

УДК 577.3+581.52

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НА БИОМЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ДРЕВЕСНЫХ РАСТЕНИЙ В УСЛОВИЯХ ЗАКРЫТОГО И ОТКРЫТОГО ГРУНТА

В. О. Корниенко¹, В. Н. Калаев², А. О. Елизаров³

¹ Донецкий национальный университет
83001, Донецк, ул. Университетская, 24

² Воронежский государственный университет
394018, Воронеж, Университетская пл., 1

³ Донецкий ботанический сад
83059, Донецк, просп. Ильича, 110

E-mail: dayterry@rambler.ru, dr_huixs@mail.ru, donetsk-sad@mail.ru

Поступила в редакцию 23.03.2018 г.

Изучено влияние температуры окружающей среды на биомеханические свойства тканей древесных растений, произрастающих в условиях закрытого и открытого грунта. Исследования проводили на 11 видах растений, произрастающих в оранжерейной культуре Донецкого ботанического сада, и на 11 видах деревьев, произрастающих в условиях г. Донецка в открытом грунте. Эксперимент состоял из двух серий: 1) определение модуля разрыва (MOR) древесных тканей видов рода фикус *Ficus* L. при температуре +23 °С; 2) установление температурной зависимости модуля упругости (MOE) и модуля разрыва (MOR) для брахихитона кленолистного *Brachychiton acerifolius* (A. Cunn. ex G. Don) Macarthur et C. Moore и хлопкового дерева *Ceiba pentandra* (L.) Gaertn., а также для 11 видов растений из открытого грунта. Среднее значение MOR для 7 изученных видов в условиях закрытого грунта составляет (4.9 ± 0.7) МН/м², что в ~ 20 раз меньше, чем в естественной среде обитания. У фиги Харони *Ficus vallis-choudae* Delile и фикуса бенгальского формы кришны *Ficus benghalensis* var. *krishnae* (C. DC.) выявлены самые низкие значения модуля разрыва. Исследование влияния низких температур показало, что при нагреве предварительно охлажденного до –23 °С образца происходит падение MOE одновременно со снижением скорости изменения температуры. Характер изменения MOE ступенчатый. Общей для всех кривых температурной точкой излома является 0 °С, т. е. температура плавления льда. Наиболее устойчивыми по значениям MOE и MOR являются фикус каучуконосный *Ficus elastica* Roxb. Ex Hornem. и фикус Бенджамина *Ficus benjamina* L. (для закрытого грунта); дуб красный *Quercus rubra* L., дуб черешчатый *Quercus robur* L. и береза повислая *Betula pendula* Roth (для открытого грунта). Растения закрытого грунта (кадочные культуры) рекомендуется в летнее время выносить на открытый воздух с соответствующим культуре притенением. Для предупреждения безвозвратных изгибов и обломов стволов растений открытого грунта необходимо исключать или снижать действие света на их нижнюю треть, обматывая ее, например, защитным волокном или используя специальные чехлы.

Ключевые слова: замораживание, оттаивание, модуль упругости, модуль разрыва, температура, Донецкий ботанический сад, Донецк.

DOI: 10.15372/SJFS20180608

ВВЕДЕНИЕ

Механические свойства деревьев в значительной мере определяют их экологические свойства. Так, резонансные свойства частей растений оказывают влияние на распространение вибрационных сигналов животных, экологически связанных с ними (Cocroft, Rodríguez, 2005; Bailey et al., 2013; Rebar, Rodríguez, 2014, 2015; Fowler-Finn et al., 2017). С биомеханикой кроны связаны количество света, попадающего под ее полог (Нецветов, 2012а; Корниенко, Калаев, 2018), и вибрационные свойства дерева (Netsvetov, Nikulina, 2010), которые отражаются на его взаимодействии с грунтом (Нецветов, 2011, 2012б).

Известно, что способность дерева удерживать собственную массу и противостоять внешним нагрузкам определяется его морфологическими характеристиками и механическими свойствами тканей (Корниенко, Нецветов, 2014; Корниенко, 2017). Постоянно изменяющиеся размеры частей кроны растения вносят больший вклад в вариацию механической устойчивости дерева, чем его механические свойства (Sellier, Fourcaud, 2009). На величину модуля упругости древесины оказывают влияние объемное соотношение различных типов тканей в частях растения (Niklas, 1992; Tropical Tree Physiology..., 2016), доступность питательных ресурсов (Telewski, 2006), а также температура и влажность (Green et al., 1999; Niklas, Spatz, 2010; Szmurlo et al., 2011; Корниенко, Нецветов, 2013, 2014). Влияние температурного фактора на биомеханику живых растений является одним из малоисследованных вопросов биомеханики и экологии (Dahle et al., 2017).

Биомеханические свойства растений определяются механическими свойствами их тканей, модулем Юнга, или модулем упругости (МОЕ), и геометрией, морфологией его частей. Под действием многих факторов свойства тканей и их общая морфология претерпевают изменения в ходе жизнедеятельности растений (Dahle et al., 2017). Находясь в закрытом грунте, без воздействия динамических нагрузок и естественных факторов, стимулирующих рост механических тканей (Knight, 1803; Niklas, 2016), дополнительная масса может стать критической и привести к повреждению растений.

Цель данной работы – определение изменения биомеханических свойств, модуля упругости и предела прочности древесных растений в условиях закрытого и открытого грунта.

Для достижения поставленной цели решали следующие задачи: 1) определить предел прочности (MOR) древесных тканей видов рода фикус *Ficus* L. при температуре +23 °С; 2) установить температурную зависимость модулей упругости (МОЕ) и разрыва (MOR) для брахихитона кленолистного *Brachychiton acerifolius* (A. Cunn. ex G. Don) Macarthur et C. Moore и хлопкового дерева *Ceiba pentandra* (L.) Gaertn. в закрытом грунте; 3) установить температурную зависимость модулей упругости (МОЕ) и разрыва (MOR) для деревьев, произрастающих в открытом грунте в условиях городской среды.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследования проводили на 11 видах растений (фикус широколиственный *Ficus subrepanda* Wall, фикус кистевидный *Ficus racemosa* L., фикус крупнолистный *Ficus macrophylla* Desf. ex Pers., сикомор *Ficus sycomorus* L., фикус ржаво-красный *Ficus rubiginosa* Desf. ex Vent., фикус Харони *Ficus vallis-choudae* Delile, фикус Бенджамина *Ficus benjamina* L., фикус каучуконосный *Ficus elastica* Roxb. ex Hornem., фикус бенгальский формы кришны *Ficus benghalensis* var. *krishnae* (C. DC.), брахихитон кленолистный и хлопковое дерево), произрастающих в оранжерейной культуре Донецкого ботанического сада (ДБС), и 11 видах деревьев (клен белый *Acer pseudoplatanus* L., каштан конский обыкновенный *Aesculus hippocastanum* L., береза повислая *Betula pendula* Roth, ясень обыкновенный *Fraxinus excelsior* L., гинкго двуплодный *Ginkgo biloba* L., платан кленолистный *Platanus acerifolia* Mill. ex Münchh., дуб красный *Quercus rubra* L., дуб черешчатый *Quercus robur* L., липа сердцевидная *Tilia cordata* Mill., вяз гладкий *Ulmus laevis* Pall., тополь Болле *Populus bolleana* Louche), произрастающих в открытом грунте в условиях г. Донецка.

