

НЕРАЗРУШАЮЩИЙ МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ УПРУГИХ СВОЙСТВ ДРЕВЕСНЫХ РАСТЕНИЙ

А.А. КОТОВ, *проф. МГУЛ, д-р техн. наук*⁽¹⁾

kotov@mgul.ac.ru

⁽¹⁾ ФГБОУ ВО «Московский государственный университет леса»
141005, Московская обл., г. Мытищи-5, ул. 1-я Институтская, д. 1

Механические свойства нежелательной древесной растительности напрямую влияют на характеристики рабочих органов лесохозяйственных машин. Изучение этих свойств представляет собой сложную техническую задачу. Часто постановка задачи упрощается и не учитываются многие факторы: влияние на упругие свойства растений механической связи с почвой, отличие свойств растущих и спелых растений и т. д., что приводит к некоторой ошибке. Разработана математическая модель древесного растения и предложена методика определения вклада корневой системы и почвы, обеспечивающих упругую заделку, в суммарную жесткость растения при статическом изгибе. В качестве допущений приняты следующие: стволы растений имеют форму, близкую к конусу с малым диаметром у основания и большой высотой, нагружены сосредоточенной силой и испытывают чистый изгиб, коэффициент жесткости корневой системы и модуль упругости растущего стволика постоянны по углу поворота и высоте стволика соответственно. Установлены зависимости для определения полного отклонения произвольной точки стволика древесных растений при статическом изгибе за счет деформации корневой системы и почвы и прогиба стволика при условии абсолютно жесткой заделки. Выполнен анализ этих зависимостей. Получена система уравнений для определения упругих характеристик древесного растения неразрушающим методом. Представлено экспериментальное подтверждение теоретических выводов в графической форме. Исследованиями установлено, что коэффициент жесткости корневой системы изменяется пропорционально квадрату диаметра стволика у корневой шейки.

Ключевые слова: корневая система, ствол, прогиб, модуль упругости, коэффициент жесткости.

При создании средств механизации для проведения лесоводственного ухода за лесными культурами исходными данными являются как биометрические, так и механические свойства нежелательной древесной растительности. Определение последних представляет собой сложную техническую задачу [1 – 6] и не всегда учитывает реальные условия произрастания. Так, при изучении упругих свойств живых растений почти всегда игнорируется влияние их механической связи с почвой. Кроме этого, при исследованиях используются предварительно срезанные растения, что приводит к некоторой ошибке.

Определяя вклад корневой системы и почвы (далее – корней), обеспечивающих упругую заделку в суммарную жесткость растения при изгибе, представляем его в виде двух частей: корней и стволика. Полное отклонение растения (перемещение x точки приложения к растению изгибающей силы F) складывается в этом случае из двух слагаемых x_1 и x_2 , где x_1 – отклонение за счет деформации корней, x_2 – прогиб самого стволика при условии абсолютно жесткой заделки

$$x = x_1 + x_2. \quad (1)$$

Рассматривая равновесие растения,

$$Fh = C\varphi,$$

где h – высота приложения нагрузки, м;

C – коэффициент жесткости корневой системы, Н·м/рад;

φ – угол поворота оси стволика, рад.

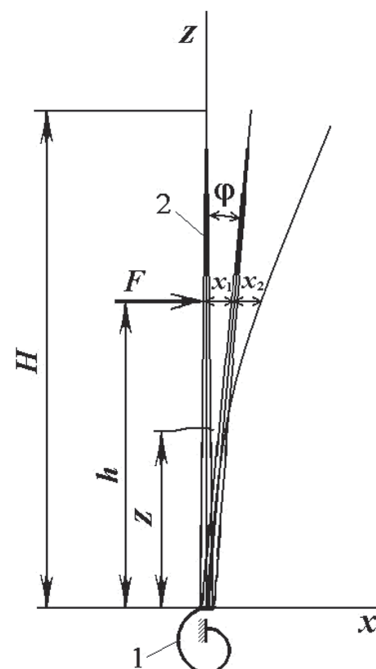


Рис. 1. К расчету изгиба растения: 1 – корневая система, 2 – ствол

Fig. 1. The calculation of bending plants: 1 – the root system, 2 – barrel

Принимая, что $\phi = x_1 / h$, получаем

$$C = \frac{Fh^2}{x_1} \quad (2)$$

$$\text{или } x_1 = \frac{Fh^2}{C}. \quad (3)$$

Допускаем, что стволы растений имеют форму, близкую к конусу с малым диаметром основания и большой высотой, нагружены сосредоточенной силой и испытывают чистый изгиб. Также считаем, что коэффициент жесткости корневой системы и модуль упругости растущего стволика постоянны соответственно по углу поворота и высоте стволика.

