

References (transliterated)

1. Tsalamengas J. L. Exponentially converging Nystrom methods in scattering from infinite curved smooth strips. Part I: TM-Case. *IEEE Trans. Antennas Propagat.* 2010, vol. 58.
2. Lifanov I. K. *Metod singulyarnykh integral'nykh uravneniy i chislennyi eksperiment* [Method of singular integral equations and numerical experiment]. Moscow, Open Company "Janus" Publ., 1995. 520p.
3. Gandel Y. V., Eremenko S. V., Polyanskaya T. S. *Matematicheskie voprosy metoda diskretnykh tokov. Ucheb. posobie. Ch. II* [Mathematical problems in the method of discrete currents. Proc. allowance. Part II]. Kharkov, 1992. 145 p.
4. Gandel Y. V. *Lektsii o chislennykh metodakh dlya singulyarnykh integral'nykh uravneniy. Ucheb. posobie. Ch. I* [Lectures on numerical methods for singular integral equations. Proc. allowance. Part I]. Kharkov-Kherson, 2001. 92 p.
5. Gabdulkaev B. G. *Optimal'nye approksimatsii resheniy lineynykh zadach* [Optimal approximation of solutions of linear problems]. Kazan, Izd. Kazan. University Publ., 1980. 231 p.
6. Natanson I. P. *Konstruktivnaya teoriya funktsiy* [Constructive theory of functions]. Moscow-Leningrad, GTTI Publ., 1949. 688 p.

Поступила (received) 16.03.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Інтегральне рівняння першого роду з логарифмічним ядром, задане на системі інтервалів / Т. С. Полянська // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Математичне моделювання в техніці та технологіях. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 6 (1228). – С. 123 – 127. Бібліогр.: 6 назв. – ISSN 2222-0631.

Інтегральное уравнение первого рода с логарифмическим ядром, заданное на системе интервалов / Т. С. Полянская // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Математичне моделювання в техніці та технологіях. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 6 (1228). – С. 123 – 127. Бібліогр.: 6 назв. – ISSN 2222-0631.

Integral equations of the first kind with logarithmic kernel given on a system of intervals / T. S. Polyanskaya // Bulletin of National Technical University «KhPI» Series: Mathematical modeling in engineering and technologies. – Kharkiv : NTU «KhPI», 2017. – № 6 (1228). – pp. 123 – 127. Bibliog.: 6 titles. – ISSN 2222-0631.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / Information about authors

Полянська Тетяна Семенівна – кандидат фізико-математичних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків; тел.: (093) 921-97-17; e-mail: tatyana-polyanskaya1@mail.ru.

Полянская Татьяна Семеновна – кандидат физико-математических наук, доцент, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», г. Харьков; тел.: (093) 921-97-17; e-mail: tatyana-polyanskaya1@mail.ru.

Polyanskaya Tatyana Semenovna – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkov; tel.: (093) 921-97-17; e-mail: tatyana-polyanskaya1@mail.ru.

УДК 631.376

О. Ю. РЕБРОВ

ІНТЕГРАЛЬНА ЙМОВІРНІСНА ОЦІНКА ВІДПОВІДНОСТІ ТРАКТОРНОЇ ШИНИ АГРОЕКОЛОГІЧНИМ ВИМОГАМ В ҐРУНТО-КЛІМАТИЧНИХ УМОВАХ УКРАЇНИ

Запропоновано методика розрахунку середньоінтегральної ймовірнісної оцінки відповідності максимального тиску на ґрунт тракторної шини агроекологічним вимогам з урахуванням ґрунто-кліматичних умов України. Наведено розподіл допустимого тиску на ґрунт територією України при весняному передпосівному і осінньому основному обробітку ґрунту. Проведено аналіз середньоінтегральних ймовірнісних оцінок відповідності ряду типорозмірів сільськогосподарських тракторних шин світових виробників агроекологічним вимогам.

Ключові слова: тракторна шина, максимальний тиск шини на ґрунт, агроекологічні вимоги.

Предложена методика расчета среднеинтегральной вероятностной оценки соответствия максимального давления на почву тракторной шины агроэкологическим требованиям с учетом почвенно-климатических условий Украины. Приведено распределение допустимого давления на почву по территории Украины при весенней предпосевной и осенней основной обработке почвы. Проведен анализ среднеинтегральных вероятностных оценок соответствия ряда типоразмеров сельскохозяйственных тракторных шин мировых производителей агроэкологическим требованиям.

Ключевые слова: тракторная шина, максимальное давление шини на почву, агроэкологические требования.

The article presents a method of calculating the mean integral probability estimate of the maximum tractor tire pressure on the soil meeting the agro-ecological requirements with taking into account soil and climatic conditions of Ukraine. The distribution of the permitted soil pressure on the territory of Ukraine during the spring presowing and autumn primary tillage is given. The conformity of agricultural tractor tires to the agro-ecological requirements is analyzed using the mean integral probability estimate. It is proved that only some of VF tires among all the studied ones meet the standards of soil pressure with the mean integral probability estimate up to 0.9 – 0.95 for any tire inflation pressure and radial load.

Key words: agricultural tire, maximum tractor tires pressure on the soil, agro-ecological requirements.

© О. Ю. Ребров, 2017

Вступ. В сучасних умовах населення земної кулі займається землеробством на розораних землях, де інтенсивно розвивається ерозія ґрунту, причому, значна частина таких земель знаходиться в Україні. При традиційних системах обробки ґрунтовий покрив швидко втрачається. Він руйнується, деградує з помітною швидкістю, зростає знесення його родючого шару з водою.

