экспериментальных сериях, Гц

№	Экспериментальная серия			
	1	2	3	4
1	1.20	1.29	1.54	2.75
2	1.18	–	–	3.40
3	1.18	1.25	1.52	3.00
4	1.05	1.12	1.60	2.62
5	1.47	1.53	1.71	3.43
6	1.55	1.66	1.85	2.99
7	1.05	1.14	1.42	3.07
8	1.42	1.56	1.62	2.75
9	1.62	1.67	1.91	4.07
10	1.67	1.67	1.65	2.74
Среднее	1.34±0.23	1.43±0.23	1.65±0.16	3.08±0.44

Примечание. Экспериментальная серия: 1 – интактные растения в облиственном состоянии, 2 – листовые пластинки замещены пластилиновыми сферами, 3 – листья замещены пластилиновыми сферами, 4 – растения после дефолиации.

мента затухания на 27–28%. По всей видимости, основной причиной наблюдавшихся изменений является промерзание древесины и увеличение ее модуля упругости. Так, в течение года при положительных температурах модуль упругости древесины ветвей одного возраста варьировал в пределах 2.392–2.963 ГН/м² (рис. 1). В декабре после недели отрицательных температур его значения достигли 3.605–3.837 ГН/м², что в среднем на 43 ± 8% выше, чем в ноябре. Поскольку в период с ноября по декабрь масса и площадь кроны деревьев оставались практически одними и теми же, то произошедшие изменения динамических характеристик могли быть обусловлены лишь сезонной вариацией модуля упругости древесины. Теоретически частота колебаний маятника пропорциональна корню квадратному модулю упругости [4]. Отсюда следует, что увеличение его значений в 1.35–1.51 раз приводит к возрастанию частоты в 1.16–1.23 раз; это близко к зафиксированному нами увеличению частоты колебаний стволов кленов в 1.10–1.27 раз. Некоторые расхождения расчетного и наблюдаемого значений частот могут быть связаны с неучтенным изменением плотности древесины или разной глубиной промерзания побегов по сравнению со стволом. Обратная связь между модулем упругости и затуханием колебаний согласуется с данными модельного эксперимента [22].

Влияние массы, площади, связанных колебаний и аэродинамического сопротивления листьев на динамические характеристики сеянцев. Частоты колебаний стволов интактных сеянцев варьировали от 1.05 до 1.67 Гц (табл. 4, серия 1) и составляли в среднем 44 ± 8.7% от их

значений после полного удаления листьев (серия 4). На различных этапах последовательной дефолиации сеянца № 2 частоты колебаний составляли от 35 до 59% от интактного состояния. При наличии даже 8% листьев в верхней части растения частота колебаний сильно отличалась от ее значения в безлиственном состоянии. Существенное увеличение частоты колебаний стволов сеянцев произошло лишь после удаления всех листьев (рис. 2а). Зависимость частоты колебаний сеянца от массы листьев имеет степенной характер с отрицательным показателем: $f(m) = 1.22 \cdot m^{-0.23}$ ($R^2 = 0.89$).

Исключение аэродинамического сопротивления листьев при сохранении их массы путем замены листовых пластинок пластилиновыми сферами привело к незначительному увеличению частоты колебаний стволов сеянцев (серия 2). После удаления черешка и прикрепления пластилиновых сфер непосредственно на ствол или побеги (серия 3), что исключает влияние связанных осцилляторов – масс листьев на черешках, частота снова увеличилась. Таким образом, масса листьев, их колебания на черешках и трение между листовыми пластинками и воздухом приводят к снижению частоты колебаний. Если разницу значений частот колебаний сеянцев в облиственном состоянии и после полной дефолиации принять за 100%-й эффект снижения частоты, то вклад увеличения массы растения за счет листьев составляет 77 ± 5.1%, связанных колебаний листовых пластинок на черешках – 17 ± 6.7%, а аэродинамического сопротивления листовых пластинок – 6 ± 2.4%.