Используя интеграл Мора [7], запишем выражение для небольших прогибов консольно заделанного конуса

$$x_2 = \sum \int_H \frac{M_y M_1}{EJ_y} dz.$$

Для конуса диаметр стволика в произвольном сечении будет равен

$$d_i = d_0 \frac{H-z}{H} = d_0 \left(1 - \frac{z}{H}\right) = d_0 - \frac{d_0}{H} z,$$

где d_0 – диаметр стволика у корневой шейки, H – высота стволика.

Тогда момент инерции сечения конуса в произвольной точке будет равен

$$J_y = J_0 \frac{(H-z)^4}{H^4} = J_0 \left(1 - \frac{z}{H}\right)^4,$$

где J_0 – момент инерции сечения конуса у основания.

Изгибающий момент от силы F в произвольной точке будет равен

$$M_y = F(h-z).$$

Изгибающий момент единичной силы в этой же точке будет равен

$$M_1 = 1 \cdot (h-z).$$

Тогда [8]

$$x_2 = \frac{FH}{3EJ_0} \cdot \frac{h^3}{H-h}. \quad (4)$$

Выражение (1) предстанет в следующем виде

$$x = \frac{Fh^2}{C} + \frac{Fh^3}{3EJ_0} \cdot \frac{H}{H-h} = Fh^3 \left(\frac{1}{Ch} + \frac{1}{3EJ_0} \cdot \frac{H}{H-h} \right), \quad (5)$$

$$\text{или } x = Fh^2 \frac{3EJ_0(H-h) + CHh}{3EJ_0C(H-h)}. \quad (6)$$

Выразим из (5) с учетом (1) коэффициент жесткости C

$$C = \frac{Fh^2}{x-x_2} = \frac{3EJ_0Fh^2(H-h)}{3x_2EJ_0(H-h) - Fh^3H}. \quad (7)$$

Так как составные части полного отклонения растения под действием изгибающей силы определить на практике непосредственно невозможно, традиционным методом находим вначале модуль упругости стволика срезанного растения по известным формулам сопротивления материалов, а затем вычисляем отклонение x_2 , определяемое жесткостью стволика. Зная полное отклонение x , находим как разницу отклонение x_1 , определяемое жесткостью корней. Потом по формуле (7) рассчитываем жесткость корневой системы.

Исследуем влияние, оказываемое частями растения на его суммарную жесткость, в зависимости от высоты приложения нагрузки. Для этого разделим (4) на (3)

$$\frac{x_2}{x_1} = \frac{CHh}{3EJ_0(H-h)}.$$

При $h \rightarrow 0$ отношение $(x_2 / x_1) \rightarrow 0$. Следовательно, $x_2 \ll x_1$. Поэтому при малой высоте приложения нагрузки можно принять, что $x_1 \approx x$, так как полное отклонение точки стволика в этом случае будет определяться в основном только деформацией корней. Запишем измененное выражение (2)

$$C = \frac{Fh^2}{x_1} \approx \frac{Fh^2}{x}.$$

При $h \rightarrow H$ отношение $(x_2 / x_1) \rightarrow \infty$. Следовательно, $x_2 \gg x_1$. Поэтому при большой высоте приложения нагрузки с достаточной для практики точностью можно принять, что $x_2 \approx x$, так как полное отклонение стволика в этом случае будет определяться в основном только деформацией собственно стволика. Здесь модуль упругости растущего стволика можно приближенно найти по формуле

$$E = \frac{Fh^3}{3x_2J_0} \cdot \frac{H}{H-h} \approx \frac{Fh^3}{3xJ_0} \cdot \frac{H}{H-h}. \quad (8)$$

Очевидно, что без учета влияния корневой системы при произвольной высоте приложения нагрузки формулу (8) можно представить следующим образом

$$E_{\text{пр.}} = \frac{Fh^3}{3xJ_0} \cdot \frac{H}{H-h},$$

где $E_{\text{пр.}}$ – приведенный модуль упругости стволика.