Одним із факторів, що шкідливо впливають на ґрунт і сприяють його деградації, є його надмірне ущільнення ходовими системами мобільної сільськогосподарської техніки, зокрема колісними тракторами. Науково-обґрунтовані заходи щодо поліпшення агроекологічної ситуації на розораних землях України повинні базуватися на оцінках відповідності агроекологічним нормам показників взаємодії тракторних шин з ґрунтом.

Розробка методики інтегральної оцінки відповідності максимального тиску на ґрунт тракторної шини екологічним вимогам з урахуванням розподілу сільськогосподарських угідь України, а саме ріллі, за показниками, що лімітують рівень впливу колісних рушіїв на ґрунт, є актуальною задачею, яка дозволить визначити найбільш перспективні до застосування і безпечні з агроекологічних позицій конструкції і типорозміри тракторних шин.

Аналіз останніх досягнень і публікацій. Оптимальним для механічної обробки ґрунту стає в стані *фізичної стиглості* (ФС). Фізична стиглість ґрунту різного гранулометричного складу досягається при різній вологості в доволі вузькому інтервалі значень [1]. Стан фізичної стиглості ґрунту, визначається, насамперед, гранулометричним складом [2], рівноважною щільністю у верхньому оброблюваному шарі та наявністю вологи [3].

Найбільш інтенсивне антропогенне навантаження виникає в ході сільськогосподарських операцій механічної обробки ґрунту, які на території України проводяться навесні, під час його підготовки під ранні ярові культури, і восени – під озиму пшеницю [1].

Найбільш вразливим до ущільнення ґрунту стає при підвищеній вологості, що суттєво може знизити ефективність його обробки, або навіть звести її нанівець.

Здатність ґрунту опиратися деформуванню визначається його потенціалом міцності, складовими якого є супротив розриву (8 – 15% від потенціалу міцності, якщо під ним мати на увазі суму зусиль, необхідних для подолання супротиву розриву, здвигу та стискання), супротив здвигу (25 – 30%) і супротив стискання (50 – 60%), в ході якого ґрунт руйнується. Стискання є найбільш небажаним способом впливу на ґрунт не тільки в силу найбільшої енергоємності, але й тому, що після такого впливу порушується фундаментальна характеристика ґрунту – здатність відновлювати вихідні характеристики, що є визначальним для збереження усереднених в часі параметрів при антропогенному навантаженні [3].

Виявлені факти принципової різниці в післядії на ґрунт різних способів деформування послужили основою для обґрунтування допустимого рівня впливу на ґрунт ходових систем машино-тракторних агрегатів [3 – 6].

Мета та постановка задачі. Метою даної роботи є розробка методики середньоінтегральної ймовірнісної оцінки відповідності максимального тиску на ґрунт тракторної шини екологічним вимогам в ґрунто-кліматичних умовах України з урахуванням обмежень, що існують в полі значень тиску повітря і радіальних навантажень. Методика може бути використана при вирішенні задачі обґрунтування параметрів ходових систем тракторів і машино-тракторних агрегатів.

Методика розрахунку інтегральної ймовірнісної оцінки відповідності тракторної шини агроекологічним вимогам. Максимальний тиск тракторної шини на ґрунт визначається радіальним навантаженням і контурною площею плями контакту з жорсткою опорною поверхнею F_k . Перерахунок максимального тиску q_{\max} по середньому $q_{\text{ср}}$ відбувається згідно [7] з використанням коефіцієнту поздовжньої нерівномірності розподілу тиску за площею плями контакту $K_2 = 1,5$. Таке значення K_2 справедливе для ґрунтів нормальної вологості [8, с. 97] при розподілі тиску за законом напівеліпсоїда [4, с.75]. Площа контакту шини з ґрунтом $F_{\text{кр}}$ розраховується за контурною площею плями контакту з жорсткою опорною поверхнею F_k , яка, в свою чергу, може визначатись аналітично або бути наведеною в технічних даних виробника на шину.

В технічних даних сучасних шин закордонних виробників, таких як Michelin, Trelleborg, Good Year, Firestone, Mitas, міститься інформація про контурну площу плями контакту з жорсткою опорною поверхнею F_k^* . Слід відзначити, що каталожне значення F_k^* – це контрольний показник, який отримано при максимально допустимих радіальному навантаженні Q_{\max} і тиску повітря в шині $p_{\text{ш.макс}}$. Враховуючи залежність максимально допустимого радіального навантаження на шину не тільки від тиску повітря, а й від швидкісного режиму експлуатації, виробники шин вказують значення F_k^* для індексу швидкості А6 (максимальна швидкість в експлуатації 30 км/год). Тобто, каталожне значення контурної площі плями контакту з жорсткою опорною поверхнею F_k^* відповідає *індексу навантаження і індексу швидкості* [9, 10]. При виконанні сільськогосподарських тягових операцій обробка ґрунту, зазвичай, виконується на швидкостях 5,5 – 12 км/год, а при швидкісній ґрунтообробній операції – до 18 км/год. Шини під час тягових операцій експлуатуються при передачі великих крутних моментів, тому вони схильні не тільки до радіальних, а й до тангенціальних деформацій. Такий напружено-деформований стан не дозволяє отримати більшу допустиму вантажопідйомність шини при відповідному зниженні швидкості. Тому всі виробники шин рекомендують на тягових операціях визначати допустимі навантаження у відповідності

до індексу швидкості А6 (30 км/год).