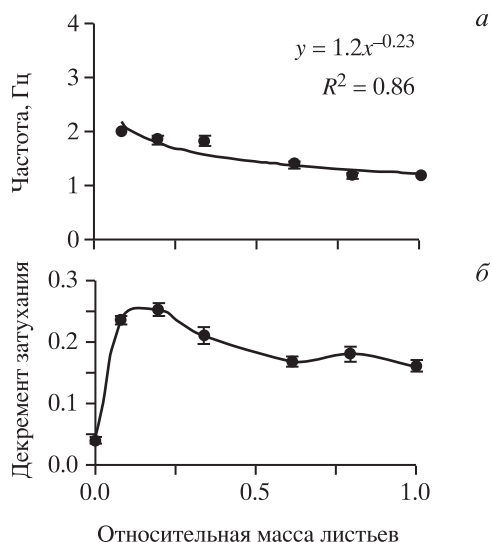


Рис. 2. Зависимость частоты (а) и декремента затухания (б) колебаний ствола клена ложноплатанового (сеянец № 2) от массы листьев. Масса приведена в относительных единицах, значению “1” соответствует масса всех листьев.

Затухание колебаний стволов сеянцев было максимальным в интактном (облиственном) состоянии. Декремент затухания варьировал от 0.100 до 0.254 (табл. 5, серия 1). Затухание облиственных растений зависит от вязко-эластического демпфирования, или внутреннего трения, в растительных тканях, аэродинамического демпфирования при трении листовых пластинок и воздуха, структурного демпфирования в результате связанных колебаний листовых пластинок и стволов сеянцев, а также распределения массы листьев по стволу. Вклад каждого из этих механизмов определяли в сериях экспериментов с

последовательным исключением каждого из них. При замещении листовых пластинок пластилиновыми сферами декремент затухания колебаний сеянцев изменялся в пределах от 0.102 до 0.167 (табл. 5, серия 2). Поскольку в этой серии экспериментов аэродинамическое сопротивление минимально, то затухание в ней обусловлено в основном вязко-эластическим и структурным демпфированием. В следующей серии (№ 3) были исключены аэродинамический и структурный эффекты демпфирования путем прикрепления сфер непосредственно к стволу и побегам. В этом случае величина декремента затухания (0.070–0.129) оказывается обусловленной лишь внутренним трением и эффектом массы листьев на стволе. Снятие пластилиновых сфер со стебля и побегов (табл. 5, серия 4) привело к малым изменениям декремента, а у отдельных сеянцев отличия его величины в сериях 4 и 3 отсутствовали. Затухание колебаний стволов без листьев в четвертой серии обусловлено лишь внутренним трением, декремент составлял $49 \pm 11\%$ от его значения в первой серии, проведенной на интактных сеянцах. Принимая суммарный эффект всех механизмов демпфирования за 100%, можно сделать вывод, что увеличение массы сеянцев за счет массы листьев приводит к минимальным и неоднозначным изменениям декремента затухания колебаний стволов. Так, у растений № 3, 4, 6, 7 и 10 влияние общей массы листьев на затухание положительное, сеянцев № 1, 5 и 8 – отрицательное, на колебания сеянца № 9 масса листьев влияния не оказала. Вклад структурного демпфирования, т.е. связанных колебаний листовых пластинок, в общий суммарный эффект гашения колебаний листьями составил

Таблица 5. Декремент затухания колебаний стволов сеянцев в экспериментальных сериях

№	Экспериментальная серия			
	1	2	3	4
1	0.138	0.070	0.050	0.052
2	0.160			0.039
3	0.148	0.100	0.076	0.075
4	0.100	0.050	0.038	0.039
5	0.254	0.100	0.075	0.077
6	0.215	0.167	0.129	0.126
7	0.198	0.141	0.070	0.068
8	0.161	0.105	0.081	0.090
9	0.232	0.137	0.112	0.112
10	0.157	0.102	0.076	0.074
Среднее	0.176±0.047	0.130±0.035	0.094±0.028	0.075±0.029

Примечание. Описание серий см. в табл. 4.

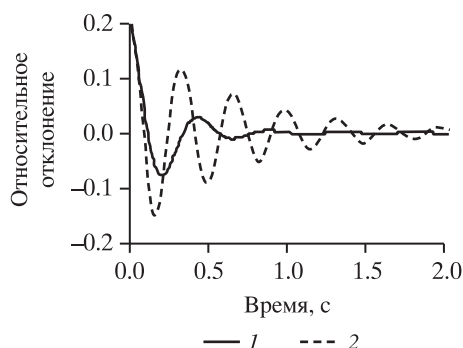


Рис. 3. Затухающие колебания листа (1) клена ложноплатанового вдоль оси, перпендикулярной листовой пластинке, и пластилиновой сферы с массой листовой пластинки на черешке (2).

