ПОВНОДЕРЕВНІСТЬ ТА ОБ'ЄМ СТОВБУРІВ ДЕРЕВ ГІРКОКАШТАНА ЗВИЧАЙНОГО У НАСАДЖЕННЯХ МІСТА КИЄВА

О. М. ЛЕСНИК, кандидат сільськогосподарських наук,
<https://orcid.org/0000-0002-4287-3454>, e-mail: lesnik@nubip.edu.ua
Національний університет біоресурсів і природокористування України

Міські зелені насадження зазнають впливу урбанізованого середовища, що негативно позначається на життєдіяльності рослин. Ріст зелених насаджень на урбанізованих територіях суттєво відрізняється від лісових. Дослідний матеріал відбирали у зелених насадженнях міста Києва під час виконання доглядових рубань. Наведено особливості методичного підходу для проведення замірів основних біометричних параметрів дерев в умовах урбанізованого середовища. Слід зазначити, що гіркокаштан звичайний має певну морфологічну особливість, яка полягає в тому, що на певній висоті стовбур дерева має розгалуження, переважно у вигляді 2-3 скелетних гілок.

Під час моделювання об'єму дерев найбільше значення має встановлення форми математичного зв'язку видових чисел з основними біометричними параметрами дерева. Розраховано статистики основних морфолого-таксаційних показників дерев гіркокаштана звичайного. Визначено, що відсоток об'єму стовбура дерева зменшується зі збільшенням діаметра дерева, і у дерев понад 60 см може становити до 30 % від загального об'єму дерева. На основі кореляційного аналізу модельних дерев встановлено, що видове число стовбура дерев має найтісніший зв'язок із висотою розгалуження стовбура дерева. На основі статистичного аналізу виявлено, що розроблена математична модель адекватна дослідним даним і відповідає основним вимогам щодо точності моделювання відповідних лісотаксаційних нормативів. Встановлено, що систематична помилка розробленої математичної моделі видового числа, оцінена за t -критерієм Стьюдента, не є значущою (тобч < $t_{крит}$).

На основі розробленої математичної моделі видових чисел стовбурів дерев було побудовано таблиці для визначення об'єму стовбурів дерев гіркокаштана звичайного, в основі яких лежить класична формула лісової таксації. Опрацьовано об'ємні таблиці, що розроблені з урахуванням фізіологічних особливостей зростання дерев гіркокаштана звичайного в умовах урбанізованого середовища та можуть бути застосовані у виробничій діяльності підприємств із утримання зелених насаджень міст і населених пунктів.

Ключові слова: діаметр, висота, об'єм стовбура, математична модель, видове число.

Актуальність. Сучасна урбанізація є одним із найважливіших факторів техногенного впливу на природне середовище, що погіршує його стан у містах та інших населених пунктах. Умови росту зелених насаджень на урбанізованих територіях суттєво відрізняються від природних, що позначається на життєдіяльності рослин.

У сучасних умовах багатогалузевого господарства України, проблема послідовного дотримання принципу неперервного і невиснажливого використання природних ресурсів визначає необхідність системного підходу до наукового обґрунтування комплексу питань, пов'язаних з оптимізацією процесів лісовирощування, збагачення біорізноманіття та посилення соціально-екологічної ролі природних екосистем, визначення параметрів раціонального лісокористування, покращення методичного та інформаційного забезпечення обліку деревної рослинності.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Під час дослідження міських екосистем дедалі частіше приділяють увагу вивченню особливостей формування біометричних показників дерев в урбанізованому середовищі, які безпосередньо впливають на формування об'єму дерев і його складових (Pillsbury et al., 1998; Myroniuk, 2006; Troxel et al., 2013; Pretzsch et al., 2015; McPherson et al., 2016; Lesnik, 2016, 2017).

При дослідженні об'єму дерев гіркокаштана звичайного в попередніх публікаціях (Lesnik, 2016, 2017) було використано методичний підхід, започаткований В. В. Мироном (Myroniuk, 2006), у результаті чого було отримано такі результати:

- видове число дерев, у яких немає центрального стовбура дерева на всю висоту дерева, зростає зі збільшенням діаметра дерева;

- зі збільшенням діаметра дерева збільшується об'єм крони і у великомірних дерев може сягати до 70 %;
- розмірно-якісна структура дерев в умовах міста має значно гірші показники порівняно з лісовим середовищем.