Выбранные представители родов тропических и субтропических растений характеризуются высокой экологической пластичностью и успешной акклиматизацией в условиях оранжерейного комплекса (Strauss-Debenedetti, Bazzaz, 1991; Holbrook, Putz, 1996; Hao et al., 2010), а произрастающие в условиях города являются перспективными для его озеленения.

К моменту исследования все растения достигли репродуктивной стадии развития. Для растений в условиях оранжерейного комплекса дополнительно учли такие параметры, как температура, освещенность и влажность. Для

расчета средних уровней освещенности пользовались данными многолетних наблюдений оранжерейного комплекса ДБС. Зафиксированы следующие средние дневные температуры (°C) в период с 2010 до 2016 г. в оранжереях, где проводили эксперименты: в оранжерее № 1 – 23.1 ± 0.7 (минимум – 11.7, максимум – 35.1); в оранжерее № 2 – 23.4 ± 0.7 (минимум – 12.1, максимум – 33.8). В целом за указанный период наблюдений температурный режим оставался в пределах экологического комфорта для тропических и субтропических растений (от 12 до 38 °C).

Средние дневные показатели освещенности (люкс) в период с 2010 до 2016 г. в оранжереях, где проводили эксперименты, были следующие: в оранжерее № 1 – $10\,300 \pm 309$ (минимум – 188, максимум – 45 850); в оранжерее № 2 – $11\,590 \pm 348$ (минимум – 231, максимум – 49 360). Относительная влажность воздуха находилась в диапазоне от 78–86 % зимой до 88–94 % летом.

В целом такие микроклиматические условия подходят для нормального существования тропических и субтропических растений в условиях защищенного грунта ДБС, поскольку большинство растений живет в широком диапазоне температурных условий и освещения.

Следует отметить, что для нормального роста и прохождения полного цикла развития (цветение, плодоношение, формирование и созревание семян) оптимальный температурный диапазон для тропических видов в зимний период составляет +22 ... +24 °C, а для субтропических – +12 ... +16 °C.

При отборе образцов для проведения исследований по биомеханике древесных растений руководствовались следующими критериями:

- абиотические условия произрастания деревьев должны быть одинаковыми, следовательно, и измерения каждой серии необходимо проводить на деревьях одной куртины;

- для выбранного участка необходимо исследовать максимально возможное количество деревьев;

- образцы должны быть старше 3 лет;

- в зависимости от серии эксперимента срез побегов производить при положительных или отрицательных температурах с нижней части кроны, не затеняемой в течение светового дня.

Измерение модуля разрыва и температурной зависимости модуля упругости проводили на побегах древесных растений из коллекций оранжерейного комплекса ДБС и произрастающих в условиях города. Возраст отобранных побегов –

3 года, их срезали в период замедленного роста (декабрь 2016 – февраль 2017 гг.) с незатеняемой части кроны для проведения эксперимента с замораживанием ($\text{MOE}_{\text{frees}}$ и $\text{MOR}_{\text{frees}}$ для всех видов) и весной/летом для определения $\text{MOE}_{\text{summer}}$ и $\text{MOR}_{\text{summer}}$ при температуре +28–29 °C.

Эксперимент состоял из двух серий: 1) определение предела прочности (MOR) древесных тканей видов рода фикус *Ficus* L. при температуре +23 °C; 2) установление температурной зависимости модуля упругости (MOE) и предела прочности, или модуля разрыва (MOR), для брахихитона кленолистного и хлопкового дерева в закрытом грунте и 11 видов деревьев, отмеченных выше, в открытом грунте.

Во время измерения каждый образец закрепляли неподвижно двумя концами на тумбе G-образной струбциной (IRWIN, Дания), к середине побега прикладывали нагрузку, контролируемую с помощью электронного динамометра SVM-40, до момента облома образца. Значение MOR вычисляли по формуле

$$\text{MOR} = \frac{M_{\text{max}} \cdot z}{I} = \frac{1/4 \cdot F_{\text{max}} \cdot l \cdot r}{1/4 \cdot \pi \cdot r^4}, \quad (1)$$

где M_{max} – максимальный изгибающий момент, Н · м; I – момент второго порядка площади сечения, м⁴; z – расстояние между центром сечения и внешними волокнами, м; F_{max} – максимальная нагрузка, Н; l – длина побега, м; r – радиус, м. Для круглого сечения $z = r$ и $I = 1/4 \pi r^4$ (Van Gelder et al., 2006).

Для определения температурной зависимости модуля упругости MOE с одного торца в образцы помещали хромель-алюмелиевую термопару на глубину 1 см. Выборка была однородной по диаметру и длине образцов для видов каждой серии.

С целью предотвращения испарения оба торца заделывали силиконовым герметиком. Образцы охлаждали в морозильной камере до температуры –23... –21 °C, после чего переносили в лабораторию с температурой воздуха +15 °C. Исследуемый побег закрепляли в штативе концом, в торце которого была зафиксирована термопара. По кривой $T(t)$ на термограмме фиксировали время перехода воды в древесине из твердого состояния в жидкое (рис. 1).

Одновременно проводили измерение продольного модуля упругости (MOE) через каждый 1 °C. Длительность эксперимента для каждого образца в среднем составляла (1800 ± 600) с.

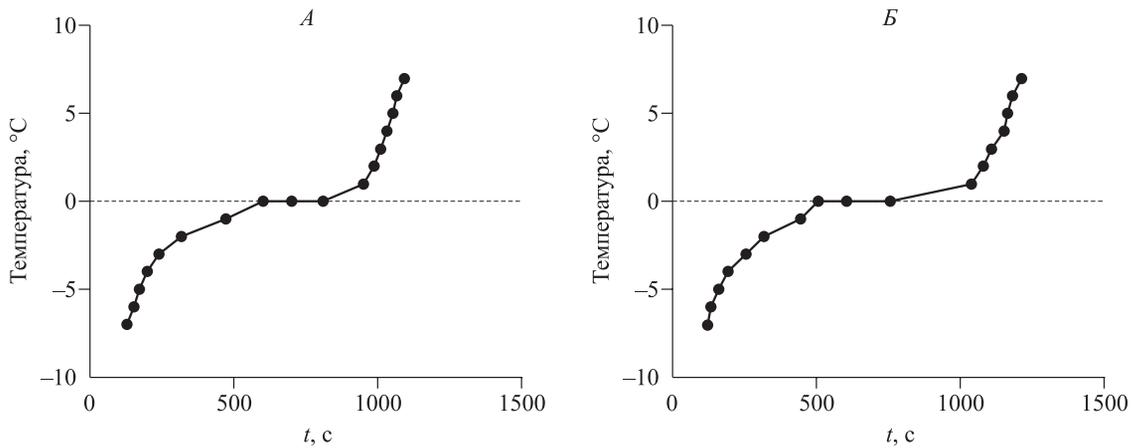


Рис. 1. Термограммы побегов брахихитона кленолистного (А) и хлопкового дерева (Б).