Контурна площа плями контакту з жорсткою опорною поверхнею F_k^* залишається незмінною на лінії навантажувальної характеристики шини, яка з'єднує точки з координатами $(p_{ш.мин}; Q_{мин})$ і $(p_{ш.маx}; Q_{маx})$, де $p_{ш.мин}$ – мінімально допустимий тиск в шині; $Q_{мин}$ – максимально допустиме радіальне навантаження, що відповідає мінімально допустимому тиску; $p_{ш.маx}$ – максимально допустимий тиск в шині; $Q_{маx}$ – максимально допустиме радіальне навантаження, що відповідає максимально допустимому тиску [9].

При розрахунках максимального тиску на ґрунт у всьому полі значень тиску повітря і радіальних навантажень може бути використана математична модель шини, запропонована В. Л. Бідерманом [11] та розвинута в роботі [12]. При відсутності повної технічної інформації для конкретної шини, дані щодо F_k^* , або норми шаруватості, яка вказується тільки для діагональних шин і деяких радіальних, можна отримати при ідентифікації шин, у тому числі і сучасних інноваційних категорій IF та VF, з використанням запропонованих методик [13, 14].

Відповідність тракторної шини агроекологічним нормам впливу на ґрунт регламентується за допустимим тиском [6], який розраховується окремо для весняного і літньо-осіннього періоду залежно від вологості ґрунту в долях найменшої вологоємності (НВ), яка, в свою чергу, визначається гранулометричним складом ґрунту (рис. 1, а). Обробка у весняний і літньо-осінній період повинна проводитися, коли ґрунт знаходиться в стані фізичної стиглості (ФС). Фізична стиглість ґрунту досягається в обмежених областях всередині зон 3 і 4 діаграми стану ґрунтів (рис. 1, б). Великий обсяг досліджень і систематизацію даних щодо стану ґрунтів України проведено в роботах В. В. Медведєва [1 – 3], де наведений розподіл ґрунтів України за гранулометричним складом (рис. 2), найменшою вологоємністю (рис. 3) і вологістю фізичної стиглості (рис. 4). За результатами моніторингу і узагальнення стану земельних ресурсів сільськогосподарського призначення, а також синтезу картографічного і статистичного матеріалів за окремими показниками ґрунтів, в [1, 3] наведені дані відносно фактичних середньобагаторічних параметрів вмісту вологи в ріллі України в середньобагаторічні терміни проведення робіт під час підготовки ґрунту під ранні ярові культури навесні та під озиму пшеницю в літньо-осінній період (табл. 1).

Розрахунок допустимого тиску на ґрунт, згідно [6], проводиться залежно від вологості ґрунту у долях найменшої вологоємності (НВ). Фізична стиглість ґрунтів різного гранулометричного складу знаходиться в межах 0,6 – 0,9 НВ. Вологість фізичної стиглості й найменша вологоємність – це пов'язані характеристики ґрунтів. Для оціночних розрахунків з практичною точністю можна прийняти, що стан фізичної стиглості ґрунтів на території України досягається при вмісті вологи в середньому на рівні 0,7 НВ [3].

Наведених даних достатньо для розрахунку інтегральної ймовірнісної оцінки відповідності тракторної шини агроекологічним вимогам в ґрунто-кліматичних умовах України. Зробимо припущення, що такі характеристики ґрунтів, як вологість фізичної стиглості, найменша вологоємність і вологість ґрунту під час проведення передпосівної і основної обробки є випадковими величинами, які мають нормальний розподіл на території України. Це припущення дозволяє отримати математичне очікування і середньоквадратичне відхилення розподілу нормативної величини допустимого тиску на ґрунт [6, табл. 1] під час проведення передпосівної (навесні) і основної (восени) обробки.

Допустимий тиск шини на ґрунт визначається відповідно нормативній величині допустимого тиску і поправок, які враховують режим роботи шини, висоту протектору і число проходів по одному сліду. Для розрахунку допустимого тиску на ґрунт вважатимемо, що шина працює у ведучому режимі, висота протектору перевищує 25 мм, а число проходів по одному сліду дорівнює двом.

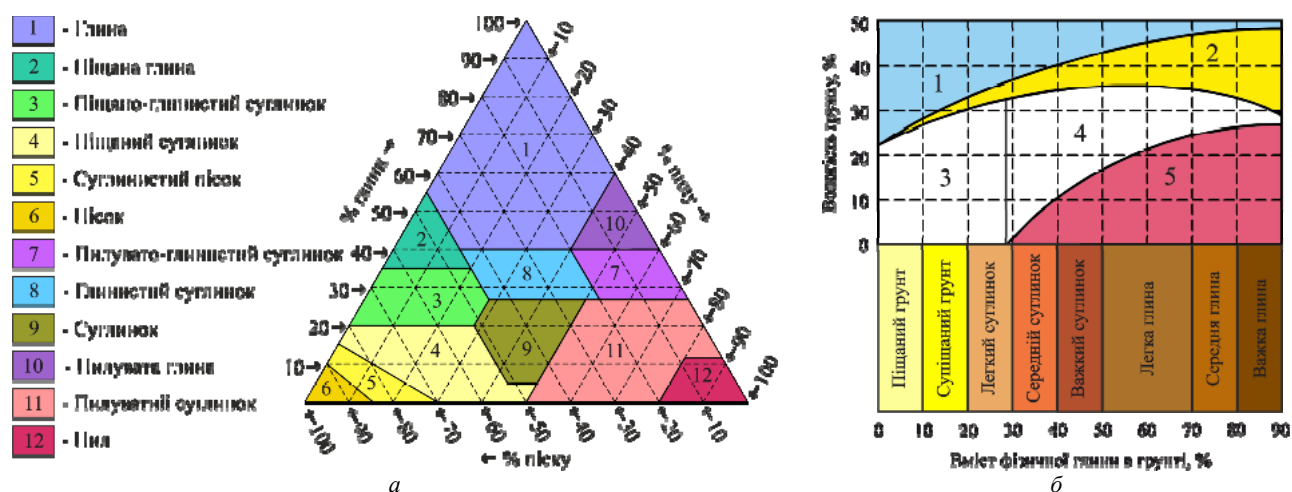


Рис. 1 – Гранулометричний склад і діаграма стану ґрунтів:

а – гранулометричний склад ґрунтів; б – діаграма (по Г. Д. Петрову) стану ґрунтів:

1 – текучий; 2 – пластичний; 3 – пухкий; 4 – з грудками, що легко руйнуються; 5 – твердий з брилами.