Используя уравнение (4), имеем

$$E_{\text{пр.}} = E \frac{x_2}{x}, \quad (9)$$

а с учетом (6)

$$E_{\text{пр.}} = E \cdot \frac{CHh}{3EJ_0 \cdot (H-h) + CHh}.$$

Заменим

$$\frac{CHh}{3EJ_0 \cdot (H-h) + CHh} = \frac{1}{\frac{3EJ_0 \cdot (H-h)}{CHh} + 1} = k_{\text{пр.}}$$

– коэффициент приведения.

С учетом (9)

$$k_{\text{пр.}} = \frac{x_2}{x} = \frac{1}{\frac{x_1}{x_2} + 1}.$$

В результате получаем

$$E_{\text{пр.}} = E \cdot k_{\text{пр.}}$$

Очевидно, что величина приведенного модуля упругости будет зависеть от высоты приложения нагрузки.

Модуль упругости стволика и жесткость корневой системы можно определить с помощью уравнения (5), прикладывая изгибающую силу на разной высоте. Тогда получаем систему уравнений

$$\left. \begin{aligned} x' &= \frac{F'(h')^2}{C} + \frac{F'(h')^3}{3EJ_0} \cdot \frac{H}{H-h'}; \\ x'' &= \frac{F''(h'')^2}{C} + \frac{F''(h'')^3}{3EJ_0} \cdot \frac{H}{H-h''} \end{aligned} \right\}$$

где x' , F' , x'' , F'' – соответственно отклонения точки стволика и изгибающие силы на высотах h' и h'' .

Обозначив

$$k_{11} = F'(h')^2, \quad k_{12} = \frac{F'(h')^3}{3J_0} \cdot \frac{H}{H-h'},$$

$$k_{21} = F''(h'')^2, \quad k_{22} = \frac{F''(h'')^3}{3J_0} \cdot \frac{H}{H-h''},$$

получим

$$\left. \begin{aligned} x' &= \frac{k_{11}}{C} + \frac{k_{12}}{E}; \\ x'' &= \frac{k_{21}}{C} + \frac{k_{22}}{E} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

Выразим C из первого уравнения системы (10)

$$C = \frac{k_{11}}{x' - \frac{k_{12}}{E}} \quad (11)$$

и подставим его во второе. После упрощения получим

$$E = \frac{k_{11} \cdot k_{22} - k_{21} \cdot k_{12}}{k_{11} \cdot x'' - k_{21} \cdot x'} \quad (12)$$

Для проверки теоретических положений проведены экспериментальные исследования [9, 10]. Исследовались упругие свойства пород: осины, березы и ольхи. При этом замерялись высота растений H и диаметр их стволиков у корневой шейки d_0 , а также на высотах 0,2, 0,4, 0,6 м и т. д. ($d_{0,2}$, $d_{0,4}$, $d_{0,6}$ и т. д.). Далее к стволикам прикладывалась нагрузка на высотах с шагом 0,2 м и фиксировались отклонения в точках ее приложения. Затем с учетом формы стволика по приведенным выше формулам определялся модуль упругости.

Из графика (рис. 2) видим, что при минимальной высоте приложения изгибающей силы наибольший вклад в отклонение стволика вносит жесткость корневой системы, а при максимальной – жесткость стволика. При увеличении высоты приложения нагрузки прогиб собственно стволика приближается к полному его отклонению. Используя эту закономерность, можно приближенно определить модуль упругости стволика: при достаточно большой высоте приложения нагрузки он примерно равен приведенному модулю упругости.

Аналогичный график, но построенный при постоянной изгибающей силе ($F = 10$ Н), представлен на рис. 3.

Модуль упругости стволика определялся как на растущей, так и на спеленной целой и разрезанной на части по 0,2 м березе ($d_0 = 25,4$ мм, $H = 3,92$ м). При этом результаты оказались примерно одинаковыми.