Исследовали 20 образцов каждого вида. Для удобства сравнения данных по разным образцам их модули упругости нормировали к значениям, полученным при температуре +15 °С.

Модуль упругости древесных тканей определяли по величине изгиба цилиндра обрезанной ветви, горизонтально защемленной в тисках, в ответ на приложение силы F на ее свободном конце по формуле

$$E = \frac{64Cl^3}{3\pi d^4}, \quad (2)$$

где C – жесткость цилиндра, l – его длина, d – диаметр (Нецветов, Сулова, 2009) (рис. 2).

Жесткость защемленного одним концом цилиндра рассчитывали по формуле

$$C = \frac{mg}{x}, \quad (3)$$

где m – масса приложенного груза, g – ускорение силы тяжести, x – смещение свободного конца цилиндра.

Статистическую обработку данных выполняли с использованием Microsoft Excel 2010. Достоверность отличий средних значений определяли с использованием t -критерия Стьюдента.

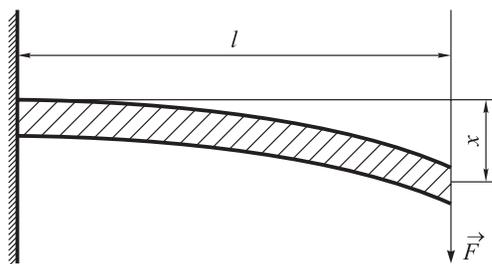


Рис. 2. Изгиб цилиндра (участок ветви) под действием приложенной к его концу силы $\vec{F} = m \cdot g$. l – длина цилиндра; x – смещение свободного конца цилиндра (Нецветов, Сулова, 2009).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Влияние температуры на растения закрытого грунта. Среднее значение MOR для 7 исследованных видов растений составляет (4.9 ± 0.7) МН/м², что в ~ 20 раз меньше, чем в естественной среде обитания ($P < 0.01$), для фикусов каучуконосного и Бенджамина значение MOR составляет (13.0 ± 2.1) МН/м² (табл. 1).

У фиги Харони и фикуса бенгальского формы кришны выявлены самые низкие значения модуля разрыва ($P < 0.01$), а у фикусов каучуконосного и Бенджамина значения MOR были достоверно выше ($P < 0.01$), чем у остальных видов, что может говорить об их высокой механической устойчивости. Такие виды фикуса, как крупнолистный, сикомор, ржаво-красный, широковыемчатый и кистевидный, друг от друга достоверно не отличались и в среднем имели MOR (5.2 ± 0.3) МН/м².

Изменение МОЕ древесины для всех образцов при оттаивании происходит неравномерно,

Таблица 1. Значения MOR (МН/м²) древесных тканей видов растений рода фикус *Ficus* L. при температуре 23 °С в условиях закрытого грунта

Вид фикуса	$\bar{X} \pm S_x$
Каучуконосный	14.5 ± 1.9
Бенджамина	11.5 ± 1.4
Крупнолистный	5.6 ± 0.1
Сикомор	5.4 ± 0.2
Ржаво-красный	5.2 ± 0.7
Широковыемчатый	4.9 ± 0.1
Кистевидный	4.8 ± 0.2
Бенгальский формы кришны	4.2 ± 0.5
Фига Харони	3.7 ± 0.5

Примечание. $\bar{X} \pm S_x$ – среднее значение \pm ошибка среднего.

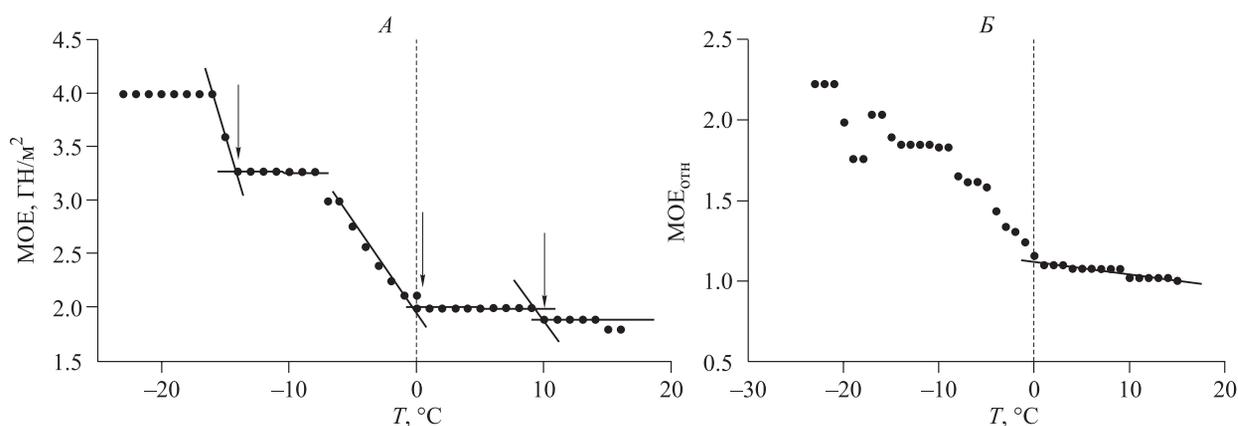


Рис. 3. Температурная зависимость модуля упругости древесины на примере брахихитона кленолистного (А) и усредненного относительного модуля упругости древесины для 11 исследованных видов деревьев (Б). Стрелками показаны изломы кривой MOE (T).

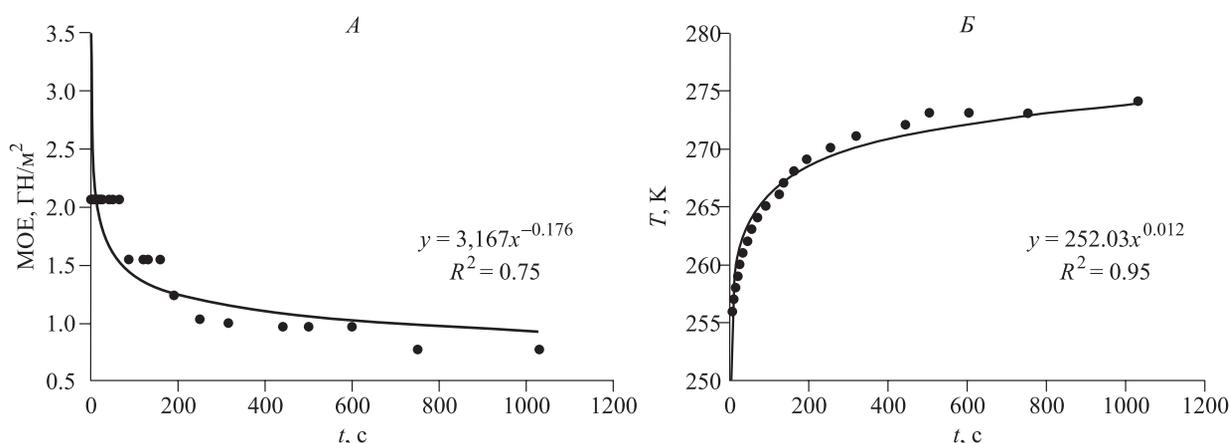


Рис. 4. Изменение модуля упругости (А) и температуры (Б) во времени на примере образца хлопкового дерева.

