

ИНТРОДУКЦИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РАСТЕНИЙ В ИНДУСТРИАЛЬНОМ РЕГИОНЕ

УДК 577.3

В.О. Корниенко², М.В. Нецветов^{1, 2}

ВЛИЯНИЕ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ТЕМПЕРАТУР НА МЕХАНИЧЕСКУЮ УСТОЙЧИВОСТЬ ДУБА КРАСНОГО (*QUERCUS RUBRA* L.)

дерево, древесина, механические свойства, замораживание – оттаивание

Введение

Механическая устойчивость насаждений и отдельно растущих древесных растений в значительной степени определяет их долговечность и полноту выполнения экологических, природоохранных, эстетических и других функций. Наиболее важными причинами механического повреждения насаждений являются сильные ветры и осадки, особенно в виде снега и наледи. Массовые повреждения древостоев наносят существенный экологический и экономический урон, но даже единичные – угрожают жизни и здоровью населения.

Устойчивость дерева к ветровым нагрузкам определяется несколькими основными факторами: морфологией и архитектоникой кроны и корневой системы, биомеханическими свойствами тканей, наличием и степенью повреждения их вредителями, плотностью древостоя, свойствами грунта и рельефом местности. Ветростойкость здорового растения на глубоких почвах зависит главным образом от морфологических характеристик кроны и биомеханики древесины. От них зависят динамические свойства дерева, частота и коэффициент затухания его колебаний. Р. Милн [7], Дж.Р. Мур и Д.А. Магир [11] определили влияние массы кроны и ее распределения вдоль ствола на механическую устойчивость дерева. Из этих работ, как и из чисто теоретических соображений, следует, что увеличение массы кроны и ее размещение ближе к верхушке дерева приводит к снижению его механической устойчивости. Позже было выявлено, что листовая масса оказывает двойственное влияние на динамические параметры дерева: она действует и как дополнительная масса, и как парус одновременно. Эффект парусности увеличивает затухание колебаний, а значит и ветровую устойчивость, а эффект массы снижает их [12].

Относительное значение морфологического и биомеханического факторов у ветровой устойчивости сосны приморской определяли Д. Сельер и Т. Фурко [16]. В ходе компьютерного моделирования они установили, что наибольшее влияние на динамические свойства ствола оказывают характеристики структуры кроны, в первую очередь, те из них, которые определяют площадь парусности. Из биомеханических параметров существенное значение для этих качеств имеет лишь продольный модуль упругости тканей ствола. Истинный вклад вариации биомеханических параметров остается невыясненным, поскольку не учитывался диапазон его варьирования, который связан в первую очередь с сезонными изменениями метеофакторов и переходом растения из фазы физиологической активности в состояние покоя. В предварительных исследованиях показано, что при опускании температуры воздуха ниже 0°C частота колебаний дерева значительно возрастает, а коэффициент затухания снижается [1]. Вместе с тем в зимний период вследствие потери жесткости даже под действием собственного веса может происходить значительный изгиб и безвозвратная деформация стволов и скелетных ветвей, которые ведут к потере жизнеспособности и декоративности деревьев. Следовательно, остается невыясненной роль сезонных изменений биомеханических характеристик древесины в устойчивости дерева к ветровым и статическим нагрузкам.

Цель и задачи исследований

Цель работы – определение величины сезонных изменений биомеханических характеристик древесины и их влияния на механическую устойчивость дуба красного (*Quercus rubra* L.), одного из наиболее перспективных для зеленого строительства интродуцентов. Задачи: 1) определить модуль упругости древесных тканей в цикле замораживания и оттаивания; 2) оценить соответствующие изменения параметров устойчивости дерева к статическим и динамическим нагрузкам.

Объекты и методики исследований

Измерения проводили на побегах дуба красного возрастом более 3-х лет, которые срезали при положительных температурах в период покоя с нижней части кроны, не затеняемой в течение светового дня. Эксперименты были разделены на две серии.