С помощью уравнений (11) и (12) были составлены специальные вспомогательные таблицы, примеры которых представлены в статье (табл. 1–3). Отбросив грубые наблюдения [11], найдем средние значения $E_{\text{ср.}}$ и $C_{\text{ср.}}$, которые указаны в конце таблиц. На основании этих таблиц построены точечные диаграммы модуля упругости стволика и коэффициента жесткости корневой системы. Они частично представлены на рис. 4 для березы, на рис. 5 для осины, а на рис. 6 для ольхи.

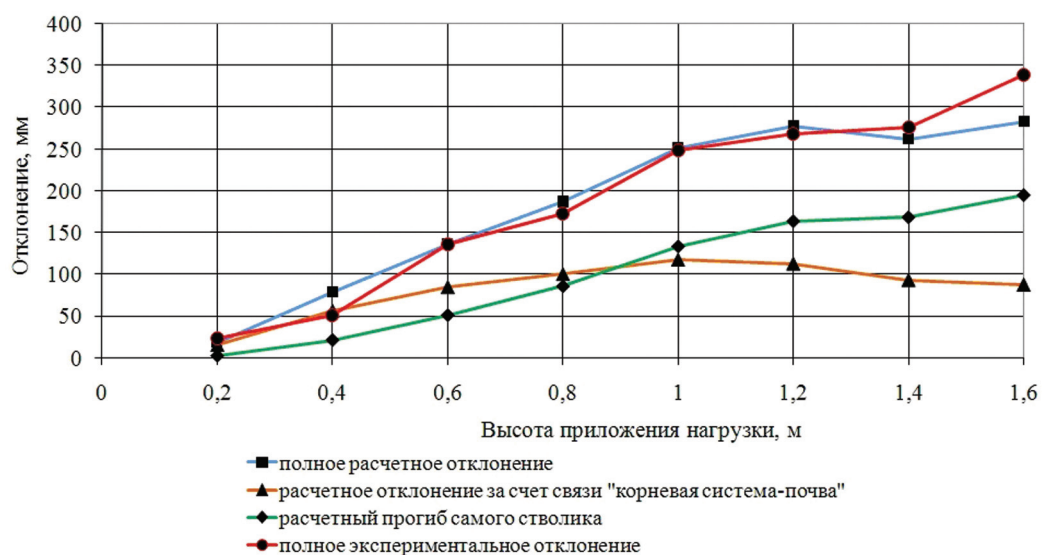


Рис. 2. Сравнение фактического и расчетного отклонений стволика березы ($d_0 = 25,4$ мм, $H = 3,92$ м)
Fig. 2. Comparison of actual and estimated deviations birch trunk ($d_0 = 25,4$ мм, $H = 3,92$ м)



Рис. 3. Влияние заделки на прогиб стволика березы ($d_0 = 25,4$ мм, $H = 3,92$ м)
Fig. 3. Effect of termination on the deflection of birch trunk ($d_0 = 25,4$ мм, $H = 3,92$ м)

