

ЭКОЛОГИЧЕСКОЕ ЗНАЧЕНИЕ БИОМЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ *QUERCUS ROBUR L.* И *QUERCUS RUBRA L.* В ГОРОДСКИХ НАСАЖДЕНИЯХ

Корниенко В.О.

ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет»

ул. Университетская, 24, г. Донецк, 83001

ГУ «Донецкий ботанический сад»

просп. Ильича, 110, г. Донецк, 283059

e-mail: dayterry@rambler.ru

Аннотация. В работе представлена и проанализирована зависимость модуля E упругости дуба черешчатого и дуба красного от сезонных изменений. Температурный диапазон изменения E в образцах составлял $-15 - +35$ °C, при влажности 65–45 %. Для оценки механической устойчивости были использованы следующие параметры: RRB – относительное сопротивление изгибу, P_{cr} и m_{cr} – предельно допустимая нагрузка и масса, H_{cr} – критическая высота ствола. Полученные данные свидетельствуют о том, что вариации модуля упругости в цикле замораживание-оттаивание сказываются в первую очередь на устойчивость деревьев с минимальным отношением диаметра ствола к его высоте. Таким образом, из группы исследованных растений при перепадах температур риску деформации или облому под действием собственного веса подвержен подрост дубов с высотой ствола более 2 м и наиболее тонкие угнетённые взрослые растения.

Ключевые слова: механическая устойчивость, модуль упругости, *Quercus robur L.*, *Quercus rubra L.*

THE ECOLOGICAL SIGNIFICANCE OF THE BIOMECHANICAL PROPERTIES OF *QUERCUS ROBUR L.* AND *QUERCUS RUBRA L.* IN URBAN SPACES

Korniyenko V.O

SEI HPL «Donetsk national University»

Universitetskaya St., 24, Donetsk, 83001

State Institution «Donetsk Botanical Garden»

Il'icha Pr-t, 110, Donetsk, 283059

e-mail: dayterry@rambler.ru

Abstract. This paper presents and analyzes the dependence of elasticity modulus (E) in pedunculate oak (*Quercus robur L.*) and 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, P_{cr} and m_{cr} – critical permissible pressure and weight, H_{cr} – 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.* and *Quercus rubra 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.

Key words: mechanical stability, modulus of elasticity, *Quercus robur L.*, *Quercus rubra L.*

Механическая устойчивость насаждений и отдельно растущих древесных растений в значительной степени определяет их долговечность и полноту выполнения экологических, природоохранных, эстетических и других функций. Наиболее важной причиной механического повреждения насаждений являются сильные ветры, которые наносят не только существенный экологический и экономический урон, но и 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 [1], Дж. Р. Мур и Д.А. Магир [2] 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 [3].

Относительное значение морфологического и биомеханического факторов у ветровой устойчивости сосны приморской определяли Д. Сельер и Т. Фурко [4]. 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. Из литературных источников известно, что при опускании температуры воздуха ниже 0°C частота колебаний дерева значительно возрастает, а коэффициент затухания снижается [5]. 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, а также из экологическое значение.

Целью работы являлось определение величины сезонных изменений биомеханических характеристик древесины и их влияния на механическую устойчивость *Quercus robur* L. и *Quercus rubra* L., одних 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 деревьев к статическим и динамическим нагрузкам; 3) определить возможные экологические последствия изменения архитектоники кроны вследствие потери древесными механической устойчивости.

Измерения проводили на побегах дуба черешчатого и 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 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 [6,7] 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 robur* L. и *Quercus rubra* L. из насаждений Донецкого ботанического сада использовали несколько параметров: RRB – относительное сопротивление изгибу [8], P_{cr} и m_{cr} – предельно допустимая нагрузка и масса, при действии которых ствол начинает деформироваться или обламывается, H_{cr} – критическая высота ствола [9], при достижении которой действие его собственного веса привело бы к необратимой деформации или облому.

Действие отрицательных температур (-15°C) на древесные волокна 65% относительной влажности привело к возрастанию модуля упругости E в среднем на 20% для дуба черешчатого и на 30% для дуба красного. Внутри группы величина температурного изменения E для образцов варьировала от -50% до $+250\%$ (в среднем для двух видов). 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 одновременно 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 ($r\sim 60\text{--}70$). Из этого следует, что таяние замороженной свободной воды в волокнах происходит одновременно во всем объеме образцов, а механические свойства древесины меняются скачкообразно.

Механическая устойчивость древесного растения прямо зависит от модуля упругости. Поскольку с увеличением толщины ствола относительное сопротивление на изгиб (RRB) растет в квадратичной зависимости (см. рис. 1, 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.

