

деревьев по диаметру в искусственных сосновых древостоях Полесского природного заповедника Житомирской области Украины. Определены особенности таксационного строения этих древостоев по сравнению с насаждениями, в которых более интенсивно ведется лесное хозяйство.

Таксационное строение, показатель изменчивости, редуccionное число, ранг, показатели асимметрии и эксцесса.

Taxation structure peculiarities of artificial pine stands in comparison with natural vegetation are pointed. Explicated investigation results of the distribution of trees diameters in artificial pine stands of protected forests the Central Polissya of Ukraine. The features of space-parametric structure of stands in comparison with plantations abroad of the protected forests are defined.

Taxation structure, rate of variation, rank, reduction number, asymmetry and kurtosis.

УДК 630*5: 519.876.5 (477)

МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ОБ'ЄМУ ДЕРЕВНИХ СТОВБУРІВ ОСНОВНИХ ЛІСОУТВОРЮВАЛЬНИХ ПОРІД УКРАЇНИ

***В.А. Свинчук, С.М. Кашпор, В.В. Миронюк, кандидати
сільськогосподарських наук***

Проаналізовано основні методи таксації об'єму стовбурів дерев в Україні та за кордоном. Обґрунтовано параметри математичних моделей повнодеревності стовбурів з урахуванням розмірів дерев та віку деревостанів. Розроблено нормативи об'єму стовбурів для основних лісоутворювальних деревних порід України.

Діаметр, висота, видове число, модель, об'єм, нормативи.

З метою вирішення різноманітних лісооблікових задач у лісівничій науці і практиці широко використовуються таблиці об'єму деревних стовбурів. Історія використання таких нормативів налічує вже понад 200 років, зокрема одними з перших були масові таблиці, опубліковані німецьким лісівником Гартігом ще в 1804 році [1]. Згодом (1846) було опубліковано баварські масові таблиці, а в 1886 році – російські тимчасові таблиці. Крім того, варто відзначити безпрецедентні за обсягом зібраного матеріалу дослідження, виконані на початку XX століття під керівництвом відомого вченого-лісівника А. Крюденера [2], та роботи проф. М.М. Орлова, зокрема довідник «Лесная вспомогательная книжка для таксации и технических расчетов», який до 1931 р. витримав 8 видань [7]. У 30-х рр. XX ст. було розроблено масові таблиці Союзліспрому [1], які у складі довідника «Лесная вспомогательная книжка» [9]

широко застосовувалися в Україні аж до опублікування в 1987 році нормативно-інформаційного видання «Нормативно-справочные материалы для таксации лесов Украины и Молдавии» [4], котре до останнього часу мало статус офіційного лісотаксаційного довідника.

Впродовж останнього часу кафедрою лісової таксації та лісовпорядкування НУБіП України було виконано низку наукових досліджень, пов'язаних із розробленням нових та удосконаленням чинних нормативів об'єму стовбурів хвойних і листяних деревних порід на основі сучасних комп'ютерних технологій, з урахуванням вікової структури деревостанів, мінливості розмірів дерев та інших факторів [5, 6].

Серед сучасних наукових робіт, у яких узагальнено досвід визначення об'єму дерев, варто відзначити монографію колективу фінських учених [15]. У ній виконано аналіз численних наукових публікацій та наведено понад 230 математичних моделей для визначення об'єму стовбурів основних деревних видів Європи. Одержані результати вказують на існування значних регіональних відмінностей у формі та повнодеревності стовбурів дерев. Особливо відчутними вони є для деревних видів із сильно розгалуженою кроною, наприклад бука, тоді як для стовбурів сосни відмінності значно менші. Зокрема встановлено, що математична модель об'єму стовбурів сосни, опрацьована для умов Німеччини [13], цілком придатна для таксації пристиглих і стиглих деревостанів зазначеної деревної породи на території України. Так, для дерев завтовшки 16 см і більше розбіжності, як правило, не перевищують $\pm 2\%$.