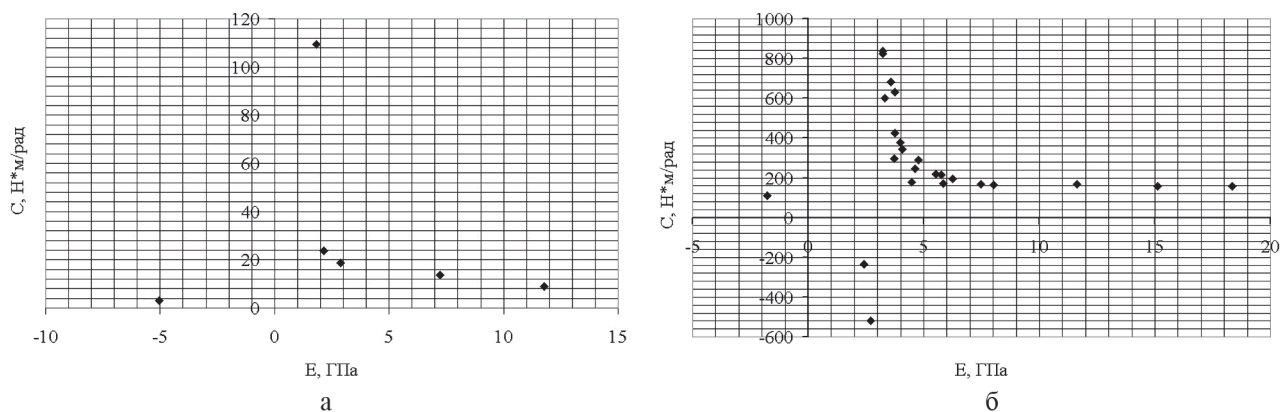


Рис. 4. Точечные диаграммы модуля упругости стволика и коэффициента жесткости корневой системы для березы
Fig. 4. Scatter diagram stalk modulus and stiffness coefficient of the root system of birch

Т а б л и ц а 1

Значения модулей упругости и коэффициентов жесткости для березы ($d_0 = 25,4$ мм, $H = 3,92$ м)

The values of the elastic modulus and hardness factors for birch ($d_0 = 25,4$ мм, $H = 3,92$ м)

Интервал Δh , м	0,2–0,4	0,2–0,6	0,2–0,8	0,2–1,0	0,2–1,2	0,2–1,4	0,2–1,6
E , ГПа	–1,76	18,33	15,11	8,01	7,48	5,73	4,47
C , Н·м	111,6	157,6	158,9	165,3	166,4	171,3	177,5
Интервал Δh , м	–	0,4–0,6	0,4–0,8	0,4–1,0	0,4–1,2	0,4–1,4	0,4–1,6
E , ГПа	–	1,62	2,97	3,22	3,75	3,57	3,22
C , Н·м	–	–662,5	1039,7	838,7	630,3	681,2	836,0
Интервал Δh , м	–	–	0,6–0,8	0,6–1,0	0,6–1,2	0,6–1,4	0,6–1,6
E , ГПа	–	–	11,63	5,51	5,76	4,61	3,73
C , Н·м	–	–	169,4	218,8	213,6	245,5	297,6
Интервал Δh , м	–	–	–	0,8–1,0	0,8–1,2	0,8–1,4	0,8–1,6
E , ГПа	–	–	–	3,75	4,76	3,98	3,32
C , Н·м	–	–	–	426,5	289,0	377,5	600,6
Интервал Δh , м	–	–	–	–	1,0–1,2	1,0–1,4	1,0–1,6
E , ГПа	–	–	–	–	6,25	4,08	3,22
C , Н·м	–	–	–	–	194,8	343,1	825,2
Интервал Δh , м	–	–	–	–	–	1,2–1,4	1,2–1,6
E , ГПа	–	–	–	–	–	3,13	2,69
C , Н·м	–	–	–	–	–	–5209,7	–519,1
Интервал Δh , м	–	–	–	–	–	–	1,4–1,6
E , ГПа	–	–	–	–	–	–	2,40
C , Н·м	–	–	–	–	–	–	–235,9
$E_{\text{ср.}} = 4,55$ ГПа, $C_{\text{ср.}} = 177$ Н·м/рад							

Т а б л и ц а 2

Значения модулей упругости и коэффициентов жесткости для березы ($d_0 = 12,0$ мм, $H = 1,31$ м)

The values of the elastic modulus and hardness factors for birch ($d_0 = 12,0$ мм, $H = 1,31$ м)

Интервал Δh , м	0,2–0,4	0,2–0,6	0,2–0,8
E , ГПа	2,89	2,15	7,22
C , Н·м	18,7	23,6	13,7
Интервал Δh , м	–	0,4–0,6	0,4–0,8
E , ГПа	–	1,83	11,78
C , Н·м	–	109,3	9,0
Интервал Δh , м	–	–	0,6–0,8
E , ГПа	–	–	–5,04
C , Н·м	–	–	3,2
$E_{\text{ср.}} = 3,47$ ГПа, $C_{\text{ср.}} = 29,6$ Н·м/рад			

Т а б л и ц а 3

Значения модулей упругости и коэффициентов жесткости для осины ($d_0 = 14,8$ мм, $H = 1,67$ м)