ступенчато. «Ступени» – участки кривой MOE (ГН/м²) от T (°С), на которых MOE не изменяется (рис. 3, А).

Количество изломов кривой MOE (T) варьирует от 4 до 5 (см. рис. 3, А), а температура, при которой изменяется угол наклона MOE (T), – в пределах 2–6 °С. Вследствие этого на усредненной для видов зависимости MOE (T) изломы выражены нечетко (рис. 3, Б).

С ростом температуры на кривой MOE (T) определяются три участка с различным углом на-

клона (см. рис. 3, А). Первый участок располагается в диапазоне от –23 до –14 °С, второй – от –9 до +1 °С и характеризуется наибольшей крутизной MOE (T), третий участок находится в диапазоне положительных температур до +15 °С. На усредненной для 11 видов растений кривой выделяется точка излома, приходящаяся на 0 (+1) °С.

Скачки значений MOE происходят одновременно с возрастанием скорости нагрева образцов, характер которого имеет степенной вид (рис. 4, табл. 2).

Таблица 2. Зависимость MOE и MOR от температуры (T) образцов на примере брахихитона кленолистного и хлопкового дерева

Вид растения	MOE _{freeze}	MOE _{thaw}	MOR _{freeze}	MOR _{norm}
	ГН/м ²		МН/м ²	
	$\bar{X} \pm S_x$			
Брахихитон кленолистный	3.99 ± 0.52	2.38 ± 0.59	0.007 ± 0.0001	10.3 ± 1.3
Хлопковое дерево	2.06 ± 0.10	0.72 ± 0.04	0.003 ± 0.0006	21.0 ± 2.0

Примечание. freeze – –21... –23 °С; thaw – +15 °С; norm – 23 °С; $\bar{X} \pm S_x$ – среднее значение ± ошибка среднего.

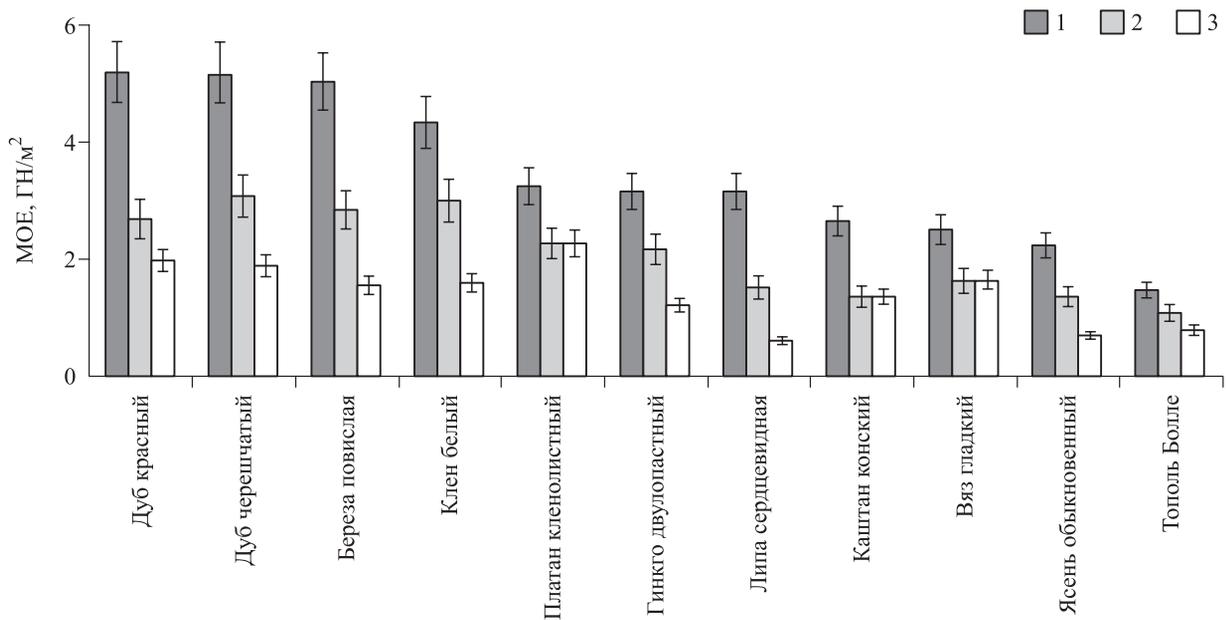


Рис. 5. Значения МОЕ для видов деревьев, произрастающих в условиях города. 1 – образцы, срезанные в зимний период при отрицательной температуре и замороженные (freeze); 2 – оттаявшие образцы после заморозки (thaw); 3 – образцы, срезанные в летний период при положительной температуре (summer).

При замораживании предел прочности для обоих видов уменьшается на 3 порядка, при этом для хлопкового дерева воздействие замораживания более значимо.

Влияние температуры на деревья, растущие в открытом грунте. Наибольшими значениями модулей упругости и разрыва обладают деревья рода дуб *Quercus* L. – дубы красный и черешчатый (рис. 5, табл. 3).

Таблица 3. Значения модуля разрыва тканей для видов деревьев, произрастающих в условиях города в зимний (MOR_{winter}) и летний (MOR_{summer}) периоды

Вид дерева	MOR_{winter}	MOR_{summer}
	МН/м²	
	$\bar{X} \pm S_x$	
Клен белый*	30.1 ± 8.1	21.5 ± 9.9
Каштан конский	20.5 ± 2.7	14.4 ± 3.8
Береза повислая*	58.1 ± 10.1	29.4 ± 10.0
Ясень обыкновенный**	19.3 ± 7.3	11.8 ± 3.9
Гинкго двулопастный**	117.6 ± 11.4	52.4 ± 8.0
Платан кленолистный*	38.0 ± 1.4	21.0 ± 0.6
Дуб черешчатый	39.0 ± 1.3	34.9 ± 35.9
Дуб красный**	45.0 ± 9.4	29.9 ± 11.8
Липа сердцевидная*	30.0 ± 1.0	15.0 ± 5.3
Вяз гладкий	21.0 ± 0.7	20.0 ± 7.0
Тополь Болле	18.0 ± 0.6	14.0 ± 0.9

Примечание. $\bar{X} \pm S_x$ – среднее арифметическое ± ошибка среднего; * – различия MOR_{winter} с MOR_{summer} достоверны ($P < 0.05$); ** – различия MOR_{winter} с MOR_{summer} достоверны ($P < 0.01$).

При переходе от зимних температур к летним модуль упругости дуба красного падает в среднем на 48 %, а дуба черешчатого – на 40 %. Наибольшее изменение МОЕ зафиксировано для липы сердцевидной (51 %), что может говорить о высокой вероятности изменения архитектоники кроны дерева вследствие безвозвратной деформации скелетных ветвей после оттаивания.