Огляд іноземних джерел [14, 15] свідчить, що аргументами в математичних моделях об'єму дерев найчастіше використовуються такі показники, як діаметр на висоті груди, висота стовбура, висота до певного фіксованого значення діаметра (верхнього діаметра), а також відповідні показники форми деревного стовбура. Традиційно моделі дозволяють оцінювати об'єм частини стовбура до задекларованого значення верхнього діаметра, що передбачено чинними за кордоном вимогами стосовно таксації деревного запасу. Проте у зв'язку з постійною зміною економічних умов та технологічних процесів деревообробки, дедалі більша увага звертається на необхідність опрацювання гнучкіших математичних моделей, здатних спрогнозувати вихід ділової деревини за різної величини верхнього діаметра сортиментів. Раніше ця проблема вирішувалася розробленням окремих регресійних рівнянь залежно від величини верхнього діаметра. Нині така задача розв'язується переважно на основі аналізу твірної деревного стовбура. Цей підхід став основним у теорії таксації об'єму дерев, що ростуть, у США та Великобританії [10, 12]. Так, науковцями Лісової служби США було розроблено математичні моделі твірних стовбурів для 48 деревних видів, які зростають на території південних штатів [11]. Вони дозволяють встановлювати діаметр стовбура на будь-якій висоті, довжину частини стовбура до певного фіксованого значення діаметра, а також обчислювати об'єм стовбура та окремих його частин.

Мета досліджень – розроблення математичних моделей повнодеревності стовбурів основних лісоутворювальних деревних порід

України, опрацювання відповідних нормативів їхнього об'єму та оцінка їхньої точності.

Матеріали та методика досліджень. У практиці лісової таксації відомо декілька методичних підходів до моделювання об'єму стовбурів (V) дерев, зокрема шляхом побудови багатомірних моделей ($V = \psi(d, h, \dots)$), використання твірної деревного стовбура та застосування спеціальних коефіцієнтів – показників форми і повнодеревності.

Багатомірні математичні моделі об'єму стовбурів дерев залежно від їх діаметра та висоти досить часто використовуються у лісотаксаційній науці як в Україні, так і за кордоном [15]. Обґрунтування параметрів таких рівнянь за сучасного розвитку комп'ютерних технологій не є складним завданням. Однак отримання адекватних математичних моделей можливо за умови забезпечення нормальності розподілу всіх факторів, що зумовлюють величину та мінливість об'єму стовбурів, під час спільної обробки масивів даних.

Моделювання об'єму з використанням твірної деревного стовбура, як уже зазначалося, в сучасних умовах є поширеним методом у США та країнах Європи. В Україні під час розроблення нормативів об'єму деревних стовбурів застосовується переважно інший підхід, пов'язаний з використанням класичної формули лісової таксації. Об'єм стовбура при цьому розглядається як добуток трьох факторів, з яких два – діаметр (d) і висота (h) легко визначаються в практичних умовах інструментальним шляхом, а третій – видове число (f) або показник повнодеревності є по суті перевідним коефіцієнтом. Відповідно, для опрацювання математичних моделей об'єму стовбурів різних деревних порід України вивчалися закономірності зміни видових чисел.

Ідею застосування видового числа як показника, що дає уявлення про форму стовбура та є відношенням об'єму стовбура до об'єму "еталонного циліндра", ще на початку XIX століття запропонував німецький учений-лісівник Паульзен [1]. Найбільшого практичного застосування при цьому отримало старе видове число, для розрахунку якого використовується діаметр стовбура на висоті 1,3 м.

У лісовій таксації відомо, що повнодеревність стовбурів дерев залежить від багатьох факторів, зокрема їх висоти, діаметра, віку тощо [1]. Тому в роботі вивчалися закономірності зміни видових чисел залежно від двох факторів – діаметра і висоти в межах різних вікових груп. Доцільність поділу на вікові категорії була обґрунтована попередніми дослідженнями [5, 8].

Вихідними даними для розроблення математичних моделей повнодеревності стовбурів дерев є матеріали з бази науково-дослідних даних кафедри лісової таксації та лісовпорядкування НУБіП України. Всього було використано близько 18 тис. модельних дерев 10-ти основних деревних порід України.