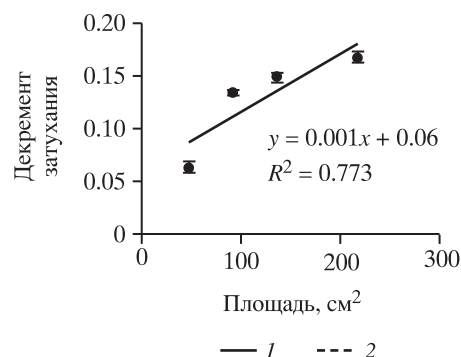


Рис. 4. Влияние площади листовых пластинок на декремент затухания колебаний ствола сеянца клена ложноплатанового.

$31 \pm 12\%$, а аэродинамического сопротивления — $69 \pm 12\%$.

У деревьев в облиственном состоянии значение структурного и аэродинамического демпфирования для гашения колебаний стволов может несколько отличаться от рассчитанных величин. Так, лист, отклоненный перпендикулярно плоскости листовой пластинки, в этом направлении совершает колебания с большим затуханием, чем пластилиновая сфера той же массы на черешке (рис. 3). Однако затем лист продолжает колебания в плоскости листовой пластинки с затуханием, практически таким же, как у пластилиновой сферы. В случае таких колебаний основной механизм рассеивания их энергии — внутреннее трение в тканях черешка. В дополнение к этому гашение колебаний листьев может происходить за счет их соударения и трения друг о друга, если они расположены достаточно плотно.

На промежуточных этапах последовательного удаления листьев от основания к верхушке сеянца №2 декремент затухания колебаний его ствола изменялся немонотонно (рис. 2б). Снижение массы листьев до 40% не привело к существенному изменению декремента затухания, которое произошло после 60% дефолиации. Наибольшие значения декремента затухания наблюдались при наличии лишь 20% массы листьев в верхней части растения. Очевидно, это связано с тем, что периферическая часть растения совершает большие по амплитуде колебания и перемещается с более высокой скоростью, чем основание ствола, а аэродинамическое сопротивление листовых пластинок возрастает пропорционально квадрату скорости перемещения [26].

Существенное влияние на затухание колебаний сеянца клена оказывает размер листовой пластинки (рис. 4). Увеличение линейных размеров

листьев, то есть площади поверхности листовых пластинок, приводит к большему затуханию. Из теоретических соображений [26] аэродинамическое сопротивление листа возрастает пропорционально его площади. Однако некоторое отклонение полученной нами зависимости от линейной можно объяснить потерей жесткости листа при увеличении его размера, из-за чего края листа загибаются и его эффективная площадь снижается.

Собственные частоты и декремент затухания колебаний стволов взрослых деревьев и сеянцев кленов ложноплатановых существенно изменяются в зависимости от массы листьев и их распределения вдоль ствола. Для собственных частот колебаний стволов характерно снижение значений динамических показателей с увеличением массы листьев. Этот результат является наиболее предсказуемым и согласуется с другими экспериментальными работами [5, 16, 22]. Характер зависимости частоты колебаний стволов от массы листьев — степенной с отрицательным показателем, то есть близок к теоретической зависимости. Отсутствие существенных отличий в зависимостях частоты колебаний стволов от высоты расположения листьев и пластилиновых сфер на черешках свидетельствует о незначительном влиянии аэродинамического сопротивления листовых пластинок и их колебаний как совокупности связанных осцилляторов на частоту колебаний ствола при относительно небольших амплитудах отклонения. Таким образом, основной механизм влияния листьев на частоту колебаний ствола сводится к увеличению массы растения. При высоких амплитудах отклонения и скоростях ветра значение аэродинамического демпфирования может возрасти, так как оно пропорционально амплитуде колебаний в третьей степени и скорости ветра в квадрате [26]. Однако провести

