9. Bekhta P., Bits G. Modification of phenol-formaldehyde resins by aluminium containing compounds // Scientific works of the Forestry Academy of Sciences of Ukraine: collection of scientific works. 2008. Vol. 6. P. 155–158.
10. Пат. МПК B27D 1/04. Фанера. Патентообладатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Сибирский государственный технологический университет». Заявл. 05.07.2010. Опубл. 27.01.2012, Бюл. № 3.
11. Криворотова А. И., Ушанова В. М. Улучшение экологических свойств и качественныхxарактеристик фанерной продукции, с использованием клеевмодифицированных экстрактами коры хвойных // Хвойные бореальной зоны. 2014. XXXII. № 1-2. С. 52–55.
12. Mirski R., Łęcka J., Dziurka D. The effect of modification of phenolic resin with alkylresorcinols and H_2O_2 on properties of plywood // ActaScientiarum Polonorum Silvarum Colendarum Ratio et Industria Lignaria. 2009. Vol. 8, No. 4. PP. 67–74.
13. Bekhta P., Salim H., Potapova O., Sedliacik J. Shear Strength of Exterior Plywood Panels Pressed at Low Temperature // Materials. 2009. Vol. 2. P. 876–882.

УДК 630*812

А. А. Котов,
д.т.н., профессор кафедры ЛТ1, ФГБОУ ВО «Мытищинский филиал МГТУ им. Н. Э. Баумана», г. Мытищи, РФ,
kotov@mgul.ac.ru
А. Ф. Алябьев,
д. т. н., профессор кафедры ЛТ7, ФГБОУ ВО «Мытищинский филиал МГТУ им. Н. Э. Баумана», г. Мытищи, РФ,
alyabiev@mgul.ac.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ЖЕСТКОСТИ КОРНЕВОЙ СИСТЕМЫ БЕРЕЗЫ

При проектировании рабочих органов лесохозяйственных машин, таких как катки-осветлители, кусторезы и др., необходимо учитывать физико-механические свойства нежелательной древесной растительности. На практике часто не учитывается влияние на упругие свойства растений механической связи с почвой. В статье предложена методика определения вклада корневой системы и почвы в суммарную жесткость растения при статическом изгибе и установлены зависимости для определения полного отклонения произвольной точки стволика за счет деформации корней и прогиба стволика. Исследованиями установлено, что коэффициент жесткости корневой системы изменяется пропорционально квадрату диаметра стволика у корневой шейки.
Ключевые слова: *берёза, корневая система, стволик, прогиб, модуль упругости, коэффициент жёсткости.*

A. A. Kotov,
Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Forest Crops, Breeding and Dendrology, BMSTU (Mytishchi branch), Mytishchi, Moscow reg., Russia,
kotov@mgul.ac.ru
A. F. Alyabiev,
Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Transport and Technological means and equipment of the forest complex, BMSTU (Mytishchi branch), Mytishchi, Moscow reg., Russia,
alyabiev@mgul.ac.ru

RESEARCH OF THE RIGIDITY COEFFICIENT THE ROOT SYSTEM OF BIRCH

When designing the working bodies of forestry machines, such as rollers-clarifiers, brush cutters, etc., it is necessary to take into account the physical and mechanical properties of undesirable woody vegetation. In practice, the effect of mechanical connection with the soil on the elastic properties of plants is often not taken into account. The article proposes a method for determining the contribution of the root system and soil to the total stiffness of a plant under static bending and establishes dependences for determining the total deflection of an arbitrary point of the stem due to deformation of the roots and deflection of the stem. Studies have established that the coefficient of stiffness of the root system changes in proportion to the square of the stem diameter at the root collar.
Keywords: *birch tree, root system, stem, deflection, elastic modulus, modulus of elasticity, rigidity coefficient.*