Результати досліджень. Математичні моделі видового числа певних деревних порід частково було наведено у роботах [5, 8]. Моделі показника повнодеревності для основних лісоутворювальних деревних

порід України, покладені в основу розроблення чинних нормативів об'єму стовбурів [3], можна відобразити такими формулами:

молодняки та середньовікові деревостани

сосна

$$f = 0,576 + 9,06 \cdot h^{-2,21} - 0,0195 \cdot d^{0,545} \quad (1)$$

ялина

$$f = 0,521 + 0,00430 \cdot h + 0,302 / (h - 3,23) - 0,0104 \cdot d^{0,811} \quad (2)$$

ялиця

$$f = 0,588 - 0,00286 \cdot d + 0,0628 / (d - 3,66) \quad (3)$$

дуб

$$f = h^{0,0957} \cdot \exp(-1,08 + 0,972 / d + 1,80 / h - 0,00230 \cdot d) \quad (4)$$

ясен

$$f = 0,435 + 0,695 \cdot d^{-0,950} \quad (5)$$

бук

$$f = 0,541 + 1,57 / d^2 + 6,96 / h^2 - 3,91 / (d \cdot h) - 0,0784 \cdot d / h \quad (6)$$

граб

$$f = 0,371 + 1,95 / (d + 4,58) \quad (7)$$

осика

$$f = -0,105 + 0,701 \cdot d^{-0,0581} \quad (8)$$

береза

$$f = 0,654 - 0,0400 \cdot d^{0,538} \quad (9)$$

вільха

$$f = 1,677 \cdot d^{-0,0991} \cdot h^{-0,558} \cdot \exp(0,0362 \cdot h) \quad (10)$$

пристигли, стиглі та перестійні деревостани

сосна

$$f = 10^{-3} \cdot \exp[7,767 - 0,04235 \cdot \ln(d + 8) - 0,6374 \cdot \ln(h + 2) + 0,02158(h + 2)] \quad (11)$$

сосна (перестійні насадження)

$$f = 10^{-3} \cdot (352,1 + 534,3 \cdot d^{-0,4546}) \quad (12)$$

ялина рівнинної частини

$$f = 10^{-3} \cdot [421,7 + 1023 / (h - 0,7228)] \quad (13)$$

ялина середньогірська

$$f = 10^{-3} \cdot [438 - 2,30 \cdot h + 0,0934 \cdot h^2 - (d - 40) / (0,163 + 0,00874 \cdot d)] \quad (14)$$

ялина верхньогірська

$$f = 10^{-3} \cdot [402 - 1,60 \cdot h + 0,0572 \cdot h^2 - (d - 42) / (0,142 + 0,00545 \cdot d)] \quad (15)$$

ялиця

$$f = 0,412 + 1,18 / (h - 0,289) \quad (16)$$

дуб

$$f = 0,381 + 0,495 \cdot d^{-0,481} \quad (17)$$

бук

$$f = 10^{-3} \cdot (501 - 1,51 \cdot d + 2106 / d^2) \quad (18)$$

ясен

$$f = -0,164 + 0,811 \cdot d^{-0,07706} \quad (19)$$

граб

$$f = 10^{-4} \cdot (1030 + 5889 \cdot d^{-0,1702}) \quad (20)$$

осика

$$f = 10^{-3} \cdot \exp(5,972 - 0,1292 \cdot \ln d + 0,1932 \cdot \ln h) \quad (21)$$

береза

$$f = 10^{-3} \cdot \exp(6,575 - 0,2449 \cdot \ln d + 0,07253 \cdot \ln h) \quad (22)$$