Значение модуля упругости березы повислой – одного из перспективных для озеленения древесных видов, при заморозке составляет (5.0 ± 1.8) ГН/м², что говорит о его высокой механической устойчивости в зимний период. Однако разница при оттаивании 44 % в комплексе с динамическими нагрузками (порывы ветра) приводит *in situ* к потере устойчивости и облому скелетных ветвей или стволов деревьев.

Из исследованных видов наименьшими модулями упругости и разрыва обладает тополь Болле, однако при переходе из замороженного состояния в оттаявшее у него наименьшая доля падения МОЕ (25 %) (см. рис. 5, табл. 3).

При своевременном проведении мероприятий по обрезке и диагностике тополь Болле устойчив в городской среде и незаменим при внутригородском озеленении.

У изученных видов деревьев открытого грунта изменение модуля упругости древесины при оттаивании происходит неравномерно, ступенчато (рис. 6).

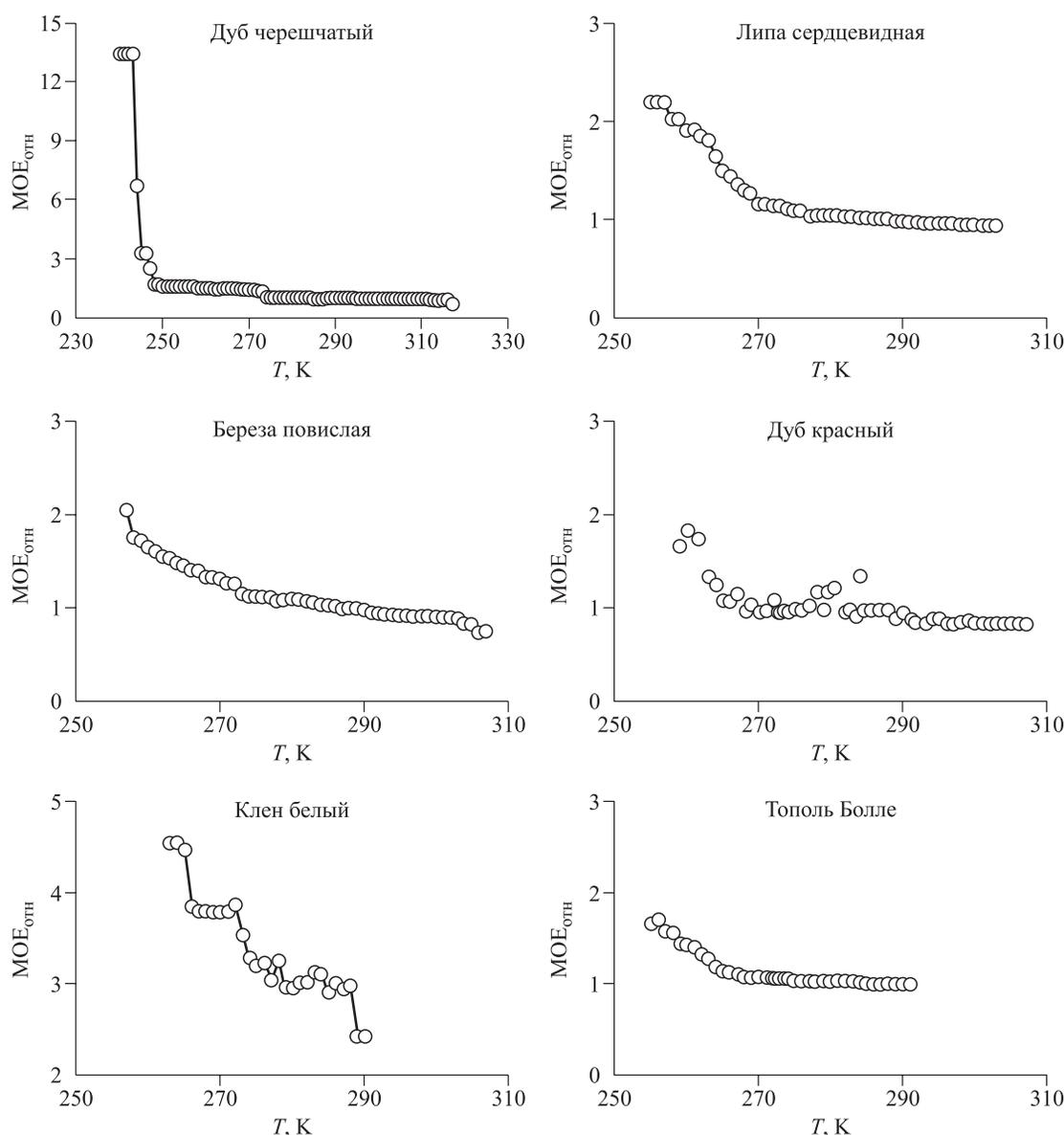


Рис. 6. Температурная зависимость усредненного относительного модуля упругости древесины некоторых видов деревьев, растущих в открытом грунте.

Количество изломов кривой MOE (T) варьирует от 3 до 6, а температура, при которой изменяется угол наклона MOE (T), находится в пределах 2–4 °C (рис. 7, А).

Вследствие этого на усредненных для всех видов зависимостях MOE (T) изломы выражены менее четко (рис. 7, Б).

Можно выделить следующие общие закономерности изменения модуля упругости с ростом температуры для деревьев открытого грунта. На кривой MOE (T) определяются 3 участка с различным углом наклона. Первый участок располагается в диапазоне от –33 до –27... –25 °C и отличается наибольшей крутизной, второй – от –27... –25 до –1... –1 °C, а третий находит-

ся в диапазоне положительных температур (до 44 °C) и характеризуется наименьшей крутизной MOE (T).

На усредненной для 11 видов деревьев кривой выделяются две точки излома, приходящиеся на –25 и 0 °C. На кривой MOE (t) – зависимость модуля упругости от времени: вначале из-за достижения точки росы влага конденсируется и замерзает на поверхности образца, в результате чего происходит скачок MOE перед снижением (рис. 8).

Скорость изменения модуля упругости $dMOE/dt$ в промежутке времени от скачка MOE до полного оттаивания образца связана со скоростью изменения температуры древесины dT/dt .

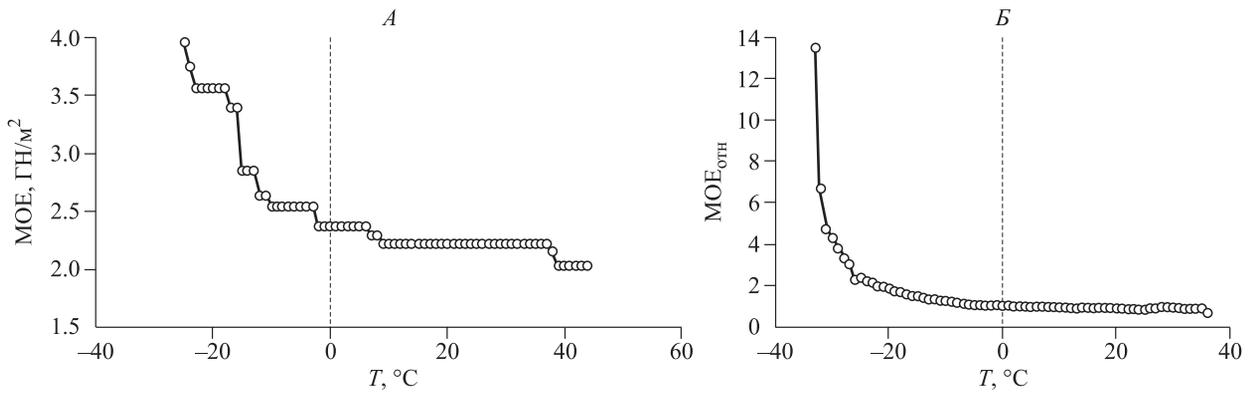


Рис. 7. Температурная зависимость модуля упругости древесины дуба черешчатого (А) и усредненного относительного модуля упругости древесины 11 исследованных видов деревьев (Б).