I серия. Свежесрезанные побеги дуба красного вносили в помещение с температурой воздуха $+14\pm 1^\circ\text{C}$ и измеряли продольный модуль упругости (E) (эксперимент 1). Затем образцы замораживали в морозильной камере до температуры -15°C . Общепринятыми методами [14, 2] измеряли E замороженных образцов древесины (2), сразу после оттаивания (3) и по мере высыхания (4, 5, 6).

II серия. Свежесрезанные при температуре -3°C и замороженные в морозильной камере до -18°C образцы переносили в лабораторию с температурой воздуха $+12\dots+15^\circ\text{C}$ и проводили измерение E по мере оттаивания и увеличения температуры тканей образцов.

Для контроля температуры образцов в них со стороны среза помещали термодатчик на глубину 1,5 см. Срезы покрывали герметичным материалом. В каждом опыте методом взвешивания и высушивания определяли относительную влажность (MC) образцов древесины. В каждой серии перед проведением опытов методом взвешивания и погружения в воду определяли плотность (ρ) свежесрезанных образцов.

Для оценки механической устойчивости деревьев *Quercus rubra* из насаждений Донецкого ботанического сада НАН Украины использовали несколько параметров. RRB – относительное сопротивление изгибу [15]:

$$RRB = r^2 E / 4\rho \quad (1),$$

где, r – радиус основания ствола, E – модуль упругости и ρ – плотность древесины.

P_{cr} и m_{cr} – предельно допустимая нагрузка и масса, при действии которых ствол начинает деформироваться или обламывается.

$$P_{cr} = \pi^2 EI / 4l^2, \quad (2),$$

$$m_{cr} = P_{cr} / g$$

где I – момент инерции сечения, l – длина ствола, g – ускорение силы тяжести.

H_{cr} – критическая высота ствола [13], при достижении которой действие его собственного веса привело бы к необратимой деформации или облому.

$$H_{cr} = C(E/\rho)^{1/3} D^{2/3} \quad (3),$$

где C – коэффициент соотношения массы кроны и ствола, D – диаметр основания ствола.

Результаты исследований и их обсуждение

Замораживание (-15°C) образцов привело к росту среднего группового значения E на 6,3% (100% соответствует E свежесрезанных побегов при положительной температуре). После оттаивания среднее групповое значение E снизилось на 15,3%. Влажность образцов не изменялась. При их высыхании до $45\pm 1,0\%$ показатель относительной влажности E древесины вырос на 41,3% от начального значения (табл. 1). Тем не менее, в опытах с отдельными образцами действие замораживания оказалось отрицательным ($E_{отн} < 1$ на рис. 1) или гораздо выше среднего. Поскольку измерения проводились при положительной температуре воздуха, широкий разброс абсолютных и относительных значений E может быть связан со временем оттаивания льда в сосудах. Для про-

верки этого предположения были проведены измерения E замороженной до -18°C древесины. *Таблица 1.* Влияние замораживания, оттаивания и потери влаги на биомеханические характеристики древесины *Quercus rubra* L.

Параметр	Условия опыта					
	1	2	3	4	5	6
Влажность, МС (%)	65,1	65,1	65,1	62,3	51,5	45,0
Модуль упругости, E (ГН/м ²)	3,0	3,19	2,54	3,44	3,72	4,24
Максимальное изменение E , %*	0	260	30	250	290	300
Плотность, ρ (кг/м ³)	998	998	998	-	-	-

Примечания: * для отдельных образцов; 1 – свежесрезанные побеги при $T^{\circ}_{\text{древесины}} > 0^{\circ}\text{C}$; 2 – заморожен-