такую оценку довольно сложно, поскольку существуют адаптации растений к штормовым условиям, направленные на снижение площади контакта листа с потоком воздуха, например, скручивание листовых пластинок [26]. При сильном ветре колебания ствола дерева отличаются от тех, которые происходят после однократного отклонения [21]. В таких условиях колебания растений становятся вынужденными, а вынуждающая сила имеет периодический, но негармонический характер. Поэтому на частоте колебаний ствола непосредственно в момент действия ветра отражается временная неоднородность последнего [13, 21]. Однако для оценки риска резонансного усиления раскачивания дерева под действием ветра важно знать собственную частоту его свободных затухающих колебаний. Исходя из этих позиций, опадение листьев положительно сказывается на устойчивости дерева к ветровым нагрузкам, поскольку увеличивает различие между частотой его колебаний и частотами неоднородного воздушного потока. Кроме того, независимо от породы дерева медленно раскачивающиеся стволы или ветви обладают меньшей механической устойчивостью.

Другой важнейшей характеристикой, в значительной степени обуславливающей эффективность поглощения энергии ветра, является затухание колебаний, численно выражающееся декрементом затухания [22]. Как показывают результаты наших экспериментов, изменение затухания колебаний стволов в зависимости от численности и массы расположенных на них листьев обусловлено одновременно несколькими механизмами. Вклад размещенной на стволе массы листьев, то есть инерции, минимален. Вместе с тем, согласно теоретическим представлениям, увеличение массы колебательной системы приводит к уменьшению затухания. Малые отличия декрементов затухания колебаний семянцев без листьев и с размещенными на них пластилиновыми сферами объясняются незначительной массой листьев у исследованных растений по сравнению с массой ствола. Кроме того, неравномерно размещенные на стволе листья и неполное одревеснение побегов текущего года могут быть причиной дополнительных колебаний, например, верхушки относительно ствола, и вызывать структурное демпфирование [10, 23] и изгибные колебания других типов. Колебания листьев на черешках как совокупности связанных осцилляторов приводят к увеличению эффективности гашения колебаний стволов. Максимальное увеличение затухания колебаний стволов наблюдается при наличии листьев, таким образом, в основе механизма снижения

амплитуды колебаний листьями клена ложноплатанового лежит аэродинамическое и, в меньшей степени, структурное демпфирование. Последнее может быть более существенным у взрослых деревьев за счет связанных колебаний ветвей, но затухание колебаний и взрослых деревьев, и семянцев было более чем в два раза интенсивнее при наличии листьев. Таким образом, листья оказывают сложное влияние на параметры колебания дерева, отличное от эффекта увеличения его массы, что необходимо учитывать при моделировании его взаимодействия с ветром.

При действии ветра эффект аэродинамического сопротивления листьев должен увеличиваться пропорционально квадрату скорости ветра. Точно предсказать величину эффекта невозможно, поскольку площадь листовых пластинок и коэффициент лобового сопротивления при действии ветра не остаются постоянными [24]. При одной и той же скорости ветра скорость перемещения колебательных движений ветвей выше на периферии кроны. Поэтому высота размещения листьев оказывает существенное влияние на эффективность аэродинамического демпфирования и общего демпфирования. Наличие двойного эффекта листьев – как массы, снижающей затухание колебаний ствола, и одновременно как аэродинамического демпфера – приводит к тому, что листва наиболее эффективно гасит колебания при ее малой общей массе, размещенной на верхушке дерева или ветви. Следует учитывать, что влияние аэродинамического сопротивления листьев на устойчивость дерева к ветру неоднозначно; оно приводит и к увеличению ветровой механической нагрузки, отклоняющей дерево. Исходя из этого, наиболее устойчивыми являются деревья со значительным затуханием вследствие внутреннего трения.

Существенные изменения динамических характеристик дерева в течение года обусловлены также сезонным изменением модуля упругости древесины. Этот результат подтверждает результаты компьютерного исследования методом конечных элементов [22], в соответствии с которым наибольшее влияние среди механических свойств на параметры раскачивания модели сосны приморской оказывал модуль упругости ее ствола. Однако для точной оценки сезонных изменений устойчивости дерева к ветровым нагрузкам необходимо установить закономерности вариаций предела прочности древесины, позволяющего определить допустимые нагрузки и риск облома ствола и ветвей.