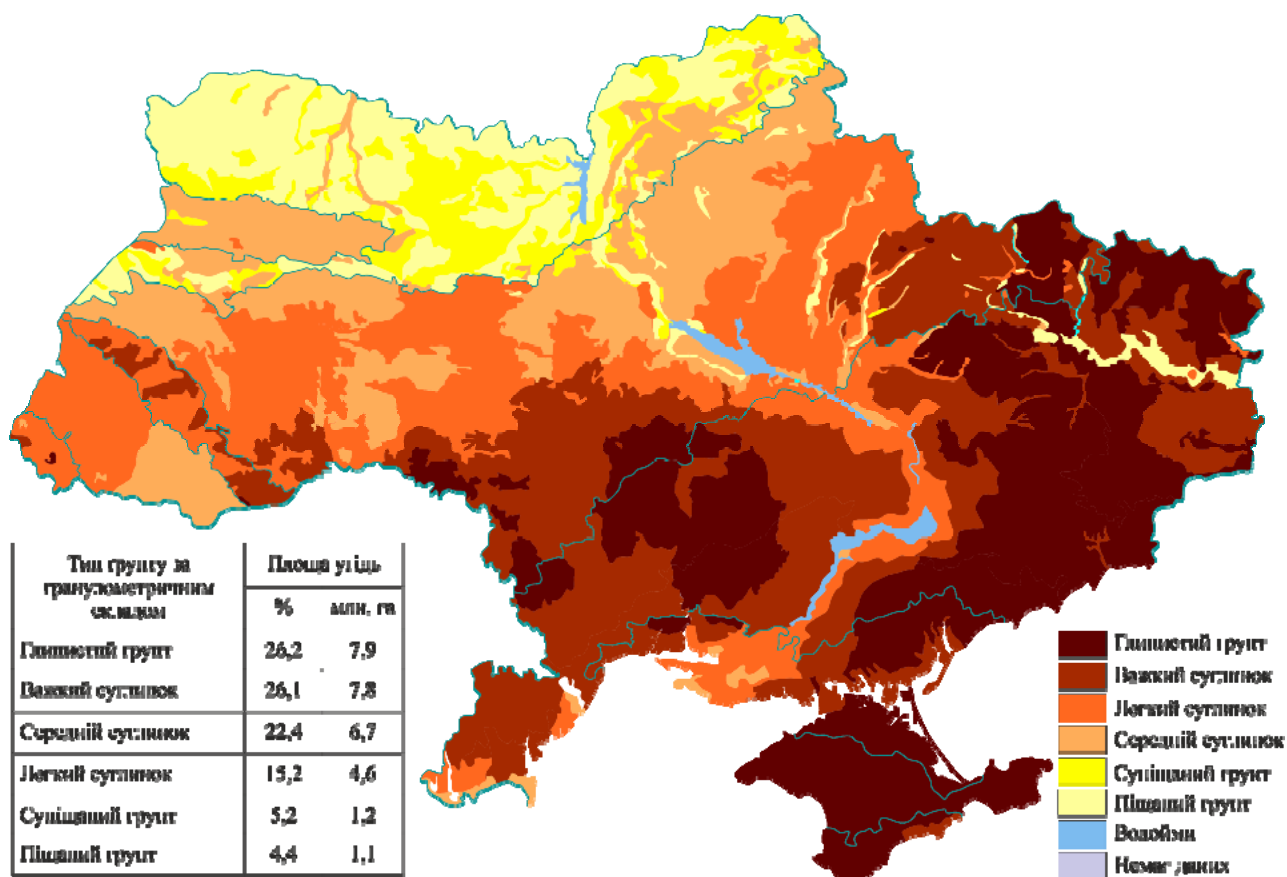


Рис. 2 – Розподіл гранулометричного складу ґрунтів на території України [3].