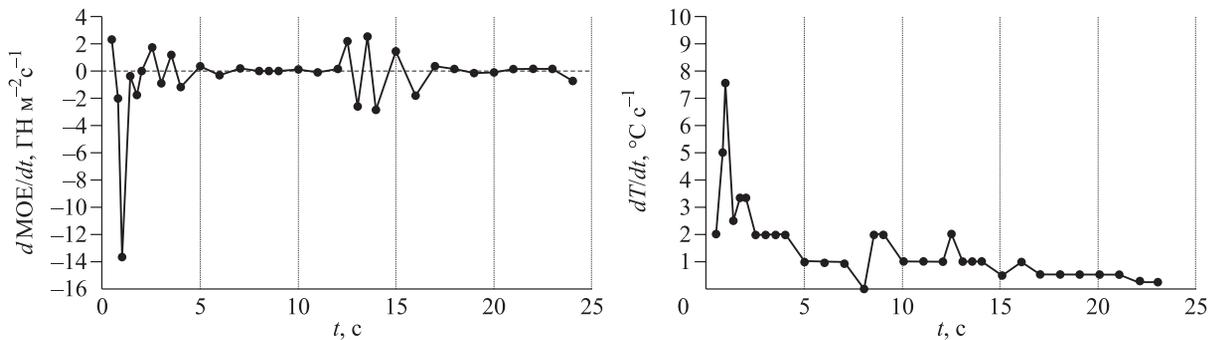


Рис. 8. Скорость изменения модуля упругости ($dMOE/dt$) и температуры (dT/dt) во времени для образца дуба красного.

Как показано на рис. 8, зависимость скорости изменения температуры (dT/dt) от времени (t) нелинейная.

Падение скорости нагрева образца объясняется отбором тепла в момент перехода свободной воды в сосудах из твердого в жидкое состояние. Наличие нескольких экстремумов на графике dT/dt от t свидетельствует о неодновременном, т. е. «порционном», таянии объема льда в образце.

Исследования, проведенные на растениях закрытого грунта, показали, что при отсутствии статических (эпифиты, в основном лианы, животные, крупные плоды) и в большей степени динамических нагрузок (ветер или резкие порывы ветра) (Niklas, 1992) механическая ткань у них развита слабо, поэтому растения имеют низкую прочность и менее устойчивы к нагрузкам.

В естественной среде обитания деревья тропических видов имеют высокие показатели биомеханических параметров (Niklas, 2016). Среднее значение модуля разрыва (MOR) находится в пределах (100 ± 33) МН/м², а модуля упругости (MOE) – (13.7 ± 1.9) ГН/м² (Wood handbook..., 2010; Hein, Lima, 2012; Hein et al., 2013; Vaar et

al., 2015; Niklas, 2016). Эксперименты, проведенные на древесных растениях из коллекции оранжерей ДБС, показали, что у них в ~ 20 раз ниже значение модуля разрыва, чем в естественной среде обитания. Наиболее устойчивыми среди изученных видов интродуцентов являются фикусы каучуконосный и Бенджамина.

Исследование влияния низких температур на побеги брахихитона кленолистного и фикуса Бенджамина показало, что при замораживании образцов MOR снижается на 3 порядка. Это может быть связано с механическим повреждением морозом стенок паренхимных клеток и млечников (выделение влаги и млечного сока вследствие разрыва клеток), как было зафиксировано в экспериментах А. Mishiro (1990).

Неоднородность процесса оттаивания в побеге отражается на динамике MOE (t) и температурном изменении MOE (T) модуля упругости. В экспериментах А. Mishiro и I. Asano (1984a, b) зафиксированы резкие изменения наклона температурных зависимостей MOE при $-20 \dots -18$ и ~ 0 °C. Отмеченные нами точки излома (около -23 °C для растений закрытого грунта и -26 °C для растений в условиях города) немного ниже,

а точка ~ 0 °С совпадает с зафиксированной японскими авторами.

Как отмечают некоторые авторы (Mishiro, Asano, 1984a, b; Корниенко, Нецветов, 2014), наибольшая крутизна возникает на участке от $-20 \dots -26$ до ~ 0 °С, как и в нашем эксперименте на участке от -23 до $0 (+1)$ °С для деревьев закрытого грунта и от -33 до -25 °С для деревьев открытого грунта. Возможные расхождения в значениях точек излома обусловлены несколькими причинами:

1) анатомическими (например, размер просвета сосудов) и биохимическими (состав и концентрация веществ, растворенных в живице) особенностями растений;

2) температурой замерзания свободной влаги в просветах сосудов древесины (начинает замерзать при температуре ~ 0 °С и только при -30 °С полностью переходит в твердое состояние);

3) $T_{\text{образца}} \neq \text{const}$, изменялась и скорость ее роста.

В диапазоне положительных температур МОЕ непостоянен и падает с ростом температуры на 75 % (диапазон $T = 9-15$ °С). Из этого можно сделать вывод, что при росте температуры потеря упругости должна приводить к медленным изгибам побегов, что отразится на площади проекции кроны, на ее светопрозрачности и, как следствие, на температуре, а также влажности под пологом (Корниенко, Нецветов, 2014).

Наибольшим значением модуля упругости (см. рис. 5) и модуля разрыва из исследованных видов деревьев открытого грунта (см. табл. 3) обладают виды рода дуб *Quercus* L., а именно дуб красный и черешчатый. При переходе от зимних температур к летним модуль упругости дуба красного падает в среднем на 48 %, а дуба черешчатого – на 40 %. Наибольшее изменение МОЕ (51 %) зафиксировано для липы сердцевидной, что может говорить о высокой вероятности изменения архитектоники кроны этого дерева вследствие безвозвратной деформации скелетных ветвей после оттаивания.

Экологическое и биологическое следствие изменения МОЕ и MOR. При переходе из сезона с низкими температурами в сезон с высокими положительными температурами вследствие градиента температур между древесиной и окружающим воздухом происходят резкие скачкообразные изменения МОЕ (см. рис. 3), что отражается на жесткости побегов и на углах их отхождения от ствола, т. е. на архитектонике. *In situ* это приводит к неравномерной потере

жесткости вдоль ствола или побегов, а значит – к их деформациям в одной или нескольких точках.