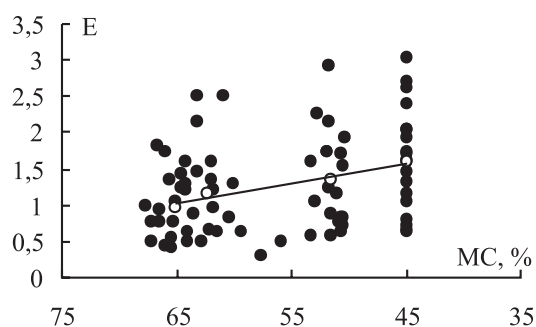


Рис. 1. Зависимость модуля упругости E от относительной влажности МС. Значения E нормированы к E при влажности 45%

ные до $T^{\circ}_{\text{древесины}} -15^{\circ}\text{C}$; 3 – после оттаивания, $T^{\circ}_{\text{древесины}} +12^{\circ}\text{C}$; 4, 5, 6 – высыхающие на воздухе образцы.

В процессе оттаивания древесины модуль упругости E снижается неравномерно, зависимость E (T°) ступенчатая и может быть описана двумя прямыми: одна при T° от -15 до 0°C , другая при $T^{\circ} > 0^{\circ}\text{C}$ (рис. 2, а). На кривой $E(t)$ – зависимость модуля упругости от времени, вначале из-за достижения точки росы влага конденсируется и замерзает на поверхности образца, в результате чего происходит скачок E перед снижением (рис. 2, б). Скорость изменения модуля упругости dE/dt в промежутке времени от скачка E до полного оттаивания образца связана со скоростью изменения температуры древесины dT/dt (рис. 2, в). Как показано на графике, зависимость скорости изменения температуры (dT/dt) от времени (t) нелинейная. Падение скорости нагрева образца, очевидно, 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