вільха

$$f = 0,431 + 0,940 / (h - 1,15) \quad (23)$$

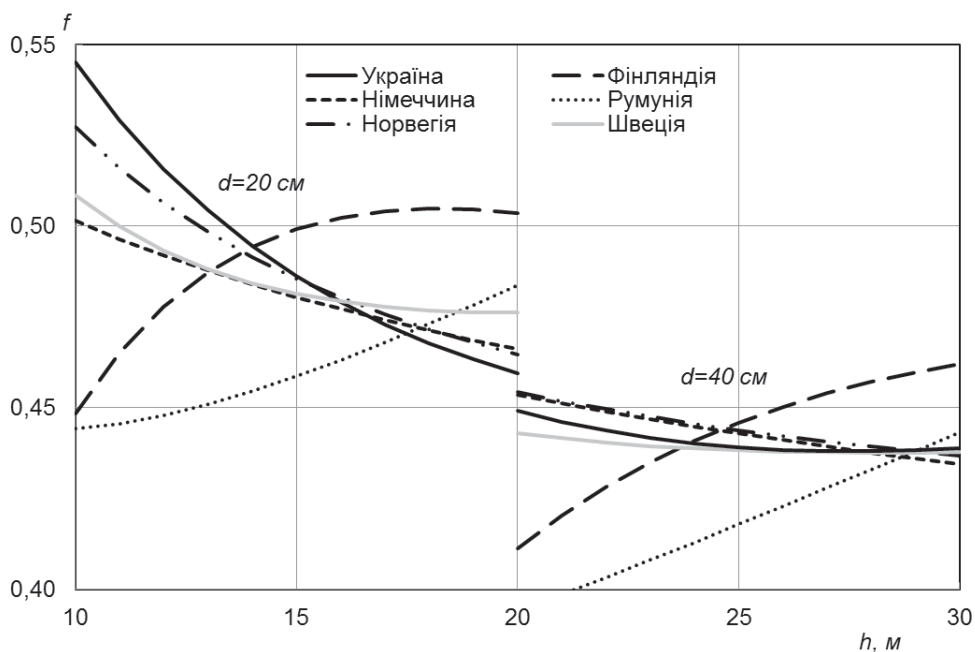
З метою порівняння розроблених на основі формул (1–23) нормативів об'єму стовбурів із закордонними аналогами, було використано математичні моделі, опрацьовані вченими Фінляндії, Швеції, Норвегії, Німеччини та Румунії [15]. Детальний аналіз було проведено для стовбурів дерев сосни звичайної, як однієї з головних лісоутворювальних деревних порід Європи. Параметри математичних моделей об'єму стовбурів сосни різних країн Європи наведено в таблиці.

Математичні моделі об'єму стовбурів сосни звичайної

№ з/п	Рівняння	Коефіцієнти					Країна
		a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	
1	$V = (a_0 \cdot h \cdot d^2 + a_1 \cdot d \cdot h + a_2 \cdot d^3 + a_3 \cdot d \cdot h^2) \cdot 10^{-3}$	0,05782	0,1163	-0,0109	-	0,01317	Фінляндія
2	$V = (a_0 + a_1 \cdot d^2 + a_2 \cdot d^2 \cdot h) \cdot 10^{-3}$	8,652	0,07684	0,03157	-	-	Норвегія
3	$V = (a_0 \cdot d^2 + a_1 \cdot d^2 \cdot h + a_2 \cdot d \cdot h^2) \cdot 10^{-3}$	0,1028	0,02705	0,00521 5	-	-	Швеція
4	$V = a_0 \cdot d^{a_1} \cdot h^{a_2}$	$5,65 \cdot 10^{-5}$	1,960	0,8944	-	-	Німеччина
5	$V = a_0 \cdot 10^{(a_1 \lg d + a_2 \lg d^2 + a_3 \lg h + a_4 \lg h^2)}$	$1,48 \cdot 10^{-4}$	1,834	-0,0448	0,3115	0,3525	Румунія

Порівняння розробленої для умов України моделі об'єму стовбурів сосни з рівняннями, наведеними в таблиці, засвідчили, що найменші розбіжності спостерігаються з даними Німеччини, Швеції і Норвегії. Як правило відхилення не перевищують $\pm 5\%$ і лише зрідка – понад 10% . Найбільшими розбіжностями характеризується модель фінських учених: стовбури діаметром понад 40 см часто мають об'єм на 20% менший, ніж в Україні, а в окремих випадках – удвічі. Особливості повнодеревності, а відповідно й об'єму стовбурів у різних країнах Європи показано на рисунку.

Використовуючи дані таксації 250 модельних дерев сосни звичайної, випадковим чином відібраних з бази науково-дослідних даних кафедри лісової таксації та лісовпорядкування НУБіП України, було виконано оцінку точності наведених у таблиці моделей під час масової таксації. Виявилося, що лише модель об'єму фінських учених має значну систематичну помилку, яка перевищує 5% . Застосування решти математичних моделей супроводжується помилками не більше $\pm 1,5\%$. Середньоквадратичні помилки всіх формул близькі та становлять $6\text{--}7\%$.