The values of the elastic modulus and hardness factors for Aspen ($d_0 = 14,8$ мм, $H = 1,67$ м)

Интервал Δh , м	0,2–0,4	0,2–0,6	0,2–0,8	0,2–1,0
E , ГПа	4,09	95,22	22,47	–29,52
C , Н·м	11,7	10,6	10,7	10,4
Интервал Δh , м	–	0,4–0,6	0,4–0,8	0,4–1,0
E , ГПа	–	–6,01	–52,91	–12,29
C , Н·м	–	8,2	9,2	8,7
Интервал Δh , м	–	–	0,6–0,8	0,6–1,0
E , ГПа	–	–	11,42	–11,68
C , Н·м	–	–	12,1	9,5
Интервал Δh , м	–	–	–	0,8–1,0
E , ГПа	–	–	–	–6,49
C , Н·м	–	–	–	7,0
$E_{\text{ср.}} = 4,09$ ГПа, $C_{\text{ср.}} = 11,7$ Н·м/рад				

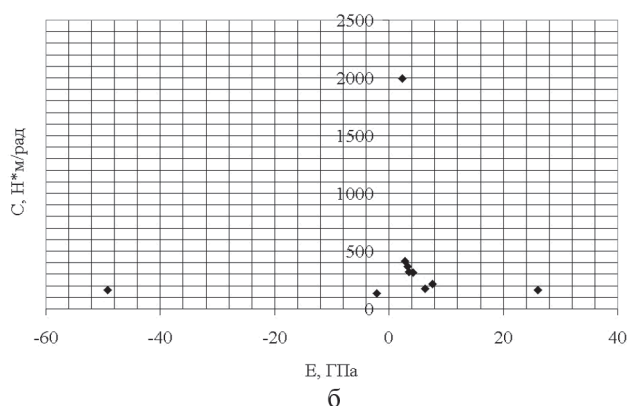
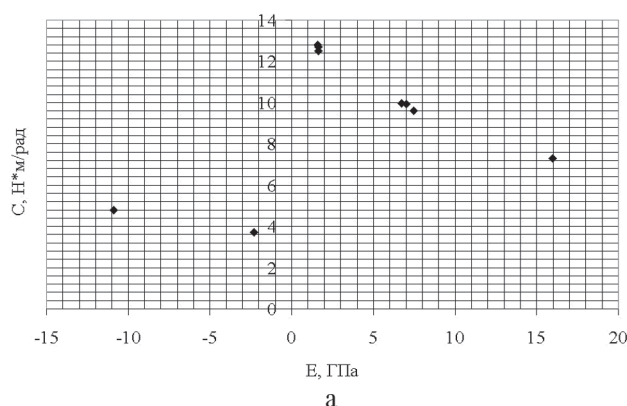


Рис. 5. Точечная диаграмма модуля упругости стволика и коэффициента жесткости корневой системы для осины ($d_0 = 24,5$ мм, $H = 1,41$ м)

Fig. 5. Scatter stalk modulus of elasticity and stiffness coefficient of the root system of the aspen ($d_0 = 24,5$ мм, $H = 1,41$ м)

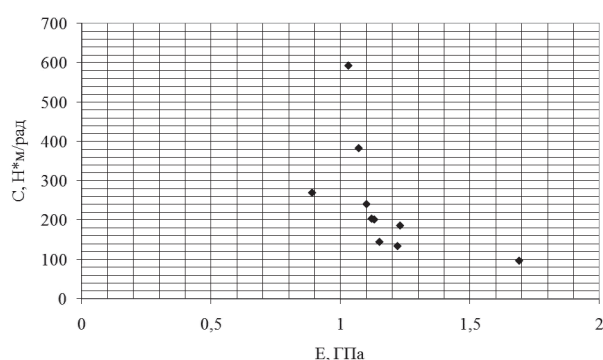


Рис. 6. Точечная диаграмма модуля упругости стволика и коэффициента жесткости корневой системы для ольхи