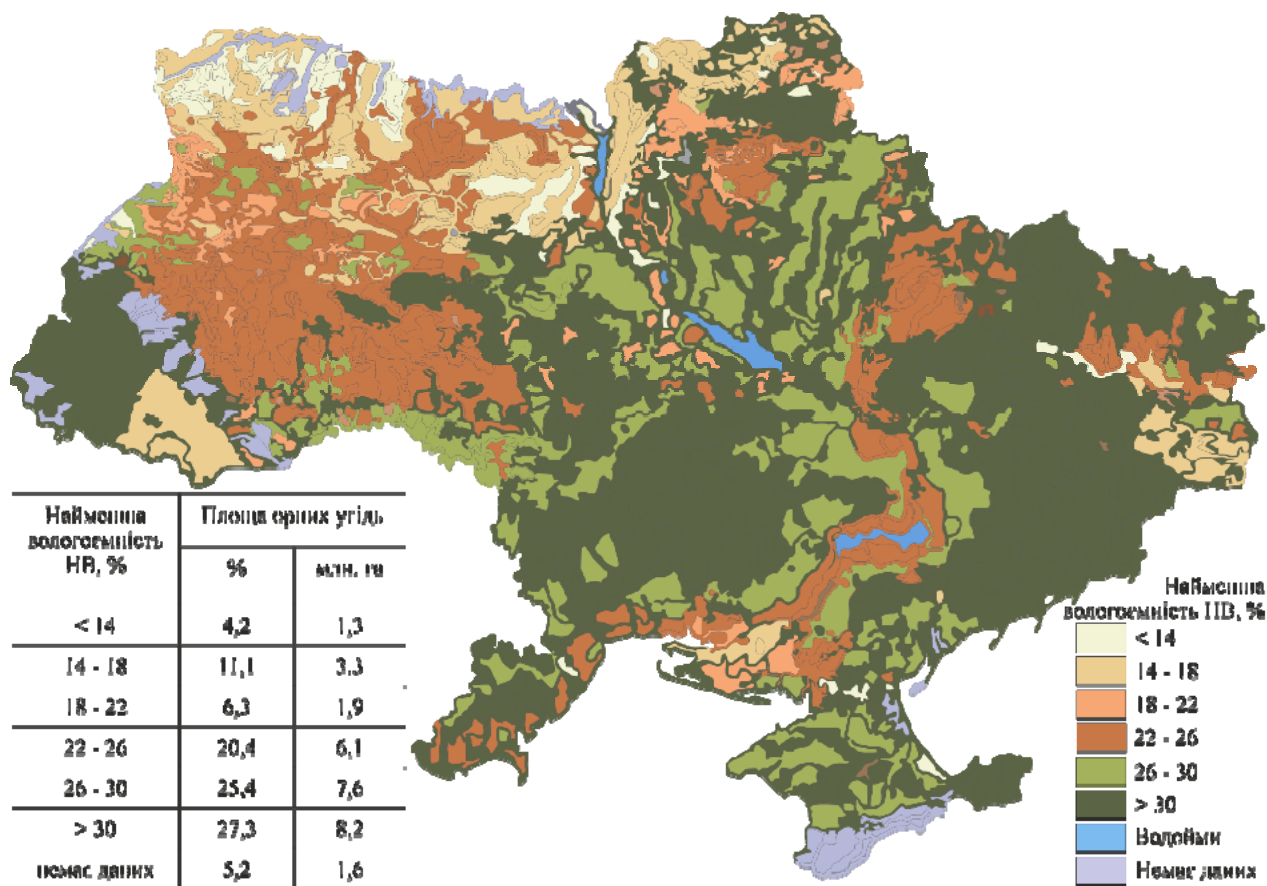


Рис. 3 – Розподіл найменшої вологемістності (НВ) ґрунтів на території України [3].