Как показали наши эксперименты, листья клена ложноплатанового, обладающие жестким черешком, оказывают значительное сопротивление воздуху при колебаниях, которое увеличивается пропорционально площади поверхности листовой пластинки. Эта особенность негативно сказывается на его устойчивости к ветру. Известно [26], что наименьшие ветровые нагрузки испытывают листья с очень гибким черешком и жесткой листовой пластинкой, как у осины, разных видов берез и других видов, наибольшие – с жестким коротким черешком, как у дуба красного или черешчатого. Возможно, что биомеханические свойства листа и черешка соответствуют биологическим особенностям вида, его потребностям: либо способствуют усиленному тепло- и газообмену, как у осины, либо обеспечивают фиксированное положение листовой пластинки для эффективного восприятия солнечной радиации, как у дуба черешчатого и клена ложноплатанового. Вместе с тем нельзя исключить, что у видов-эдификаторов, к которым относятся клен ложноплатановый и вышеназванные виды дубов, жесткие малоподвижные листья обеспечивают сильное затенение не только в безветренную погоду, но и при значительных ветровых нагрузках, что способствует их доминированию в древостое. Косвенным подтверждением этому является отмеченная в нашей работе способность листьев через несколько колебаний поперек плоскости листовой пластинки переориентировать направление колебательных движений на 90° , которое не влияет на увеличение просветов в кроне. Без ущерба для способности противостоять действию ветра листья на жестких черешках могут развиваться только на ветвях с очень жесткой и прочной древесиной. Возможно, что вследствие этого в местах обитания, где ветер является одним из значимых абиотических факторов, эдификаторами являются виды, способные к формированию древесины высокой прочности и (или) упругости. У пионерных видов с недостаточно прочной древесиной снижение механической нагрузки на лист достигается посредством гибкости черешка, в результате чего они пропускают достаточно света для развития под их кронами подроста других видов древесных растений. Для верификации данного предположения необходимо провести подробный анализ морфологических и биомеханических свойств листьев древесных видов с различными эколого-фитоценологическими особенностями.

Выводы. 1. Наличие листьев в период вегетации обуславливает существенное снижение частоты и увеличение затухания колебаний ствола клена ложноплатанового. 2. Снижение частоты

колебаний стволов деревьев в период вегетации происходит вследствие увеличения массы кроны, а увеличение декремента затухания определяется значительным аэродинамическим сопротивлением кроны за счет площади листовых пластинок. Наибольшее аэродинамическое сопротивление воздуху оказывают листья, расположенные на периферии кроны. 3. Декремент затухания колебаний ствола возрастает прямо пропорционально площади поверхности листовых пластинок. 4. Увеличение модуля упругости древесины при отрицательных температурах приводит к существенному увеличению частоты и снижению затухания колебаний стволов деревьев. 5. Сезонное увеличение частоты колебаний, связанное со сбрасыванием листьев, увеличивает устойчивость дерева к ветру.

Автор приносит благодарность проф. А.П. Травлееву за обсуждение и помощь в интерпретации результатов работы, а также рецензенту за ценные замечания и рекомендации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Захаров Ю.В., Суховольский В.Г. Модели устойчивости деревьев и насаждений к воздействию ветра // Лесоведение. 2004. № 2. С. 61–67.
2. Калинин М.И. Оценка ветровальной опасности в еловых лесах Карпат // Лесоведение. 1991. № 2. С. 59–66.
3. Карпачевский Л.О., Дмитриев Е.А., Скворцова Е.А., Басевич В.Ф. Роль вывалов в формировании структуры почвенного покрова // Структура почвенного покрова и использование почвенных ресурсов. М.: Наука, 1978. С. 37–42.
4. Нецветов М.В., Хиженков П.К., Сулова Е.П. Введение в вибрационную экологию. Донецк: Вебер, 2009. 164 с.
5. Стойко С.М. Причины ветровалов и буреломов в Карпатских ельниках и меры борьбы с ними // Лесн. хоз. 1965. № 9. С. 12–15.
6. Стойко С.М., Третьяк П.Р. Природа–стихия–человек. Львов: Вища школа, 1983. 119 с.
7. Филенкова Н.В., Захаров Ю.В., Суховольский В.Г. Влияние взаимного расположения деревьев на ветроустойчивость одноярусных древесных насаждений // Хвойные леса бореальной зоны. 2006. № 1. С. 120–126.
8. Backer C.J. Measurements of the natural frequencies of trees // Journal of Experimental Botany. 1996. V. 48. P. 1125–1132.
9. Brüchert F., Gardiner B. The effect of wind exposure on the tree aerial architecture and biomechanics of Sitka spruce (*Picea sitchensis*, Pinaceae) // American Journal of Botany. 2006. V. 93. P. 1512–1521.