Fig. 6. Scatter modulus stalk stiffness coefficient of the root system for alder

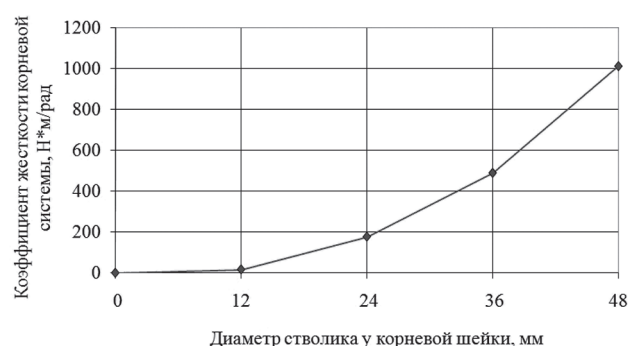


Рис. 7. Зависимость жесткости корневой системы березы от диаметра у корневой шейки

Fig. 7. Dependence of the hardness of birch root system of the diameter at the root collar

На основании полученных данных построены графики зависимости коэффициента жесткости корневой системы растения от диаметра стволика у корневой шейки. Пример графика представлен на рис. 7. Уравнения аппроксимации графика имеют вид для березы –

$$C = 0,576d_0^2 - 6,88d_0 + 5,99; R^2 = 0,9993;$$

для осины –

$$C = 0,426d_0^2 - 5,3d_0 + 10,0; R^2 = 1,0000.$$

Таким образом, установлено, что коэффициент жесткости корневой системы изменяется пропорционально квадрату диаметра стволика у корневой шейки.

В заключение необходимо заметить, что предложенный неразрушающий метод определения упругих свойств растущих древесных растений дает примерно такие же результаты, как и другие методы, и при этом

учитывает жесткость корневой системы при их статическом изгибе.

Библиографический список

1. Coder, Kim D. Root Strength & Tree Anchorage. University of Georgia Warnell School of Forestry & Natural Resources monograph publication, 2010, 88 p.
2. Dupuy L.; Fourcaud T. & Stokes A. A numerical investigation into the influence of soil type and root architecture on tree anchorage. Proceedings of the First International Conference on Eco-Engineering, 13–17 September 2004. Springer Verlag, 2007, pp. 175–189.
3. Horacek Petr. Introduction to Tree Statics & Static Assessment. Department of Wood Science, Faculty of Forestry and Wood Technology Mendel University of Agriculture and Forestry Brno, Czech Republic, 1995, 69 p.
4. Koizumi, A.; Hirai, T.; Ryu, K.; Nakahara, M.; Araya, K.; Shimizu, H.: Wind damage resistance of Robinia pseudoacacia planted on the roadsides, Res. Bull. Hokkaido Univ. For., 64(2), 2007, pp. 105–112. (in Japanese with English summary)
5. Lundstrom T. Mechanical stability and growth performance of trees. PhD thesis no. 1644, University of Fribourg, Switzerland, 2010, 142 p.

6. Sterken P. A Guide for Tree-Stability Analysis. Second and expanded edition, 2005, 64 p.
7. Беляев, Н.М. Сопротивление материалов / Н.М. Беляев. – М.: Наука, 1976. – 608 с.
8. Котов, А.А. Совершенствование технологий и создание средств механизации для химического ухода в лесных питомниках и культурах: монография / А.А. Котов. – М.: МГУЛ, 2008. – 314 с.
9. Иванов, Г.А. Изменение модуля упругости березы по высоте / Г.А. Иванов, А.А. Котов // Актуальные проблемы развития лесного комплекса: материалы международной научно-технической конференции, 8–10 декабря 2009 г. – Вологда, ВоГТУ, 2010. – С. 155–159.
10. Иванов, Г.А. Коэффициент жесткости корневой системы дерева при статическом изгибе / Г.А. Иванов, А.А. Котов // Вестник МГУЛ – Лесной вестник. – № 3. – 2011. – С. 98–102.
11. Пижурин, А.А. Исследования процессов деревообработки / А.А. Пижурин, М.С. Розенблит. – М.: Лесн. пром-сть, 1984. – 232 с.