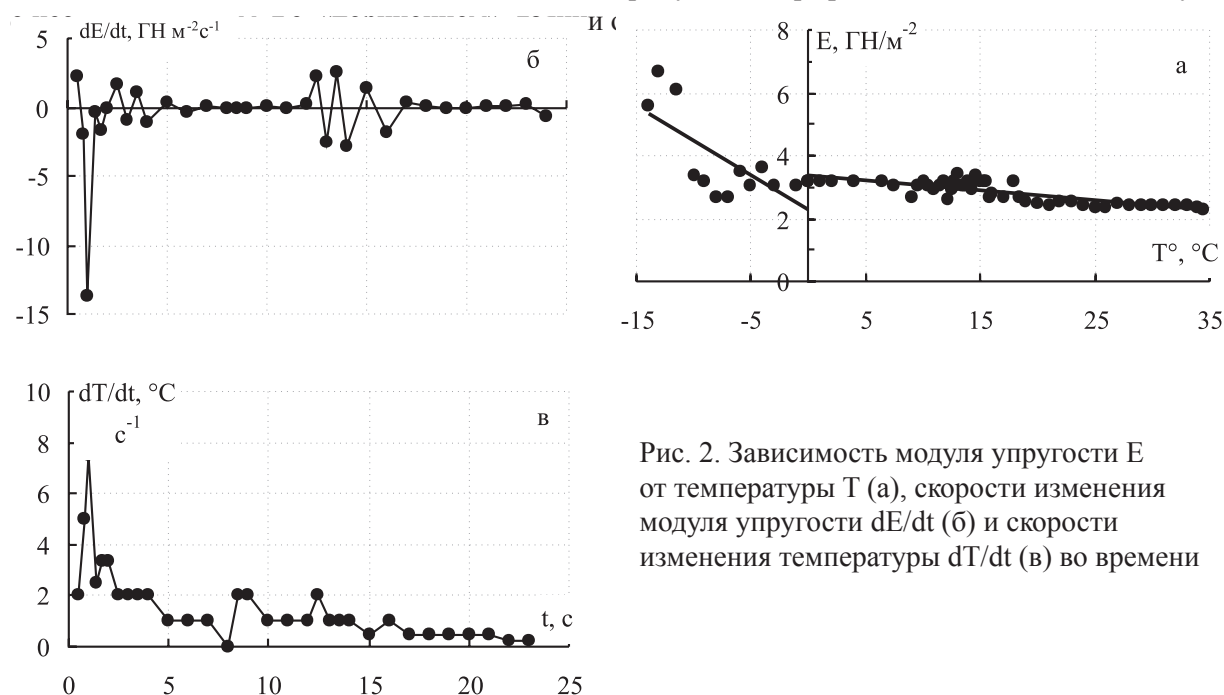


Рис. 2. Зависимость модуля упругости E от температуры T (а), скорости изменения модуля упругости dE/dt (б) и скорости изменения температуры dT/dt (в) во времени

Для учета максимального эффекта перепадов температуры на устойчивость деревьев целесообразно учитывать не среднюю выборочную амплитуду вариаций E , а ее максимальные зафиксированные значения. Так, наибольшее увеличение E при понижении температуры древесины до -15°C составило 252% от изначального значения при положительных температурах, а снижение E на 72% произошло при последующем оттаивании замороженных образцов древесины.

Относительное сопротивление на изгиб RRB прямо зависит от E . Поскольку с увеличением толщины ствола RRB растет в квадратичной зависимости (рис. 3, а), ясно, что перепады температур сказываются в первую очередь на устойчивости деревьев низших классов жизненных состояний, которые характеризуются минимальным отношением диаметра ствола к высоте и наименьшим запасом прочности ствола.