Слід зазначити, що у проведених дослідженнях (Myroniuk, 2006; Lesnik, 2016, 2017) в основі визначення об'єму лежить класична формула лісової таксації, де об'єм дерева (V_d) визначають як добуток трьох об'ємів факторів – площі поперечного перерізу (g), висоти (h) та видового числа дерева (f):

$$V_d = ghf; \quad (1)$$

об'єм стовбура ($V_{ст}$):

$$V_{ст} = V_d \cdot P_{ст}; \quad (2)$$

об'єм крони ($V_{кр}$):

$$V_{кр} = V_d - V_{ст}. \quad (3)$$

де $P_{ст}$ – відсоток об'єму стовбура дерева.

Об'єм дерев визначали шляхом їх звалювання, що є доволі трудомістким процесом. Спосіб визначення об'єму дерев, який пропонують інші науковці для насаджень міст (Pillsbury et al., 1998), є менш трудомістким, без зрізання, а з використанням спеціальних приладів, одним із яких є реласкоп. Методично передбачено визначення діаметра у верху та низу секцій, на які розділене дерево. Об'єм кожної секції за цим способом обчислюють за формулою Смаліана так:

$$V = L \frac{A_u + A_b}{2}, \quad (4)$$

де L – довжина секції;

A_u – площа поперечного перерізу у нижній частині секції;

A_b – площа поперечного перерізу у верхній частині секції.

На основі встановлених об'ємів секцій визначають об'єм дерева у цілому. Об'єм дерев моделюють пере-

важно за допомогою степеневого рівняння на основі діаметра дерева або ж діаметра та висоти дерева.

Фінським ученим удалось проаналізувати та узагальнити наукові напрацювання щодо питання визначення об'єму стовбурів дерев у різних європейських країнах (Zianis et al., 2005). Автори навели 230 математичних моделей для визначення цього таксаційного показника. Потрібно зазначити, що найчастіше, у цих математичних моделях, для визначення об'єму стовбурів дерев використовують діаметр і висоту дерева, рідше – значення верхнього діаметра та показники форми.

У цій публікації заплановано провести дослідження повнодеревності стовбурів дерев гіркокаштана звичайного за методикою, реалізованою у чинних нормативах (Nikitin, 1984). Сутність цієї методики полягає у тому, що об'єм стовбурів дерев визначають за класичною формулою лісової таксації, де показник видового числа обчислюють шляхом математичного моделювання (Svynchuk et al., 2014; Myroniuk et al., 2019).

Мета дослідження – розроблення аналітичної моделі визначення видового числа стовбура дерев гіркокаштана звичайного в зелених насадженнях міста Києва та побудова об'ємних таблиць.

Матеріали і методика дослідження. Збирання дослідного матеріалу проводили під час догляду за зеленими насадженнями м. Києва. Методика досліджень базується на використанні сучасних методів збирання та оброблення лісотаксаційної інформації з використанням комп'ютерних технологій, аналізу результатів досліджень, методів математичної статистики та кореляційного аналізу.

В основі отримання первинної лісівничої інформації зазвичай лежить процес вимірювання. Збирання первинної інформації проводили з урахуванням специфіки об'єкта дослідження. Зазначимо, що отримання лісотаксаційної інформації шляхом спостережень і вимірювань таксаційних ознак супроводжується ретельним виявленням притаманних їм закономірностей, взаємозв'язків і взаємозалежностей. В основі отримання первинної числової інформації, яка необхідна для встановлення об'єму деревини, лежить безпосередній обмір біометричних параметрів модельних дерев.

Методика збирання первинної лісівничої інформації передбачала:

- для обміру відбирали лише «ділові» модельні дерева із зазначенням категорії зелених насаджень, до яких вони належать;
- на дереві, що росло, вимірювали: діаметр на комлевому зрізі та висоті 1,3 м від рівня земної поверхні, проекцію крони у двох взаємно перпендикулярних напрямках і висоту розгалуження стовбура;
- після звалювання дерева вимірювали висоту пня;
- на зрубаному дереві визначали діаметр у корі й товщину кори у комлевому зрізі, на висоті 1,3 м, на середині кожної секції;
- вимірювали діаметр у корі й товщину кори для гілок діаметром більше ніж 3 см у верхньому відрізі на середині кожної секції.

Потрібно зауважити, що відбір модельних дерев відбувався після безпосереднього їх огляду. Дерев, які не мали ознак ослаблення та пошкодження, а саме суховершинності, ознак кронування, гнилей, із добре розвинутою кроною приймали як «ділові».

Валка дерев в умовах міської за-
будови є досить трудомісткою, її про-
водять за допомогою телескопічного
підйомника частинами, отже, довжи-
на секції не була сталою, а знаходи-
лась в межах 0,5–2 м.