Наиболее вероятному риску облома под действием механических нагрузок подвержены молодые деревья, выросшие в плотном древостое и угнетенные вследствие конкуренции за свет взрослые растения (см. рис. 1, 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 $\sim 20\%$ [10].

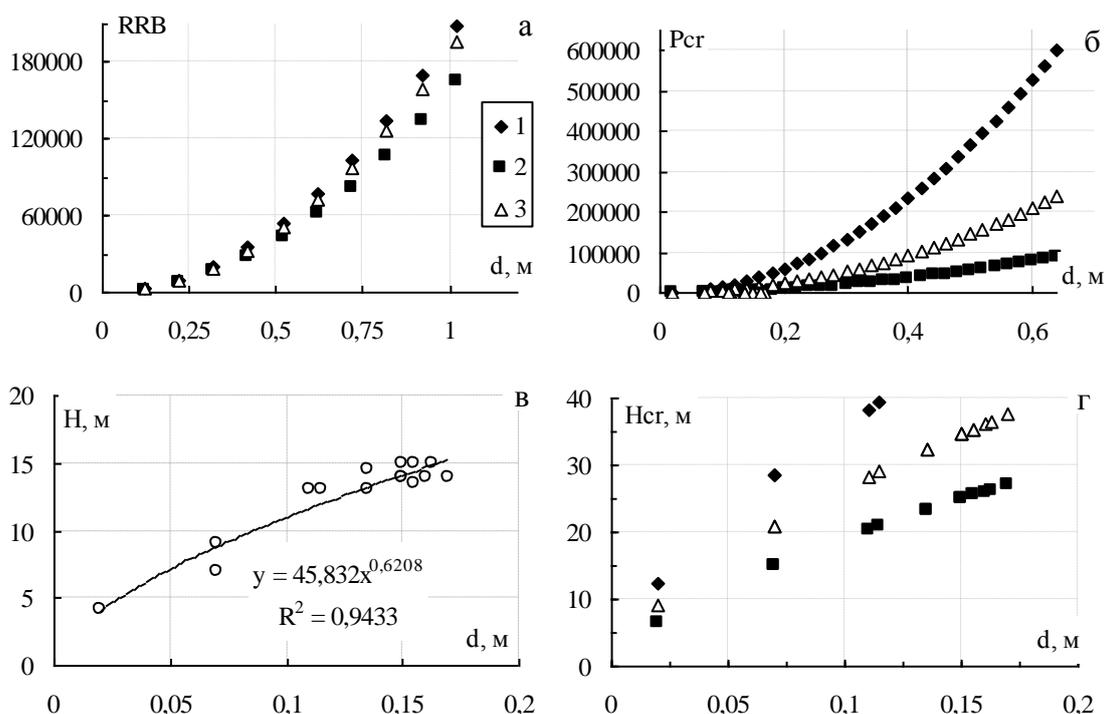


Рисунок 1 – Зависимость относительного сопротивления изгибу RRB (а), предельно допустимой нагрузки Pcr (б), высоты H (в) и критической высоты растения Hcr (г) от диаметра ствола d на примере *Quercus rubra* L. Зависимости на графиках б–г построены для деревьев низшего класса жизненных состояний (по Крафту). 1 – для замороженных образцов, 2 – для оттаявших образцов, 3 – для образцов при T = +12 °С.

Низкое значение m_{cr} соответствует высоте ствола, близкой к предельной, т.е. Hcr. Однако, как следует из зависимостей на рисунке 1, г при дальнейшем росте дерева утолщение ствола компенсирует его удлинение, что приводит к резкому возрастанию Hcr. Уже при диаметре ствола 15 см критическая высота у дуба черешчатого и 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 [10], 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 [11–13], что ведет к увеличению E. Постепенное нагревание и вызванное им «порционное» таяние льда приводит к неравномерному во времени снижению модуля упругости древесных волокон.

Отдельного внимания заслуживает возможное экологическое и биологическое следствие температурного изменения модуля упругости древесины. Поскольку E прямо отражается на жёсткости ствола и побегов, можно утверждать, что при переходе к отрицательным температурам устойчивость дерева к нагрузкам возрастает. Однако это увеличение может нивелироваться одновременным снижением предела прочности, связанной с хрупкостью льда. Интерес представляют также циклические переходы температуры от положительных значений к отрицательным и обратно. Как было показано в нашем эксперименте, наличие градиента температур между древесиной и окружающим воздухом приводит к резким скачкообразным изменениям E. Соответственно, это отражается на жёсткости побегов и на углах их отхождения от ствола, т.е. на архитектонике. Изменение E скачками при быстром нагреве, очевидно, связано с неравномерным во времени плавлением льда в объёме надземных частей растения. *In situ* это должно приводить к неравномерной потере жёсткости вдоль ствола или побегов, а значит — к их деформациям в одной или нескольких точках. Уменьшение упругости побегов приводит также к снижению частоты собственных колебаний ствола или ветвей, что негативно сказывается на устойчивости к ветру. Его спектр расположен в диапазоне ниже 1 Гц, поэтому снижения частот колебания дерева увеличивает вероятность резонанса [4].