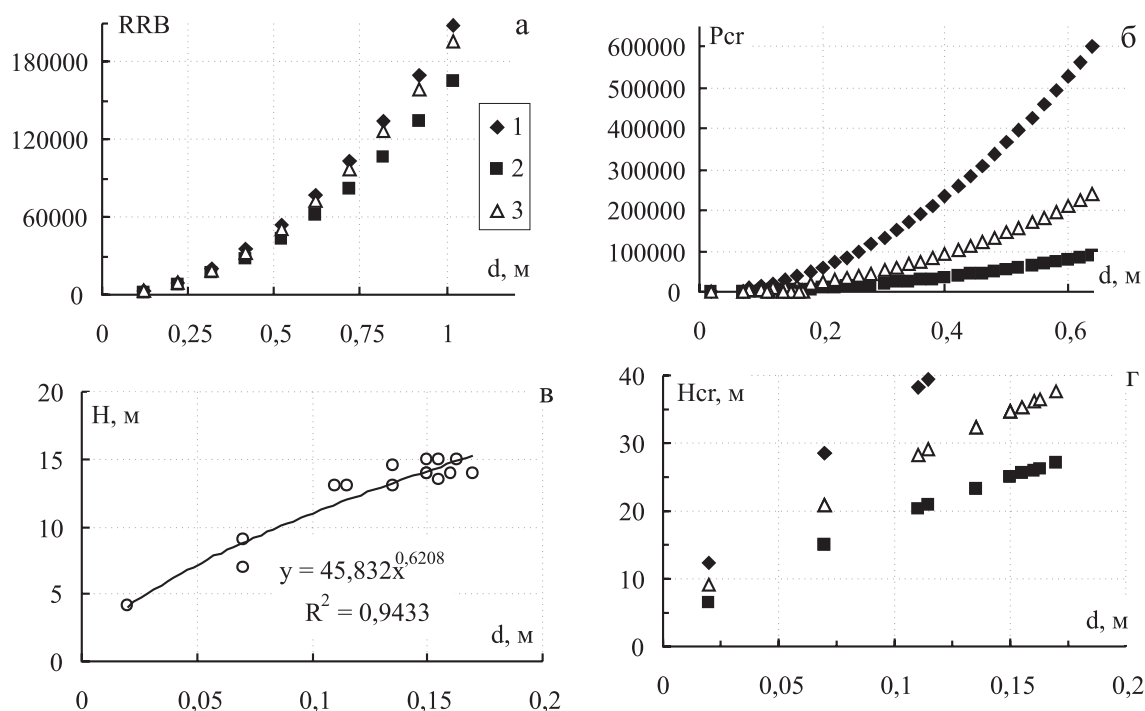


Рис. 3. Зависимость относительного сопротивления изгибу RRB (а), предельно допустимой нагрузки P_{cr} (б), высоты H (в) и критической высоты растения H_{cr} (г) от диаметра ствола d . Зависимости на графиках б–г построены для деревьев низшего класса жизненных состояний (по Крафту). 1 – для замороженных образцов, 2 – для оттаявших образцов, 3 – для образцов при $T = +12^{\circ}\text{C}$.

Относительное сопротивление изгибу отражает изменение устойчивости дерева к механическим нагрузкам, но не дает точного значения критической массы или размеров растения, при которых происходит необратимое искривление или облом ствола. С этой целью можно использовать расчетные значения предельно допустимой нагрузки P_{cr} . Как и RRB, она прямо пропорциональна E . Наиболее вероятному риску облома под действием механических нагрузок подвержены молодые деревья, выросшие в плотном древостое и угнетенные вследствие конкуренции за свет взрослые растения (рис. 3, б, в). Подрост характеризуется минимальным соотношением диаметра ствола к высоте и соответственно наименьшей критической нагрузкой. Температурное изменение модуля упругости может привести к снижению критической массы до нескольких сотен граммов. Она легко достигается при выпадении осадков и образовании наледи на дереве. А при действии динамического фактора критическая нагрузка снижается еще на $\sim 20\%$ [16].

Низкое значение m_{cr} соответствует высоте ствола, близкой к предельной, т.е. H_{cr} . Однако, как следует из зависимостей на рисунке 3, г и формулы (3), при дальнейшем росте дерева утолщение ствола компенсирует его удлинение, что приводит к резкому возрастанию H_{cr} . Уже при диаметре ствола 15 см критическая высота у дуба красного превышает 20 м, что соответствует не достижимому для дуба соотношению диаметра и высоты.

Колебания модуля упругости древесины при переходе через 0°C могут быть связаны с изменением состояния воды и соответственно с ее физическими и химическими свойствами. До достижения точки замерзания упругими свойствами свободной воды в сосудах можно пренебречь, влага оказывает основное влияние через изменение свойств растительных тканей. Вследствие перехода свободной воды в сосудах в твердое состояние механические свойства древесины соответствуют композитному материалу – древесина–лёд. Как установлено Б.С. Чудиновым и В.И. Степановым [3], при температуре -15°C лёд в древесине 65% влажности составляет около 65–70% от общего количества воды в ней. Кроме того, из-за высокой влажности живой древесины возникает напряжение в клеточных стенках, вызванное увеличением объема кристаллизующейся свободной воды [6, 9, 10], что ведет к увеличению E . Постепенное нагревание и вызванное им «порционное» таяние льда приводит к неравномерному во времени снижению модуля упругости древесных волокон.

В дальнейшем после оттаивания древесины определённую роль в колебании значения E могут играть молекулярные процессы, например, связывание воды целлюлозой клеточных стенок. До определенного уровня влажности упругие свойства древесины меняются незначительно, но при перенасыщении влагой молекулы воды, встраиваясь между цепями целлюлозы клеточных стенок, нарушают их структуру, что ведет к снижению механических свойств. Хотя связанная вода в клеточных стенках начинает замерзать при температурах ниже -30°C [4], часть её «выжимается» и замерзает вместе со свободной влагой в просветах сосудов уже при более высоких температурах [6]. После оттаивания эта влага какое-то время остается в сосудах и затем снова связывается целлюлозой клеточных стенок, но, возможно, в меньшем из-за испарения объеме.