Как показывает практика, к механическим свойствам древесных растений, учитываемым при конструировании лесохозяйственных машин, предназначенных для борьбы с нежелательной древесной растительностью, необходимо относить не только жесткость ствола, но и коэффициент жесткости корневой системы [1]. Целью статьи является исследование жесткости корней березы, которая является одной из наиболее распространенных нежелательных пород на возобновившихся вырубках центрального региона. До отмирания главного (стержневого) корня дерево растет медленно, затем корневая система начинает быстро развиваться за счет боковых корней, которые проникают в почву под углом 30–60 градусов. При этом ускоряется и рост дерева в целом [2]. Исследования проводились в Московской, Владимирской и Ярославской областях.

© Котов А. А., Алябьев А. Ф ., 2021

При изучении механической связи корней дерева с почвой растение представлялось состоящим из двух частей: корневой системы и ствола, жесткостные свойства которых определялись раздельно. Тогда полное отклонение x произвольной точки растения, к которой приложена изгибающая сила F, равнялось сумме x_1 и x_2, где x_1 – отклонение за счет деформации корневой части, x_2 – прогиб стволика при условии абсолютно жесткой заделки:

$$x = x_1 + x_2 . \tag{1}$$

Из условия равновесия

$$Fh = C\varphi ,$$

где h – высота приложения нагрузки, м;

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

φ – угол поворота оси стволика, рад.

Принимаем $\varphi = \dfrac{x_1}{h}$. Тогда

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

Для достижения поставленной цели на сплошных возобновившихся вырубках проведены в безветренную погоду опыты с березой высотой от 1,5 до 6,5 м. Вначале растение освобождалось от рядом расположенной растительности. Затем определялись биометрические показатели растения. Усилия замерялись динамометрами системы Токаря Н. Г. и Мегеон четвертой серии.

Исследование жесткости корней древесных растений выполняли тремя способами. При первом использовали статический и динамический методы. При статическом производили изгиб растения прикладываемой на разных высотах с шагом 0,2 м силой, фиксируя при этом его отклонение x. Затем растение срезалось, и вначале для целого стволика, а затем, после распиливания его на части, для каждой из них определялся модуль упругости E [3]. По формулам сопротивления материалов вычислялись прогибы x_2 стволика. Отклонение x_1 определялось как разница между x и x_2. Потом рассчитывался угол поворота стволика φ и коэффициент жесткости корней C. Результаты частично представлены на рис. 1.

Из графика видим, что при минимальной высоте приложения изгибающей силы наибольший вклад в отклонение стволика вносит жесткость корневой системы, а при максимальной – жесткость стволика.

При динамическом методе проведены экспериментальные исследования затухающих колебаний растений [4]. Фиксировалось отклонение вершины растения и соответствующий ему момент времени от начала колебаний.

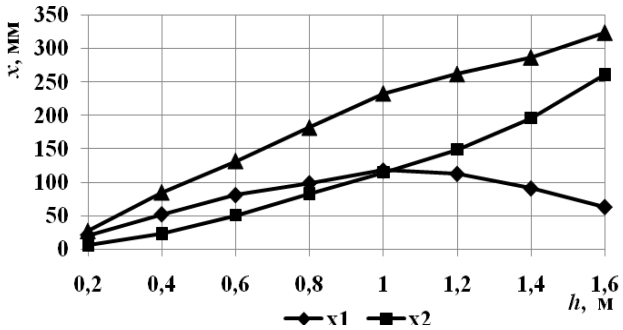

Рис. 1. Влияние корневой системы на отклонение стволика березы

В общем виде частоту произвольной формы колебаний конического стержня (стволика) можно определить по формуле:

$$f_n = \frac{a_n^2 r}{2\pi H^2}\sqrt{\frac{E}{\rho}} , \tag{3}$$

где a_n – постоянная, зависящая от формы стволика и формы колебаний;

r – радиус инерции поперечного сечения, расположенного в месте жесткой заделки;

H – длина конического стержня (высота стволика);

E – модуль упругости растущей древесины;

ρ – плотность растущей древесины.