Залежність показника повнодеревності стовбурів сосни від висоти за сталого діаметра в різних країнах Європи

Висновки

Використовуючи розроблені математичні моделі повнодеревності стовбурів було опрацьовано відповідні об'ємні таблиці, які у складі нового «Лісотаксаційного довідника» [3] з 2013 року стали в Україні офіційними лісообліковими нормативами. Крім того, вказані моделі було покладено в основу розроблення чинних сортиментних таблиць, які широко використовуються в лісовій галузі України для матеріальної оцінки запасу деревостанів під час відведення лісосік до рубки.

Список література

1. Анучин Н. П. Лесная таксация / Н. П. Анучин. — М. : Лесн. пром-сть, 1982. — 552 с.
2. Крюденер А. А. Таблицы массы, сбега и др. для главнейших древесных пород / А. А. Крюденер. — С.-Петербург: Типография главного управления уделов, 1913. — 220 с.
3. Лісотаксаційний довідник / [за ред. С.М. Кашпора, А.А. Строчинського]. — К. : Видавничий дім «Вінніченко», 2013. — 496 с.
4. Нормативно-справочные материалы для таксации лесов Украины и Молдавии / [за ред. А. З. Швиденка]. — К.: Урожай, 1987. — 560 с.
5. Нормативи об'єму, сортиментної структури і товарності перестиглих соснових деревостанів лісів населених пунктів і зелених зон / [розроб. А.А. Строчинський, В.В. Миронюк, О.А. Гірс, В.А. Свинчук]. — К. : ВЦ НУБіП України, 2009. — 24 с.
6. Нормативи об'єму та сортиментної структури дерев забудованої частини міст / [розроб.: А. А. Строчинський, В. В. Миронюк, О. Г. Маніта]. — К. : ВЦ НАУ, 2007. — 62 с.
7. Орлов М. М. Лесная вспомогательная книжка для таксации и технических

расчетов / М. М. Орлов. – Ленинград: Сельколхозиздат, 1931. – 736 с.

8. Строчинський А. А. Математичні моделі повнодеревності стовбурів основних лісоутворювальних порід України / А. А. Строчинський, С. М. Кашпор // Науковий вісник НУБіП України. – К., 2006. – № 96. – С. 116-125.

9. Тюрин А. В. Лесная вспомогательная книжка / А. В. Тюрин, И. М. Науменко, П. В. Воропанов. – М. : Гослесбумиздат, 1956. – 532 с.

10. Burkhardt H. E. Cubic-foot volume of loblolly pine to any merchantable top limit / H. E. Burkhardt // South. J. Appl. For. – 1977. – № 1. – P. 7–9.

11. Clark A. Stem profile equations for southern tree species: Res. Pap. SE-282 / A. Clark, R. A. Souter, B. E. Schlaegel / U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Southern Forest Experiment Station. – Asheville, 1991. – 113 p.

12. Fonweban J. Variable-top merchantable volume equations for Scots pine (*Pinus sylvestris*) and Sitka spruce (*Picea sitchensis* (Bong.) Carr.) in Northern Britain / J. Fonweban, B. Gardiner, D. Auty // Forestry. – 2012. – Vol. 84. – № 2. – 237–253.

13. Lockow K.-W. Modellbildung und quantifizierung der durchmesser- und volumenstruktur des ausscheidenden kieferjungbestandes – holzmeßkundliche entscheidungshilfen für die erstdurchforstung / K.-W. Lockow // Beiträge für Forstwirtschaft und Landschaftsökologie. – № 27(2). – P. 77–82.

14. Timber management: a quantitative approach / J. L. Clutter, J. C. Forston, L. V. Pianaar et al. – New York: John Wiley & Sons, 1983. – 333 p.

15. Zianis D. Biomass and stem volume equations for tree species in Europe. Silva Fennica : Monographs 4 / D. Zianis, P. Muukkonen. R. Makipää, M. Mencuccini. – 2005. – 63 p.

Проанализированы основные методы таксации объема стволов деревьев в Украине и за рубежом. Обоснованы параметры математических моделей полнотеревесности стволов с учетом размеров деревьев и возраста древостоев. Разработаны нормативы объема стволов для главных лесобразующих пород Украины.

Диаметр, высота, видовое число, модель, объем, нормативы.

The basic methods of tree stems volumes estimation in Ukraine and abroad have been analyzed. The parameters of volume equations in forest stands of different age groups have been proposed. As a result new reference data for tree stems volume calculation of main forest-forming species in Ukraine have been compiled.

Diameter, height, form factor, model, volume, reference data.