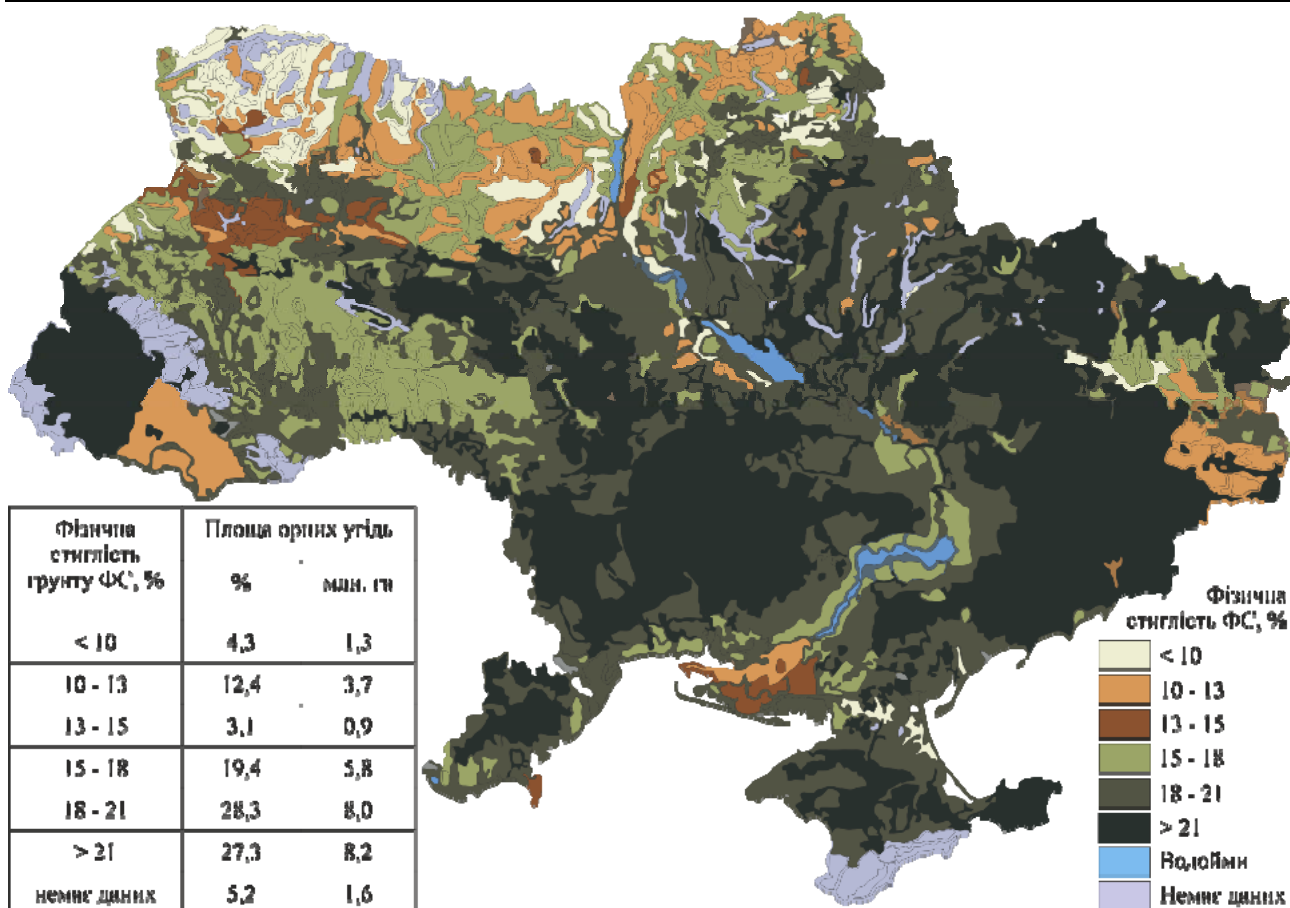


Рис. 4 – Розподіл вологості фізичної стиглість (ФС) ґрунтів на території України [3].

Таблиця 1 – Вологість ґрунту під час проведення передпосівного і основного обробітку [1, 3]

Передпосівна обробка ґрунту			Основна обробка ґрунту		
Вологість ґрунту в долях фізичної стиглість (ФС)	Площа ріллі		Вологість ґрунту в долях фізичної стиглість (ФС)	Площа ріллі	
	%	млн. га		%	млн. га
–	–	–	< 0,7	4,9	1,5
< 0,8	9,4	2,8	0,7 – 0,8	8,1	2,4
0,8 – 0,9	5,0	1,5	0,8 – 0,9	59,1	17,7
0,9 – 1,0	75,8	22,7	0,9 – 1,0	14,1	4,2
> 1,0	9,9	3,0	> 1,0	13,8	4,2

Враховуючи все перелічене, отримані нормальні розподіли нормативної величини допустимого тиску на ґрунт для весняної передпосівної і осінньої основної обробки (рис. 5) з параметрами: $M_1 = 135$ кПа, $\sigma_1 = 13$ кПа (весна); $M_2 = 142$ кПа, $\sigma_2 = 24$ кПа (осінь). Згідно [6] допустимий тиск на ґрунт:

$$[q] = [q_n] \cdot k_\Sigma, \quad (1)$$

де k_Σ – коефіцієнт, що враховує умови роботи рушій; $[q_n]$ – нормативна величина допустимого тиску [6, табл. 1], розподіл якої під час проведення передпосівної (навесні) і основної (восени) обробки ґрунту на території України наведено на рис. 5.

При русі шини по ґрунту необхідне виконання умови:

$$q_{\max} \leq [q], \quad (2)$$

де q_{\max} – максимальний тиск шини на ґрунт, що визначається згідно [7].

З урахуванням (1) нерівність (2) приймає вигляд:

$$q_{\max} / k_\Sigma \leq [q_n], \quad (3)$$

Аналіз розподілу нормативної величини допустимого тиску на ґрунт (рис. 5) показує, що частка ґрунтів з допустимим тиском $[q_n] < 126$ кПа переважає при основному осінньому обробітку, і навпаки, частка ґрунтів з допустимим тиском $[q_n] > 126$ кПа переважає при весняній передпосівній обробці. Це свідчить про те, що, незважаючи на поширену думку про вирішальну роль тиску на ґрунт при весняно-польових роботах, при основній обробці існує приблизно до однієї чверті ґрунтів України, в яких допустимий тиск на ґрунт, принаймні, не менше ніж при передпосівній обробці. Опосередковано на це звернув увагу В. В. Медведєв у роботах [1, 3], де пока-

зано, що частка площі ріллі, на якій можлива високоякісна основна обробка, значно зменшується у порівнянні з умовами зволоження навесні (з 75,8 % до 14,1 %). Тобто, ґрунто-технологічні умови для традиційної оранки на 85 % території України незадовільні.

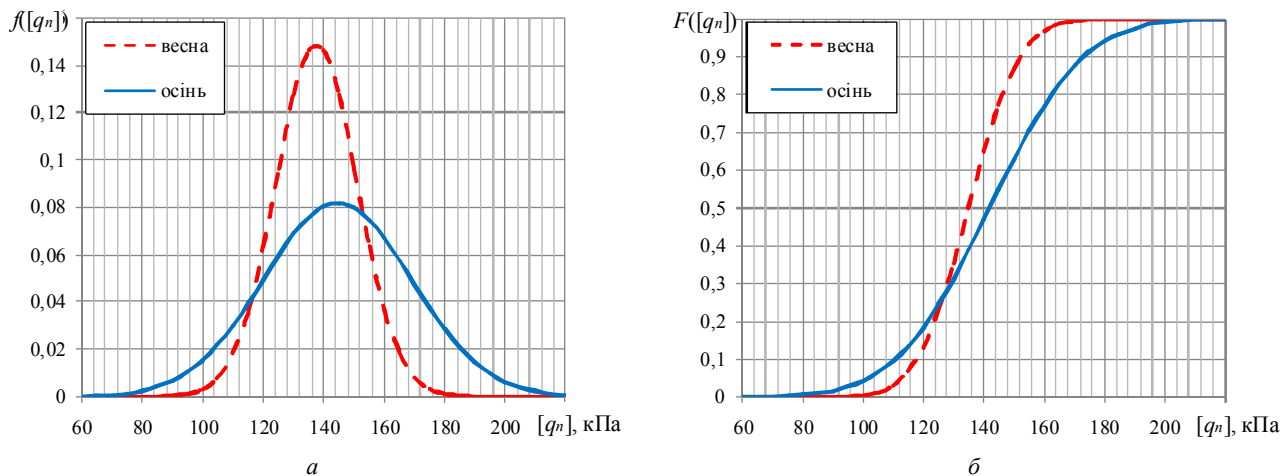


Рис. 5 – Розподіл нормативної величини допустимого тиску на ґрунт $[q_n]$ під час передпосівної (весна) і основної (осінь) обробки: *a* – функція щільності ймовірності; *б* – функція розподілу ймовірності.