Вследствие уменьшения упругости побегов снижается частота собственных колебаний ствола или ветвей, что негативно сказывается на устойчивости к ветру (Sellier, Fourcaud, 2009).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

МОЕ и MOR – основные биомеханические параметры, отражающие устойчивость древесных растений к действию динамических (ветер) и статических (налипание снега, наледи и т. д.) нагрузок. Они используются для расчета:

1) предельно допустимой нагрузки (P_{cr}) или массы (m_{cr}) на ствол растения, при действии которой ствол начинает деформироваться или обламывается;

2) критической высоты (H_{cr}), при достижении которой действие собственной массы привело бы к необратимой деформации или облому;

3) критической длины побега (L_{cr}), при достижении которой он подвергается необратимой деформации или скручиванию;

4) относительного сопротивления изгибу (RRB).

Значения модулей и механическая устойчивость тесно связаны с температурой среды. Наиболее опасными являются переходы из сезона с отрицательными температурами к сезону с такими положительными. В нашем эксперименте при нагреве предварительно охлажденного до -23 °С образца происходит падение МОЕ одновременно со снижением скорости изменения температуры (имитационная модель закономерности влияния сезонных условий на модуль упругости древесины). Характер изменения МОЕ ступенчатый. Количество «ступеней» и значение температурной координаты точек излома кривой МОЕ (T) варьирует. Общей для всех кривых температурной точкой излома является $T = 0$ °С, т. е. температура плавления льда.

Следует отметить, что модуль упругости живой древесины тесно связан с содержанием влаги в клеточной стенке. Увеличение количества свободной воды мешает и уменьшает образование водородных связей между органическими полимерами клеточной стенки и снижает механические свойства древесины. Общей тенденцией является уменьшение модуля упругости на ~ 25 % от состояния насыщения (при $W = \sim 90-95$ %) до полного удаления влаги из образца.

Поскольку модуль упругости свежей древесины более чувствителен к изменениям темпе-

ратуры, чем МОЕ с влажностью 12 % (Mishiro, Asano, 1984a, b), значения модуля упругости, полученные на образцах в зимний период, нельзя применять для расчета механической устойчивости всего дерева в летний период. Такие данные имеют ценность для изучения поведения ствола и скелетных ветвей древесного растения при переходе из замороженного состояния в оттаявшее (сезон зима–весна). Этот период наиболее опасен с точки зрения биомеханики в связи с неравномерным оттаиванием ствола и частей ветвей и переходом из гомогенной структуры в гетерогенную. А при действии динамического фактора риск облома этих элементов кроны увеличивается.

Наиболее устойчивы по значениям МОЕ и MOR фикусы каучуконосный и Бенджамина (для закрытого грунта), дубы красный и черешчатый и береза повислая (для открытого грунта).

РЕКОМЕНДАЦИИ

Для растений закрытого грунта рекомендуется в летнее время вынос кадочных культур на открытый воздух с соответствующим культуре притенением.

Для предупреждения безвозвратных изгибов и обломов стволов растений открытого грунта необходимо исключать или снижать действие света на нижнюю треть стволов деревьев, обматывая их, например, защитным волокном или применяя специальные чехлы.

Авторы выражают благодарность д-ру биол. наук, зав. отделом фитоэкологии Института эволюционной экологии Национальной академии наук Украины М. В. Нецветову за помощь в проведении экспериментов и консультации по температурным явлениям в тканях древесных растений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Корниенко В. О. Биомеханика ствола *Robinia pseudoacacia* L. в онтогенезе // Вестн. Воронеж. гос. ун-та. Сер.: Хим. Биол. Фарм. 2017. № 4. С. 48–50.

Корниенко В. О., Калаев В. Н. Экологическое значение биомеханических свойств древесных растений на примере *Juniperus virginiana* L. // Вестн. Воронеж. гос. ун-та. Сер.: Хим. Биол. Фарм. 2018. № 1. С. 97–103.

Корниенко В. О., Нецветов М. В. Влияние отрицательных температур на механическую устойчивость дуба красного (*Quercus rubra* L.) // Промышленная ботаника. 2013. Вып. 13. С. 180–186.

Корниенко В. О., Нецветов М. В. Криоскопия влаги и температурная зависимость модуля упругости древесины // Вісті біосферного заповідника «Асканія-Нова». 2014. Т. 16. С. 88–94.

Нецветов М. В. Передача энергии ветра по радиалам лесных биогеоценозов и ее значение в процессах почвообразования // Екологія та ноосферологія. 2011. Т. 22. № 3–4. С. 99–108.

Нецветов М. В. Вплив вітру на освітленість підпокривного простору *Acer saccharinum* L. та *A. pseudoplatanus* L. // Укр. ботан. журн. 2012a. Т. 69. № 1. С. 46–53 (на украинском языке, реферат на русском и английском).

Нецветов М. В. Екологічне значення вібрацій і біомеханічних властивостей рослин // Вісн. НАН України. 2012б. № 3. С. 80–83 (на украинском языке).

Нецветов М. В., Сулова Е. П. Механическая устойчивость деревьев и кустарников к вибрационным нагрузкам // Промышленная ботаника. 2009. Вып. 9. С. 60–67.

Baar J., Tippner J., Rademacher P. Prediction of mechanical properties – modulus of rupture and modulus of elasticity – of five tropical species by nondestructive methods // Maderas, Cienc. tecnol. 2015. V. 17. N. 2. P. 239–252.

Bailey N. W., Fowler-Finn K. D., Rebar D., Rodríguez R. L. Green symphonies or wind in the willows? Testing acoustic communication in plants // Behav. Ecol. 2013. V. 24. Iss. 4. P. 797–798.

Cocroft R. B., Rodríguez R. L. The behavioral ecology of insect vibrational communication // BioScience. 2005. V. 55. Iss. 4. P. 323–334.

Dahle G. A., James K. R., Kane B., Grabosky J. C., Detter A. A review of factors that affect the static load-bearing capacity of urban trees // Arboricult. Urban For. 2017. V. 43. N. 3. P. 89–106.

Fowler-Finn K. D., Cruz D. C., Rodríguez R. L. Local population density and group composition influence the signal-preference relationship in *Enchenopa* treehoppers (Hemiptera: Membracidae) // J. Evolut. Biol. 2017. V. 30. Iss. 1. P. 13–25.

Green D. W., Evans J. W., Logan J. D., Nelson W. J. Adjusting modulus of elasticity of lumber for changes in temperature // For. Prod. J. 1999. V. 49. N. 10. P. 82–94.

Hao G.-Y., Sack L., Wang A.-Y., Cao K.-F., Goldstein G. Differentiation of leaf water flux and drought tolerance traits in hemiepiphytic and non-hemiepiphytic *Ficus* tree species // Funct. Ecol. 2010. V. 24. Iss. 4. P. 731–740.

Hein P. R. G., Lima J. T. Relationships between microfibril angle, modulus of elasticity and compressive strength in *Eucalyptus* wood // Maderas, Cienc. tecnol. 2012. V. 14. N. 3. P. 267–274.