Полученная температурная зависимость модуля упругости для образцов древесины дуба красного при их оттаивании соответствует закономерности, установленной Д.У. Грином с соавторами [5] на высушенных и свежих пиломатериалах хвойных. Образцы в отличие от описанных выше экспериментов исследовали при постоянной температуре, так что теплопередача с воздухом отсутствовала. Как показали авторы, зависимость E от T можно описать двумя кривыми для диапазонов ниже и выше точки замерзания, причем угол наклона при $T < 0^{\circ}\text{C}$ круче и увеличивается с возрастанием влажности древесины. В целом эта закономерность проявилась и в нашем исследовании. Отличия в температурной зависимости E древесины при повышении T от условий $T = \text{const}$. состоят в гораздо большей крутизне прямых в обоих температурных диапазонах. Очевидно, отличия связаны с тем, что вблизи 0°C при $T \neq \text{const}$ каждой температурной точке на графике соответствует не одно, а несколько состояний жидкости в объеме древесины. Соответственно механические свойства образца отличаются в разных частях объема и быстро изменяются при переходах воды из твердой фазы в жидкую, и, возможно, при дальнейшем переходе в пар, а также вследствие указанных выше молекулярных процессов в клеточных стенках. На древесине свежих пиломатериалов М.Б. Жмутку с соавторами [17] показала, что многократное замораживание и оттаивание древесины приводит к снижению её механических свойств, что, вероятно, связано с повреждениями древесных волокон [8, 18]. Однако такие результаты не следует переносить непосредственно на живые древесные растения, обладающие возможностями репарации и компенсации потери механических свойств в ходе роста.

Полученная температурная зависимость модуля упругости объясняет эффекты деформации стволов деревьев в зимний период. Колебания температуры вызывают фазовые переходы воды в древесине и на поверхности дерева, что приводит к изменениям механических свойств, которые протекают с неодинаковой скоростью в разных частях ствола, в местах потери жесткости и повышенного напряжения, где происходит деформация ствола и побегов под действием собственной массы, осадков или порывов ветра. При этом деревья с относительно тонким и длинным стволом являются наиболее подверженными таким изменениям. Не выясненным остается вопрос о видовой специфичности величины вариации E при чередовании замораживания и оттаивания и снижения устойчивости с учетом архитектоники кроны. Д.У. Грин с соавторами [5] считают, что для пиломатериалов из хвойных пород собственно вид дерева значения не имеет, важно соотношение объема заболони и ядра, следовательно, и предельной влажности свежей древесины.

Выводы

Действие отрицательных температур (-15°C) на древесные волокна 65% относительной влажности привела к возрастанию модуля упругости E в среднем на 20%. Внутри группы величина температурного изменения E для образцов варьировала от -50% до $+250\%$. После оттаивания среднее значение E вернулось до уровня начального, однако у отдельных образцов снизилось на 70%.

Внутригрупповая вариация E при замораживании и оттаивании связана с некоторым различием размеров исследованных образцов и в связи с этим разной скоростью оттаивания льда в них.

Таяние замороженной свободной воды в древесных волокнах происходит неодновременно во всем объеме, что приводит к скачкообразному снижению модуля упругости на кинетической кривой $E(t)$. Величина E в ходе таяния льда в древесине пропорциональна скорости изменения температуры dT/dt в объеме исследуемых образцов ($t \sim 60-70$). Из этого следует, что таяние замороженной свободной воды в волокнах происходит неодновременно во всем объеме образцов, а механические свойства древесины меняются скачкообразно.

Снижение модуля упругости вследствие чередования процессов замораживания и оттаивания приводит к пропорциональному уменьшению механической устойчивости древесных растений умеренного климата. Риск облома или безвозвратной деформации ствола и побегов подвержены деревья с минимальным отношением диаметра к высоте ($<0,01$). Наименьшее значение критической статической нагрузки при чередовании заморозки–оттаивания древесины зафиксировано для подроста *Quercus robur* L. в исследованных насаждениях – 1,22 Н (или 124 грамма). Высота таких растений близка к критической, достигая которую дерево деформируется или обламывается под действием собственного веса.