Об'єм секцій стовбура обчислю-
вали за допомогою простої формули
серединних перерізів:

$$V_{cm} = \sum_{i=1}^k l_i \cdot \gamma_i, \quad (5)$$

де l_i – довжина секції, м;
 γ_i – площа поперечного перерізу
на середині i -ї секції ($i=1, k$), м².

Сучасні методи збирання та обро-
блення експериментальних матеріалів
будуються на основі наявних зако-
номірностей зв'язку між основними
таксаційними показниками. Вивчення
причиново-наслідкових взаємозв'язків
є обов'язковою передумовою моделю-
вання, позаяк більшість математичних
моделей, які використовують у лісів-
ничій науці, побудовані на поняттях
залежності між певними величинами.

**Результати дослідження та їх обго-
ворення.** Для характеристики дослідно-
го матеріалу здійснено його статистичне
опрацювання, у результаті чого було отри-
мано такі статистичні показники для всієї
сукупності модельних дерев: середнє
арифметичне значення – $\bar{X}$, середнє ква-
дратичне відхилення – σ , A – асиметрія,
 E – ексцес, мінімальне – $\min$ та макси-
мальне – $\max$ значення, коефіцієнт мін-
ливості – V , значення яких наведено
у табл. 1.

1. Статистики основних морфолого-таксаційних показників дерев гіркогоштаня звичайного

Показник	$\bar{X}$	σ	$\min$	$\max$	A	E	(V) , %
Діаметр дерева ($d_{1,3}$), см	38,9	11,6	17,3	66,7	0,40	-0,38	29,8
Висота дерева (h), м	14,1	4,3	6,8	21,7	0,16	-1,30	30,5
Висота розгалуження (h_p), м	2,5	0,86	1,4	7,7	2,92	14,50	34,7
Об'єм стовбура (V_{cm}), м ³	0,302	0,304	0,061	1,556	2,71	8,35	100,5

На основі масиву дослідних да-
них було обчислено середні значення
відсотка об'єму стовбурів дерев гірко-
каштана звичайного, згруповані за сту-
пенями товщини, які наведено на рис. 1.

Дерева, які зростають у зелених
насадженнях міст та інших населе-
них пунктів, мають потужнішу крону,
на відміну від лісових насаджень. Як
видно з даних, наведених на рис. 1, зі
збільшенням діаметра дерева частка
об'єму стовбура залежно від об'єму
дерева зменшується.

Першим етапом моделювання
повнодеревності стовбурів дерев є
визначення тісноти зв'язку морфоло-
го-таксаційних показників, результа-
ти якого наведено в табл. 2.

З табл. 2 видно, що старе видове
число, в умовах урбанізованого сере-
довища, залежить від висоти розга-
лушення стовбура дерева.

Подальші дослідження пов'язані
з вивченням повнодеревності стов-
бурів дерев гіркогоштаня звичайного
в урбанізованих умовах. На основі
проведеного кореляційного аналізу
встановлено, що найтісніший зв'язок
старого видового числа (f_{ct}) наявний
із висотою розгалуження стовбура де-
рева (h_d). У результаті багатоваріант-
ного пошуку отримано математичну
модель, яка набула такого вигляду:

$$f_{cm} = 0,812 + \frac{0,500}{h_p}. \quad (6)$$

На рис. 2 графічно зображено ма-
тематичну модель зміни старого ви-

Рис. 1. Зміна об'єму стовбура дерева гіркокаштана звичайного залежно від діаметра

дового числа (f_{cm}) залежно від висоти розгалуження стовбура дерева.

Як видно з рис. 2, показник повнодеревності зменшується зі збільшенням висоти розгалуження та на висоті 2,6 м набуває значення «1,0», що відповідає класичним уявленням про зміну цього показника (Anuchin, 1982). Треба зазначити, що гіркокаштан звичайний рідко формує центральний стовбур на всю протяжність дерева, а має розгалуження у межах 1,5–4 метри, рідко трапляються розгалуження на 5 м і вище (Lesnik, 2017).

Із метою визначення точності розробленої математичної моделі видово-

го числа стовбура дерев гіркокаштана звичайного, було розраховано значення її систематичної помилки (m) та середньоквадратичного відхилення (σ):

$$m = \sum_{i=1}^n \delta_i / n, \quad (7)$$

де δ_i – величина відхилення i -го спостереження у відсотках;

n – кількість спостережень.

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^n (\delta_i - m)^2 / (n - 1)}. \quad (8)$$

Розраховані відхилення систематичної помилки та середньоквадратичного відхилення відповідно становлять 2,62 % і 9,35 %.