Модуль упругости не остаётся постоянным и в диапазоне положительных температур. С ростом температуры он падает до 30% от контрольного значения (при T=15°C). Подобный эффект хорошо изучен на технической древесине и используется в промышленности для придания нужной формы деревянным изделиям. Экстраполируя полученные данные на растение, можно сделать следующее предположение, которое требует дальнейшего изучения. При росте температуры потеря упругости должна приводить к медленным изгибам

побегов, что в свою очередь отразится на площади проекции кроны, а также на её светопрозрачности и, как следствие, на температуре и влажности под пологом.

Список литературы / References:

1. Milne R. Dynamics of swaying *Picea sitchensis*. *Tree Physiology*, 1991, no. 9, pp. 383-399.
2. Moore J.R., 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.
3. Netsvetov M., Nikulina V. Seasonal variations of oscillation and vibration parameters of *Acer platanoides* L. *Dendrobiology*, 2010, vol. 64, pp. 37-42.
4. Sellier D., Fourcaud T. Crown structure and wood properties: influence on tree sway and response to high winds. *American Journal of Botany*, 2009, vol. 96, no. 5, pp. 885-896.
5. Нецветов М.В. Влияние аэродинамического сопротивления листьев на колебания ствола клена ложноплатанового. *Лесоведение*, 2012, № 1, с. 56-64. [Netsvetov M. The influence of aerodynamic resistance of the leaves by the vibration of the trunk of the sycamore. *Forestry*, 2012, no. 1, pp. 56-64. (In Russ.)]
6. Niklas K.J. *Plant biomechanics: an engineering approach to plant form and function*. Chicago: University of Chicago Press., 1992, 622 p.
7. Нецветов М.В., Сулова Е.П. Механическая устойчивость деревьев и кустарников к вибрационным нагрузкам. *Промышленная ботаника*, 2009, вып. 9, с. 60-67. [Netsvetov M.V., Suslova H.P. Mechanical stability of trees and shrubs to vibratory loads. *Industrial botany*, 2009, vol. 9, pp. 60-67. (In Russ.)]
8. Niklas K.J., Spatz H.-C. Worldwide correlations of mechanical properties and green wood density. *American Journal of Botany*, 2010, vol. 97, no. 10, pp. 1587-1594.
9. Niklas K.J. *Plant allometry: The scaling of form and process*. Chicago: University of Chicago Press., 1994, 360 p.
10. Chudinov B.S., Stepanov V.I. Phase mixture of water in frozen wood. *Holtztechnologie*, 1968, vol. 9, no. 1, pp. 14-18.
11. Ilic 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, no. 4, pp. 277-285.
12. Mishiro A., 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, no. 3, pp. 207-213.
13. Mishiro A., 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, no. 4, pp. 277-286.

ЭЛЕКТРОННАЯ МИКРОСКОПИЯ БИОПЛЕНКИ, СФОРМИРОВАННОЙ В УСЛОВИЯХ ЛАБОРАТОРНОГО СТЕНДА

Погорелова М.А., Кузнецов А.Л., Левачева М.А. Суворов О.А., Ипатов Л.Г.
ФГБУН Институт теоретической и экспериментальной биофизики РАН
г. Пущино, Московская обл., 142290, РФ
e-mail: agpogorelov@rambler.ru

Аннотация. Биопленка представляет собой сообщество разных видов, не конкурирующих микроорганизмов, которые образуют многофункциональный симбиоз сложной архитектуры. По всем признакам такую колонию следует рассматривать, как биологическую ткань, обладающую особыми свойствами. В их ряду способность к самоорганизации посредством формирования гликопротеинового матрикса, который за счет адгезии к подложке образует комфортную среду обитания. Отметим химическую агрессивность, как способ закрепления на поверхности и получения субстратов, но одновременно причина коррозии самых стойких материалов. Далее, биологическая активность, которая выражается в неконтролируемом воспроизводстве даже при гипоксии, ограниченном только доступностью ресурсов. Многослойная пространственная организация, наличие механизмов поддержания гомеостаза, способность к быстрой мутации делает биопленки устойчивыми к действию многих химических, физических или бактериологических факторов. Этим же объясняется феноменальная резистентность биопленки к антибиотикам широкого спектра действия.

Ключевые слова: реактор биопленок, полимерный матрикс, 3D микробиологический симбиоз, сканирующая электронная микроскопия, электрохимически активированная вода