Рекомендации и перспективы дальнейших исследований

Для предупреждения безвозвратных изгибов и обломов стволов в зимнее время необходимо по возможности исключать или снижать действие света на нижнюю треть стволов деревьев, например, обматыванием их защитным волокном или применением специальных чехлов. Укреплению канатами подлежат деревья, вытянувшиеся вследствие роста в затененных условиях, подпорками – длинные скелетные побеги старых деревьев с углом отхождения от ствола около 90 градусов.

В дальнейших исследованиях необходимо установить температурную зависимость предела прочности и модуля упругости древесных волокон основных пород, применяемых в озеленении городских территорий.

1. **Нецветов М.В.** Влияние аэродинамического сопротивления листьев на колебания ствола клена ложноплатанового / М.В. Нецветов // Лесоведение. – 2012. – № 1. – С. 56–64.
Netsvetov, M.V., Influence of the Leaf Aerodynamic Resistance on Stem Vibrations in Planetree Maple, *Lesovedenie (Silviculture)*, 2012, no. 1, pp. 56–64.
2. **Нецветов М.В.** Механическая устойчивость деревьев и кустарников к вибрационным нагрузкам / М.В. Нецветов, Е.П. Сулова // Промышленная ботаника. – 2009. – Вып. 9. – С. 60–67.
Netsvetov, M.V., and Suslova, Ye.P., Mechanical Resistance of Trees and Shrubs to Vibration Load, *Prom. bot. (Industrial Botany)*, 2009, vol. 9, pp. 60–67.
3. **Chudino, B.S.**, and Stepanov, V.I., Phase Mixture of Water in Frozen Wood, *Holtztechnologie*, 1968, vol. 9 (1), pp. 14–18.
4. **Cividini, R.**, Conventional Kiln-Drying of Lumber, Milan: Nardi S.p.A, 2001.
5. **Green, D.W.**, Evans, J.W., Logan, J.D., and Nelson, W.J., Adjusting Modulus of Elasticity of Lumber for Changes in Temperature, *Forest Products Journal*, 1999, vol. 49 (10), pp. 82–94.
6. **Или, J.**, Advantages of Pre-Freezing for Reducing Shrinkage-Related Degrade in Eucalyptus: General Considerations and Review of Literature, *Wood Science and Technology*, 1995, vol. 29 (4), pp. 277–285.
7. **Milne, R.**, Dynamics of Swaying *Picea Sitchensis*, *Tree Physiology*, 1991, no. 9, pp. 383–399.
8. **Mishiro, A.**, Effect of Freezing Treatments on the Bending Properties of Wood, *Bulletin of Tokyo University*, 1990, vol. 82, pp. 177–189.
9. **Mishiro, A.**, and Asano, I., Mechanical Properties of Wood at Low Temperatures: Effect of Moisture Content and Temperature on Bending Properties of Wood. Part I. Moisture Content Below the Fiber Saturation Point, *Journal of Japanese Wood Res. Soc.*, 1984, vol. 30 (3), pp. 207–213.