Для основной формы колебаний $a_n = a_1 = 4{,}359$ [4]. При указанных условиях с помощью формулы (3) определялся модуль упругости E.

При втором способе определение модуля упругости E и коэффициента жесткости C выполнялось на растущих растениях приближенным способом [1].

Значения C и E определялись из выражений

$$C = \frac{k_{11}}{x' - \frac{k_{12}}{E}}, \tag{4}$$

$$E = \frac{k_{11}k_{22} - k_{21}k_{12}}{k_{11}x'' - k_{21}x'}, \tag{5}$$

где x' и x'' – соответственно отклонения точек стволика на высотах h' и h'',

$$k_{11} = F'(h')^2,\ k_{12} = \frac{F'(h')^3}{3J_0}\cdot\frac{H}{H-h'},\ k_{21} = F''(h'')^2,\ k_{22} = \frac{F''(h'')^3}{3J_0}\cdot\frac{H}{H-h''};$$

F' и F'' – соответственно изгибающие силы на высотах h' и h'';

J_0 – момент инерции сечения конуса у основания.

При третьем способе этапе стволик сжимался металлическими уголками [5, 6]. К нему прикладывались нагрузки в прямом и обратном направлениях. Фиксировались положения растения под нагрузкой и после ее снятия. Определялся угол φ отклонения оси стволика от исходного положения.

На основании полученных данных построен график зависимости коэффициента жесткости корневой системы березы (рис. 2). Уравнения аппроксимации графика имеют вид:

$$C = 0{,}589\,d_0^2 - 6{,}61 d_0 + 7{,}42\ ;\ R^2 = 0{,}93 \tag{6}$$

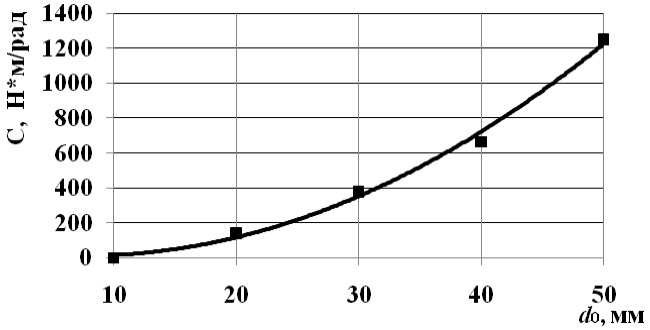

Рис. 2. Зависимость коэффициента жесткости корневой системы березы от диаметра у корневой шейки

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

Список литературы

1. Котов А. А. Неразрушающий метод исследования упругих свойств древесных растений // Лесной вестник. Forestry Bulletin. Т. 20. № 2. 2016. С. 91–97.
2. Корчагина И. А. Семейство берёзовые (Betulaceae) // Жизнь растений : в 6 т. / гл. ред. А. А. Фёдоров. М. : Просвещение, 1980. Т. 5. Ч. 1 : Цветковые растения / под ред. А. Л. Тахтаджяна. С. 311–324.
3. Котов А. А., Иванов Г. А. Теоретические и экспериментальные исследования изменения модуля упругости ствола растущей березы по высоте // Лесной вестник. ForestryBulletin. Т. 21. № 4. 2016. С. 47–52.
4. Котов А. А. Экспериментальные исследования параметров колебаний древесных растений // Вестник Московского государственного университета леса – Лесной вестник. № 5. 2013. С. 196–199.
5. Иванов Г. А., Котов А. А. Коэффициент жесткости корневой системы дерева при статическом изгибе // Вестник Московского государственного университета леса – Лесной вестник. № 3. 2011. С. 98–102.
6. Котов А. А. Упругие и остаточные деформации древесных растений при статическом изгибе // Вестник Московского государственного университета леса – Лесной вестник. № 2. 2014. С. 47–53.