10. Brüchert F., Speck O., Spatz H.-Ch. Oscillations of plant's stems and their damping: theory and experimentation // Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Ser. "B". Biological Sciences. 2003. V. 358. P. 1487–1492.
11. de Langre E. Effects of wind on plants // Annual Review of Fluid Mechanics. 2008. V. 40. P. 141–168.
12. England A.H., Baker C.J., Saunderson S.E.T. A dynamic analysis of windthrow of trees // Forestry. 2000. V. 73. P. 225–237.
13. Finnigan J. Turbulence in plant canopies // Annual Revue of Fluid Mechanic. 2000. V. 32. P. 519–571.
14. Gardiner B., Byrne K., Hale S., Kumimura K., Mitchell S.J., Peltola H., Ruel J.-C. A review of mechanistic modelling of wind damage risk to forests // Forestry. 2008. V. 81. P. 447–463.
15. James K.R., Haritos N., Ades P.K. Mechanical stability of trees under dynamic loads // American Journal of Botany. 2006. V. 93. P. 1522–1530.
16. Milne R. Dynamics of swaying *Picea sitchensis* // Tree Physiology. 1991. V. 9. P. 383–399.
17. Moore J.R., Maguir D.A. Natural sway frequencies and damping ratios of trees: influence of crown structure // Trees. 2005. V. 19. P. 363–373.
18. Niklas K.J. Plant biomechanics: An engineering approach to plant form and function. Chicago: University of Chicago Press. 1992. 607 p.
19. Peltola H.M. Mechanical stability of trees under static loads // American Journal of Botany. 2006. V. 93. P. 1501–1511.
20. Rodriguez M., de Langre E., Moulia B. A scaling law for the effects of architecture and allometry on tree vibration modes suggests a biological tuning to modal compartmentalization // American Journal of Botany. 2008. V. 95. P. 1523–1537.
21. Roodbaraky H.J., Baker C.J., Dawson A.R., Wright C.J. Experimental observations of urban trees in high winds // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 1994. V. 52. P. 171–84.
22. Sellier D., Fourcaud T. Crown structure and wood properties: influence on sway and response to high winds. // American Journal of Botany. 2009. V. 96. P. 885–896.
23. Spatz H.-Ch., Speck O. Oscillation frequencies of tapered plant stems // American Journal of Botany. 2002. V. 89. P. 1–11.
24. Spatz H.-Ch., Brüchert F., Pfisterer J. Multiple resonance damping or how do trees escape dangerously large oscillations? // American Journal of Botany. 2007. V. 94. P. 1603–1611.
25. Speck O., Spatz H.-Ch. Damped oscillations of the giant reed *Arundo donax* (Poaceae) // American Journal of Botany. 2004. V. 91. P. 789–796.
26. Vogel S. Leaves in the lowest and highest winds: temperature, force and shape // New Phytologist. 2009. V. 183. P. 13–26.

The Influence of Leaf Mass, Area, and Aerodynamics on Sycamore Stem Oscillations

M. V. Netsvetov

The influence of leaf mass and wood elasticity on the frequency and damping of tree and sapling trees of *Acer pseudoplatanus* L. was studied. The natural frequency and damping ratio of the oscillations of sycamore saplings are related to the leaf mass and its allocation along the stem. The stem vibration frequency decreases with increasing the leaf mass resulted in the greater mass of the whole plant. However, the influence of foliage on the damping ratio consists not only in the increase of the plant mass. Leaves serve as an aerodynamic damper, and the leaves located in the upper part of the plants have the maximal damping effect. The leave located closer to the base of the plants play the role of an additional mass extinguishing the plant vibration.