10. **Mishiro, A.**, and Asano, I., Mechanical Properties of Wood at Low Temperatures: Effect of Moisture Content and Temperature on Bending Properties of Wood. Part II. Moisture Content Beyond the Fiber Saturation Point, *Journal of Japanese Wood Res. Soc.*, 1984, vol. 30 (4), pp. 277–286.
11. **Moore, J.R.**, and Maguire, D.A., Simulating the Dynamic Behavior of Douglas-Fir Trees under Applied Loads by the Finite Element Method, *Tree Physiology*, 2008, no. 28, pp. 75–83.
12. **Netsvetov, M.**, and Nikulina, V., Seasonal Variations of Oscillation and Vibration Parameters of *Acer Platanoides* L., *Dendrobiology*, 2010, vol. 64, pp. 37–42.
13. **Niklas, K.J.**, Plant Allometry: The Scaling of Form and Process, Chicago (Illinois, USA): University of Chicago Press, 1994.
14. **Niklas, K.J.**, Plant Biomechanics: an Engineering Approach to Plant Form and Function, Chicago: University of Chicago Press, 1992.
15. **Niklas, K.J.**, and Spatz, H.C., Worldwide Correlations of Mechanical Properties and Green Wood Density, *American Journal of Botany*, 2010, vol. 97 (10), pp.1587–1594.
16. **Sellier, D.**, and Fourcaud, T., Crown Structure and Wood Properties: Influence on Tree Sway and Response to High Winds, *American Journal of Botany*, 2009, vol. 96(5), pp. 885–896.
17. **Szmutku, M.B.**, Campean, M., and Laurenzi, W., Influence of Cyclic Freezing and Thawing Upon Spruce Wood Properties, *Pro Ligno*, 2012, vol. 8 (1), pp. 35–43.
18. **Szmutku, M.B.**, Campean, M., and Sandu, A.V., Microstructure Modifications Induced in Spruce Wood by Freezing, *Pro Ligno*, 2011, vol. 7 (4), pp. 26–31.

¹Донецкий ботанический сад НАН Украины

²Донецкий национальный университет

Получено 02.09.2013

УДК 577.3

ВПЛИВ МІНУСОВИХ ТЕМПЕРАТУР НА МЕХАНІЧНУ СТІЙКІСТЬ ДУБА ЧЕРВОНОГО
(*QUERCUS RUBRA* L.)

В.О. Корнієнко², М.В. Нецвєтов^{1,2}

¹Донецький ботанічний сад НАН України

²Донецький національний університет

У статті представлена і проаналізована залежність модуля пружності Е дуба червоного (*Quercus rubra* L.) від сезонних змін. Температурний діапазон зміни Е в зразках становив $-15^{\circ}\text{C} - +35^{\circ}\text{C}$, при вологості 65–45%. Для оцінки механічної стійкості були використані наступні параметри: RRB – відносний опір вигину, Pcr та mcr – гранично допустиме навантаження та маса, Hcr – критична висота стовбура. Отримані дані свідчать про те, що варіації модуля пружності в циклі заморожування–відтавання позначаються в першу чергу на стійкості дерев з мінімальним відношенням діаметра стовбура до його висоти. Таким чином, з групи досліджених рослин при перепадах температур ризику деформації або облому під дією власної ваги схильний підріст *Quercus robur* L. з висотою стовбура понад 2 м і найбільш тонкі пригнічені дорослі рослини.

UDC 577.3

THE INFLUENCE OF NEGATIVE TEMPERATURES ON THE MECHANICAL RESISTANCE OF RED OAK
(*QUERCUS RUBRA* L.)

V.O. Kornienko², M.V. Netsvetov^{1,2}

¹Donetsk Botanical Garden of the National Academy of Sciences of Ukraine

²Donetsk National University

This paper presents and analyzes the dependence of elasticity modulus (E) in red oak (*Quercus rubra* L.) from seasonal variations. Temperature range of E variation in the samples was $-15^{\circ}\text{C} - +35^{\circ}\text{C}$ at the humidity of 65 to 45%. We used the following indices to assess mechanical resistance: RRB – relative resistance to bending, Pcr та mcr – critical permissible pressure and weight, Hcr – critical stem height. Our data testify that variations of elasticity modulus within the cycle of freezing–thawing are most of all affecting resistance of the trees with minimum correlation of the stem diameter to its height. Thus, as far as the investigated plant groups are concerned, *Quercus robur* L. undergrowth over 2 meters high and the thinnest suppressed adult trees are vulnerable to the risks of deformation and breaks under their own weight during temperature variations.