Після визначення максимального тиску тракторної шини на ґрунт [7] ймовірність виконання умови (3), тобто відповідності шини екологічним вимогам з урахуванням ґрунто-кліматичних умов України, можна розрахувати наступним чином:

$$p\left(\frac{q_{\max}}{k_{\Sigma}} \leq [q_n]\right) = \frac{1}{\sigma_i \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \int_{q_{\max}}^{\infty} \exp\left(-\frac{(M_i - [q_n])^2}{2 \cdot \sigma_i^2}\right) d[q_n], \quad (4)$$

де M_i, σ_i – параметри розподілу нормативної величини допустимого тиску на ґрунт $[q_n]$ (рис. 5) під час передпосівної (весна) і основної (осінь) обробки.

Результатом розрахунку будуть значення ймовірності p виконання агроекологічних умов щодо максимального тиску q_{\max} конкретного типорозміру шини на ґрунт у всьому полі значень внутрішнього тиску повітря і радіального навантаження. Оскільки тракторні шини можуть експлуатуватися в широкому інтервалі внутрішнього тиску повітря і радіального навантаження, а, по суті, у всьому полі значень зазначених параметрів, виникає питання формування інтегральної оцінки ймовірності виконання агроекологічних умов.

Для подальших розрахунків введемо кілька коефіцієнтів. Коефіцієнт навантаження шини (%):

$$k_{\Pi} = (G_k / Q_d) \cdot 100\%, \quad (5)$$

де G_k – радіальне навантаження на шину; Q_d – допустиме радіальне навантаження на шину при даному тиску повітря $p_{\text{ш}}$.

Коефіцієнт площі плями контакту:

$$\lambda_f = F_k / F_k^*, \quad (6)$$

де F_k – розрахункова контурна площа плями контакту при відповідному тиску і навантаженні; F_k^* – контурна площа плями контакту на лінії допустимих навантажень між точками з координатами $(p_{\text{ш.мін}}; Q_{\text{мін}})$ і $(p_{\text{ш.макс}}; Q_{\text{макс}})$, це фіксована величина, що може бути наведеною у технічних даних виробника на шину.

При варіюванні тиском повітря в шині $p_{\text{ш}}$ і радіальним навантаженням G_k розрахунок ймовірності виконання шиною агроекологічних вимог за формулою (4) треба проводити, враховуючи, що $q_{\max} = q_{\max}(G_k, p_{\text{ш}})$, тобто ймовірність p буде також функцією двох змінних: $p = p(G_k, p_{\text{ш}})$.

Середньоінтегральну ймовірнісну оцінку відповідності шини агроекологічним вимогам щодо максимального тиску на ґрунт будемо визначати з урахуванням обмежень по рівню радіальних навантажень на шину і, при необхідності, порогового значення ймовірності. Для цього введемо коефіцієнти:

$$k_{\text{кл}} = 1, \text{ якщо } k_{\text{пмін}} \leq k_{\Pi} \leq k_{\text{пмакс}}; k_{\text{кл}} = 0, \text{ якщо } k_{\Pi} < k_{\text{пмін}} \text{ або } k_{\Pi} > k_{\text{пмакс}}, \quad (7)$$

де $k_{\text{пмін}}, k_{\text{пмакс}}$ – мінімальний і максимальний коефіцієнт навантаження шини;

$$k_p = 1, \text{ якщо } p(q_{\max} / k_{\Sigma} \leq [q_n]) \geq p_{\text{лім}}; k_p = 0, \text{ якщо } p(q_{\max} / k_{\Sigma} \leq [q_n]) < p_{\text{лім}}, \quad (8)$$

$p_{\text{лім}}$ – мінімальне значення ймовірності, починаючи з якого визначається середньоінтегральна оцінка.

Сумарний коефіцієнт, що враховує обмеження (7) – (8):

$$k_{\Sigma\text{об}} = k_{\text{кп}} \cdot k_p. \quad (9)$$

Об'єм під поверхнею $p = p(G_k, p_{\text{ш}})$ з урахуванням обмежень (7) – (8) визначається інтегралом:

$$V_p = \int_{G_k} \int_{p_{\text{ш}}} k_{\Sigma\text{об}} \cdot p(G_k, p_{\text{ш}}) dp_{\text{ш}} dG_k. \quad (10)$$

Площа фігури, що є проекцією поверхні $p = p(G_k, p_{\text{ш}})$ на площину $p_{\text{ш}}OG_k$ з об'ємом V_p і, з урахуванням обмежень (7) – (8), визначається інтегралом:

$$S_p = \int_{P_{\text{ш}}} k_{\Sigma\text{об}} \cdot Q_d(p_{\text{ш}}) dp_{\text{ш}}. \quad (11)$$

Тоді середньоінтегральна ймовірнісна оцінка відповідності тракторної шини агроекологічним вимогам має вигляд:

$$p_i = V_p / S_p. \quad (12)$$

Аналіз результатів дослідження. Запропонована методика апробувалась на ряді моделей тракторних сільськогосподарських шин світових виробників таких, як Michelin, Trelleborg, Good Year, Firestone, Mitas. Були розраховані параметри взаємодії з ґрунтом і значення коефіцієнтів $k_{\text{п}}$, λ_f , середній і максимальний тиск шини на ґрунт, ймовірність відповідності тракторної шини агроекологічним вимогам p у всьому полі значень внутрішнього тиску повітря і радіального навантаження (рис. 6, а).