NON-DESTROYING METHOD OF RESEARCH OF ELASTIC PROPERTIES OF TREES PLANTS

Kotov A.A., Prof. MSFU, Dr. Sci. (Tech.)⁽¹⁾

kotov@mgul.ac.ru

⁽¹⁾ Moscow State Forest University (MSFU), 1st Institutskaya st., 1, 141005, Mytishchi, Moscow reg., Russia

The mechanical property of unwanted woody vegetation directly affects the characteristics of working bodies of forestry vehicles. The study of these properties is a complex technical task. Often the problem statement is simplified, and many factors are not taken into account: the effect on the elastic properties of plants of the mechanical connection with the soil, the difference between the properties of growing plants from pre-cut ones, which leads to some errors. The mathematical model of a wood plant has been developed and the technique of the evaluation of the contribution of the root system and the soil, which provides elastic fastening, in the total rigidity of the plants in static bending. As an assumption the following facts were taken: trunks of plants have a shape similar to a cone with a small diameter at the base and a large height, laden with concentrated force and experiencing pure bending, the stiffness coefficient of the root system and the modulus of elasticity of the growing trunks are respectively constant at the rotational angle and height of the trunks. Dependences for the calculation of a full deviation of arbitrary point trunk a wood plant are established at a static bend due to deformation of a root system and ground and a deflection trunk under condition of absolutely anchorage. The analysis of these dependences has been executed. The system of the equations for the evaluation of elastic characteristics of a wood plant by non-destroying method has been received. Experimental acknowledgement of theoretical conclusions in the graphic form is submitted. Research has shown that the stiffness coefficient of the root system is proportional to the square of the diameter of the trunk at the root collar.

Key words: root system, trunk, a deflection, the module of elasticity, stiffness coefficient.

References

1. Coder Kim D. Root Strength & Tree Anchorage. University of Georgia Warnell School of Forestry & Natural Resources monograph publication, 2010, 88 p.
2. Dupuy L.; Fourcaud T. & Stokes A. A numerical investigation into the influence of soil type and root architecture on tree anchorage. Proceedings of the First International Conference on Eco-Engineering, 13–17 September 2004. Springer Verlag, 2007, pp. 175–189.
3. Horacek Petr. Introduction to Tree Statics & Static Assessment. Department of Wood Science, Faculty of Forestry and Wood Technology Mendel University of Agriculture and Forestry Brno, Czech Republic, 1995, 69 p.
4. Koizumi A.; Hirai T.; Ryu K.; Nakahara, M.; Araya, K.; Shimizu, H.: Wind damage resistance of Robinia pseudoacacia planted on the roadsides, Res. Bull. Hokkaido Univ. For., 64(2), 2007, pp. 105–112. (in Japanese with English summary)
5. Lundstrom T. Mechanical stability and growth performance of trees. PhD thesis no. 1644, University of Fribourg, Switzerland, 2010, 142 p.
6. Sterken P. A Guide for Tree-Stability Analysis. Second and expanded edition, 2005, 64 p.
7. Belyaev N.M. *Soprotivlenie materialov* [Resistance of materials]. Moscow, Nauka, 1976. 608 p.
8. Kotov A.A. *Sovershenstvovanie tehnologiy i sozдание sredstv mehanizatsii dlya himicheskogo uhoda v lesnykh pitomnikakh i kul'turah* [Perfection of technologies and creation of means of mechanization for chemical care in forest farm and cultures]. Moscow, MGUL, 2008. 314 p.
9. Ivanov G.A., Kotov A.A. *Izmenenie modulya uprugosti berezy po vysote* [Change of the module of elasticity of a birch on height]. Aktual'nye problemy razvitiya lesnogo kompleksa: materialy mezhdunarodnoy nauchno-tehnicheskoy konferencii, 8–10 dekabrya 2009 g. [Actual problems of development of a forest complex: materials of the international scientific and technical conference, on December, 8–10, 2009.]. Vologda, VoGTU, 2010, pp. 155–159.
10. Ivanov G.A., Kotov A.A. *Koeffitsient zhestkosti kornevoy sistemy dereva pri staticheskom izgibe* [Stiffness coefficient of root system of a tree at a static bend]. Moscow state forest university bulletin – Lesnoy vestnik. 2011, N. 3, pp. 98–102.
11. Pizhurin A.A., Rozenblit M.S. *Issledovaniya processov derevoobrabotki* [Researches of processes of woodworking]. Moscow: Lesn. prom-st', 1984. 232 p.