Hein P. R. G., Silva J. R. M., Brancheriau L. Correlations among microfibril angle, density, modulus of elasticity, modulus of rupture and shrinkage in 6-year-old *Eucalyptus urophylla* × *E. grandis* // Maderas, Cienc. tecnol. 2013. V. 15. N. 2. P. 171–182.

- Holbrook N. M., Putz F. E.* From epiphyte to tree: differences in leaf structure and leaf water relations associated with the transition in growth form in eight species of hemiepiphytes // *Plant, Cell & Environ.* 1996. V. 19. Iss. 6. P. 631–642.
- Knight T. A.* Account of some experiments on the descent of the sap in trees // *Phil. Trans. R. Soc. Lond.* 1803. V. 93. P. 277–289.
- Mishiro A.* Effect of freezing treatments on the bending properties of wood // *Bull. Tokyo Univ. Forests.* 1990. V. 82. P. 177–189.
- Mishiro A., Asano I.* Mechanical properties of wood at low temperatures. Effect of moisture content and temperatures on the bending properties of wood. I. Moisture content below the fiber saturation point // *Mokuzai Gakkaishi (J. Jap. Wood Res. Soc.)*. 1984a. V. 30. N. 3. P. 207–213 (in Japanese with English summary).
- Mishiro A., Asano I.* Mechanical properties of wood at low temperatures. Effect of moisture content and temperature on bending properties of wood. II. Moisture content beyond the fiber saturation point // *Mokuzai Gakkaishi (J. Jap. Wood Res. Soc.)*. 1984b. V. 30. N. 4. P. 277–286 (in Japanese with English summary).
- Netsvetov M., Nikulina V.* Seasonal variations of oscillation and vibration parameters of *Acer platanoides* // *Dendrobiology*. 2010. V. 64. P. 37–42.
- Niklas K. J.* Plant biomechanics: an engineering approach to plant form and function. Chicago: Univ. Chicago Press, 1992. 622 p.
- Niklas K. J.* Tree biomechanics with special reference to tropical trees // *Tropical tree physiology. Adaptations and responses in a changing environment*. Springer Int. Publ. Switzerland, 2016. P. 413–435.
- Niklas K. J., Spatz H.-C.* Worldwide correlations of mechanical properties and green wood density // *Amer. J. Bot.* 2010. V. 97. Iss. 10. P. 1587–1594.
- Rebar D., Rodríguez R. L.* Trees to treehoppers: genetic variation in host plants contributes to variation in the mating signals of a plant-feeding insect // *Ecol. Lett.* 2014. V. 17. Iss. 2. P. 203–210.
- Rebar D., Rodríguez R. L.* Insect mating signal and mate preference phenotypes covary among host plant genotypes // *Evolution*. 2015. V. 69. Iss. 3. P. 602–610.
- Sellier D., Fourcaud T.* Crown structure and wood properties: Influence on tree sway and response to high winds // *Amer. J. Bot.* 2009. V. 96. Iss. 5. P. 885–896.
- Strauss-Debenedetti S., Bazzaz F. A.* Plasticity and acclimation to light in tropical Moraceae of different successional positions // *Oecologia*. 1991. V. 87. Iss. 3. P. 377–387.
- Szmutku M. B., Câmpean M., Sandu A. V.* Microstructure modifications induced in spruce wood by freezing // *Pro Ligno*. 2011. V. 7. N. 4. P. 26–31.
- Telewski F. W.* A unified hypothesis of mechanoperception in plants // *Amer. J. Bot.* 2006. V. 93. Iss. 10. P. 1466–1476.
- Tropical tree physiology. Adaptations and responses in a changing environment / G. Goldstein, L. S. Santiago (Eds.)*. Springer Int. Publ. Switzerland, 2016. 467 p.
- Van Gelder H. A., Poorter L., Sterck F. J.* Wood mechanics, allometry, and life-history variation in a tropical rain forest tree community // *New Phytol.* 2006. V. 171. Iss. 2. P. 367–378.
- Wood handbook – wood as an engineering material. General Technical Report FPL-GTR-190. Centennial Edition.* Madison, WI: U. S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 2010. 508 p.

THE INFLUENCE OF TEMPERATURE ON BIOMECHANICAL PROPERTIES OF WOODY PLANTS IN THE CONDITIONS OF PROTECTED AND OPEN GROUNDS

V. O. Kornienko¹, V. N. Kalaev², A. O. Elizarov³

¹ Donetsk National University
Universitetskaya str., 24, Donetsk, 83001

² Voronezh State University
Universitetskaya Ploshchad', 1, Voronezh, 394018 Russian Federation

³ Donetsk Botanical Garden
Prospekt Il'icha, 110, Donetsk, 83059

E-mail: dayterry@rambler.ru, dr_huixs@mail.ru, donetsk-sad@mail.ru

The study is focused on the influence of ambient temperature on biomechanical properties of tissues in the trees growing in the conditions of protected and open grounds. The investigations were carried out on 11 plant species growing in the greenhouse of Donetsk Botanical Gardens and 11 tree species growing in open grounds in the conditions of the city of Donetsk. The experiment included two series of trials: 1) calculating the Modulus of Rupture (MOR) of woody tissue for species from the fig *Ficus* L. genus at +23 °C; 2) finding temperature dependence of the Modulus of Elasticity (MOE) and Modulus of Rupture (MOR) for the Illawarra flame tree *Brachychiton acerifolius* A. Cunn. ex G. Don Macarthur et C. Moore and ceiba *Ceiba pentandra* (L.) Gaertn., and calculating the same dependences for 11 open ground plants. The values of MOR for 7 greenhouse species averaged 4.9 ± 0.7 MH/m², i.e. circa 20 times lower than in natural environments. Such species as Haroni fig *Ficus vallis-choudae* Delile and banyan fig *Ficus benghalensis* var. *krishnae* (C. DC.) had the lowest MOR values. The study of the influence of low temperatures showed that in the sample pretreated by -23 °C freezing and then heating, MOE dropped simultaneously with slowing of the temperature shift. The altering of MOE is of a stepwise character. The common temperature breakpoint for all the curves is $T = 0$ °C, i. e. freezing point. According to the values of MOE and MOR, the most resistant species are rubber fig *Ficus elastica* Roxb. ex Hornem. and Benjamin fig *Ficus benjamina* L. (for greenhouses), and northern red oak *Quercus rubra* L., common oak *Quercus robur* L., and silver birch *Betula pendula* Roth (for open grounds). The studies allow us to recommend temporary outdoor tub-gardening in summertime for greenhouse trees with proper for each plant shading. Open ground trees should be protected from irreversible trunk bending and breakage preventing or reducing exposure of the lower part of their trunks to light using protective fiber wraps or special cases.

Keywords: freezing, thawing, modulus of elasticity, modulus of rupture, temperature, Donetsk Botanical Garden, Donetsk.

How to cite: Kornienko V. O., Kalaev V. N., Elizarov A. O. The influence of temperature on biomechanical properties of woody plants in the conditions of protected and open grounds // *Sibirskij Lesnoj Zhurnal* (Sib. J. For. Sci.). 2018. N. 6: 91–102 (in Russian with English abstract). DOI: 10.15372/SJFS20180608