2. Парні коефіцієнти кореляції таксаційних показників дерева

Показники	$d_{1.3}$	h	h_p	f_{cm}
Діаметр дерева ($d_{1.3}$), см	1			
Висота дерева (h), м	0,83	1		
Висота розгалуження (h_p)	0,36	0,58	1	
Видове число стовбура дерева (f_{cm})	0,11	0,03	-0,52	1

Рис. 2. Повнодеревність стовбурів дерев гіркогоаштана звичайного

Значущість систематичної помилки було оцінено за t-критерієм Стюдента:

$$t = \frac{m \cdot \sqrt{n}}{\sigma}. \quad (9)$$

У результаті проведених розрахунків встановлено, що на 5-відсотковому рівні помилка не є значущою, оскільки $t_{\text{обч}} < t_{\text{крит}}$ ($t_{\text{обч}} = 1,79$, $t_{\text{крит}} = 2,02$).

Також проводили перевірку адекватності (Θ) розробленої математичної моделі дослідним даним, яку визначали так:

$$\Theta = 1 - \frac{(\sum y - \bar{Y})^2}{(\sum y - \bar{Y})^2}, \quad (10)$$

де, Θ – адекватність моделі;
 y – фактичні значення величини;
 $\bar{Y}$ – модельні значення величини;
 $\bar{Y}$ – середнє арифметичне значення величини.

Встановлено, що адекватність розробленої математичної моделі дослідним даним становить 0,41, відповідно, модель адекватно описує зада-

ну закономірність між фактичними і змодельованими значеннями.

Для побудови об'ємних таблиць стовбурів дерев використано класичну формулу лісової таксації, згідно з якою об'єм визначають як добуток трьох об'ємотвірних факторів: площі поперечного перерізу (g), висоти розгалуження стовбура дерева (h_d) та видового числа стовбура дерева ($f_{\text{ст}}$):

$$V_{\text{см}} = \left(\frac{\pi}{4} \cdot d^2 \cdot h_p \cdot \left(0,812 + \frac{0,500}{h_p} \right) \right) \cdot 10^{-4}. \quad (11)$$

Відповідно, використавши рівняння 11, було побудовано таблиці визначення об'єму стовбурів дерев гіркогоаштана звичайного (табл. 3).

Отримані таблиці визначення об'єму стовбурів дерев гіркогоаштана звичайного є досить простими у використанні, не мають аналогів та можуть застосовуватись у виробничій діяльності підприємств із догляду за зеленими насадженнями міст і населених пунктів.

3. Об'єм стовбурів дерев гіркогоаштана звичайного (фрагмент таблиці), м³

Діаметр, см	Висота розгалуження стовбура дерева, м							
	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5
12	0,019	0,024	0,029	0,033	0,038	0,042	0,047	0,052
16	0,035	0,043	0,051	0,059	0,067	0,075	0,084	0,092
20	0,054	0,067	0,079	0,092	0,105	0,118	0,131	0,143
24	0,078	0,096	0,114	0,133	0,151	0,170	0,188	0,206
28	0,106	0,131	0,156	0,181	0,206	0,231	0,256	0,281
32	0,138	0,171	0,203	0,236	0,269	0,301	0,334	0,367
36	0,175	0,216	0,258	0,299	0,340	0,381	0,423	0,464
40	0,216	0,267	0,318	0,369	0,420	0,471	0,522	0,573
44	0,261	0,323	0,385	0,446	0,508	0,570	0,632	0,693
48	0,311	0,384	0,458	0,531	0,605	0,678	0,752	0,825
52	0,365	0,451	0,537	0,624	0,710	0,796	0,882	0,968
56	0,423	0,523	0,623	0,723	0,823	0,923	1,023	1,123
60	0,486	0,601	0,715	0,830	0,945	1,060	1,175	1,289
64	0,553	0,683	0,814	0,945	1,075	1,206	1,336	1,467

Висновки і перспективи. У результаті проведеного кореляційного аналізу встановлено, що взаємозв'язок видового числа стовбурів дерев гіркогоаштана звичайного з таксаційними показниками дерева найбільшою мірою зумовлений впливом висоти розгалуження стовбура дерева. За даними виконаних досліджень обґрунтовано параметри математичної моделі видового числа стовбура дерев гіркогоаштана звичайного. Відповідно перевірка розробленої математичної моделі статистичним шляхом із використанням відповідних критеріїв засвідчила її адекватність і незначущість систематичної помилки. Побудовано нормативи визначення об'єму стовбурів дерев гіркогоаштана звичайного, входами до яких є діаметр дерева у корі на висоті 1,3 м та висота розгалуження стовбура дерева.

Список літератури

- Anuchin, N. P. (1982). *Forest taxation*. Moscow: Lesnaya promishlenost [in Russian].
- Lesnik, O. M. (2016). Correlations between Crown Parameters and Other Taxation Characteristics of *Aesculus Hippocastanum* Trees in Urban Greenery of Kyiv. *Scientific Bulletin of UNFU*, 26.7, 106–111. <https://doi.org/10.15421/40260716> [in Ukrainian].
- Lesnik, O. M. (2017). *Form Factor and Size-Quality Structure of Aesculus Hippocastanum Trees in Stands of Kyiv City*. Kyiv, 163 [in Ukrainian].
- McPherson, E. G., van Doorn, N. S., & Peper, P. J. (2016). Urban Tree Database and Allometric Equations. Gen. Tech. Rep. PSW-GTR-235. Albany, CA: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Southwest Research Station. <http://dx.doi.org/10.2737/RDS-2016-0005>
- Myroniuk, V. V. (2006). Standards for Evaluation of Volume and Assortment Structure of Maple Trees in the Urban Area of Kyiv. *Scientific Bulletin of Agricultural Education and Science*, 7 (3–4), 108–113 [in Ukrainian].
- Myroniuk, V. V., Svychnuk, V. A., Bilous, A. M., & Vasylyshyn, R. D. (2019). *Forest Mensuration: Textbook*. Comprint [in Ukrainian].

- Nikitin, K. E., (1984). *Quality List for the Taxation of the Growing Forest*. Urozhay [in Russian].
- Pillsbury, N. H., Reimer, J. L., & Thompson, R. P. (1998). Tree volume equations for fifteen urban species in California. Tech. Rep. 7, Urban Forest Ecosystems Institute, California Polytechnic State University, San Luis Obispo, CA.
- Pretzsch, H., et al. (2015). Crown size and growing space requirement of common tree species in urban centres, parks, and forests. *Urban For. Urban Green.* 14, 466–479. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2015.04.006>
- Svynchuk, V. A., Kashpor, S. M., & Myronyuk, V. V. (2014). Mathematical models of the volume the main forest species of Ukraine. *Scientific Bulletin of NULES of Ukraine*, 198 (2), 58–64 [in Ukrainian].
- Troxel, B., et al. (2013). Relationships between bole and crown size for young urban trees in the northeastern USA. *Urban Forestry & Urban Greening*, 12 (2). <http://dx.doi.org/10.1016/j.ufug.2013.02.006>
- Zianis, D., Muukkonen, P., Makipaa, R., & Mencuccini, M. (2005). Biomass and stem volume equations for tree species in Europe. *Silva Fennica Monographs*, 4, 1–63.

Lesnik, O. M. (2020). Stacked-timber ratio and stem volume of horse chestnut trees within Kyiv City urban stands. *Ukrainian Journal of Forest and Wood Science*, 11 (2), 32–39. <https://doi.org/10.31548/forest2020.02.032>.

Urban forest are influenced by urban environment, what has a negative effect on the vital activities of the trees. Growth environment of trees on urban territories and in natural areas are completely different. Research data was collected in urban forest stands of Kyiv city during thinnings. Special methodological characteristics of the measuring of main biometrical tree parameters in urban area are explained in this work. Importantly, chestnut trees have morphological feature which stems are branching on the certain height leading to occurrence of the several main branches.

Modelling tree stem volume, the most important pattern to find was a mathematical dependence of form factors on the main tree biometrical parameters. Basic descriptive statistics of chestnut trees parameters were estimated. It is defined that the percentage of trunk volume decreases with an increase of tree diameter and in trees over 60 cm can make up to 30% of the total tree volume. Carrying out a correlation analysis of model trees, it was examined that form factors of tree stems were highly linked to the branching height. Based on the statistical analysis it was estimated that developed mathematical model reflected empirical data adequately and could be validated according to the current forest mensuration accuracy requirements properly. Moreover, a bias of the developed form factor model examined using Student t-criteria is not significant.

Respective information-support tables to estimate stem volume of chestnut trees were created based on the developed form factor model, harnessing the classical formula of forest mensuration. Given stem volume tables created considering physiological features of chestnut trees under urban environment conditions can be utilized by the organizations which manage forest stands and parks within settlements.

Keywords: diameter, height, the volume of the stem, mathematical model, form factor.

Отримано: 2020-03-18