Аналіз показує, що ймовірність p може змінюватись практично від 0 до 1 в залежності від внутрішнього тиску і радіального навантаження. Причому внутрішній тиск в шині має більший вплив на p , ніж радіальне навантаження, оскільки такий же взаємозв'язок простежується між тиском повітря в шині $p_{\text{ш}}$ і максимальним тиском на ґрунт q_{max} .

На універсальній характеристиці шини (рис. 6, а) нанесена лінія **1**, що з'єднує точки $(p_{\text{ш.min}}; Q_{\text{min}})$ і $(p_{\text{ш.max}}; Q_{\text{max}})$. Значення коефіцієнтів $k_{\text{п}}$, λ_f на лінії **1** дорівнює 100 % і 1 відповідно. Область поля параметрів шини, що вище лінії **1**, не розглядається, оскільки на таких режимах експлуатації шина перевантажена (радіальне навантаження перевищує допустиме), тому у розрахунках (7) прийнято $k_{\text{пmax}} = 100$ %. В області поля параметрів шини нижче лінії **1** радіальне навантаження менше допустимого $k_{\text{п}} < 100$ %, площа плями контакту з опорною поверхнею зменшується, $\lambda_f < 1$ – це зона експлуатаційних режимів роботи тракторної шини.

Слід відзначити, що при $k_{\text{п}} < 50$ % більший вплив на q_{max} і p має радіальне навантаження G_k , а при $50 \% < k_{\text{п}} < 100$ % – тиск повітря в шині $p_{\text{ш}}$. Це пояснюється жорсткістю характеристикою шини. Оскільки тракторні сільськогосподарські шини практично не експлуатуються при $k_{\text{п}} < 50$ %, то встановимо в якості нижньої межі області визначення середньоінтегральної ймовірності відповідності тракторної шини агроекологічним вимогам (7) значення $k_{\text{пmin}} = 50$ %.

В силу того, що крім максимального тиску на ґрунт інші обмеження в показниках взаємодії тракторної шини з ґрунтом (буксування, дотична або питома сила тяги, опір коченню) в даній роботі не розглядаються, доцільним буде встановити мінімальне порогове значення ймовірності (8) для визначення середньоінтегральної оцінки $p_{\text{lim}} = 0$.

Якщо, дійсно, врахувати інші обмеження в показниках взаємодії тракторної шини з ґрунтом, то p_{lim} не буде константою, а функціонально залежатиме від обмежуючих факторів, наприклад, $p_{\text{lim}} = p_{\text{lim}}(\delta, P_{\text{к}}, \psi_{\text{к}}, f)$.

Розрахунок середньоінтегральної ймовірнісної оцінки відповідності тракторних шин агроекологічним вимогам p_i показав, що з понад 180 розглянутих типорозмірів, достатньо велика кількість шин взагалі не задовольняють агроекологічним вимогам. На рис. 6, б наведені дані p_i за 25 кращими зразками шин під час передпосівної (весна) і основної (осінь) обробки ґрунту. Серед розглянутих шин окремою групою з найкращими показниками виділяються шини категорії VF (Very high Flexion – шини дуже високої еластичності), які розроблені для експлуатації з навантаженнями на 40 % більшими, ніж звичайні радіальні шини при такому ж тиску повітря.

Такі шини мають показник p_i для весняної і осінньої обробки в межах 0,66 – 0,95, тобто на 66 – 95 % території України вони можуть експлуатуватися у всьому полі значень тиску повітря і радіальних навантажень без порушень агроекологічних вимог щодо максимального тиску на ґрунт. Таким чином, середньоінтегральна ймовірнісна оцінка p_i характеризує відсоток території України, де шина може експлуатуватись навесні чи восени у всьому полі значень тиску повітря і радіальних навантажень без порушень вимог щодо максимального тиску на ґрунт. Слід зазначити, що чим вище p_i , тим кращі показники тиску на ґрунт має шина. Сучасні шини категорії VF можуть скласти гідну конкуренцію гусеничним ходовим системам під час весняної обробки ґрунту.

Для інших шин p_i має менші значення, а у деяких $p_i = 0$. Такі шини взагалі не можна використовувати на території України, оскільки вони шкідливо впливають на ґрунт і сприяють його деградації. Виходячи з вищезазначеного, розрахунок величини p_i може бути використаним при проектуванні нових колісних тракторів, або

обладнанні існуючих новими комплектами шин. Такі розрахунки доцільно проводити для окремих ґрунто-кліматичних зон України. Разом з цим, при детальному розгляді показників конкретних типорозмірів шин, слід звернути увагу на те, що достатньо велика їх кількість має високі значення ймовірності відповідності агроєкологічним вимогам p при тисках повітря в шині близьких до $p_{ш, \min}$. Так, наприклад, шина 900/50 R42 Michelin (рис. 6, а) має p_i під час передпосівної (весна) і основної (осінь) обробки ґрунту 0,364 і 0,445 відповідно. Але при тиску повітря в шині $p_{ш} < 0,065$ МПа вона може експлуатуватись на понад 90 % території України без порушення агроєкологічних умов.

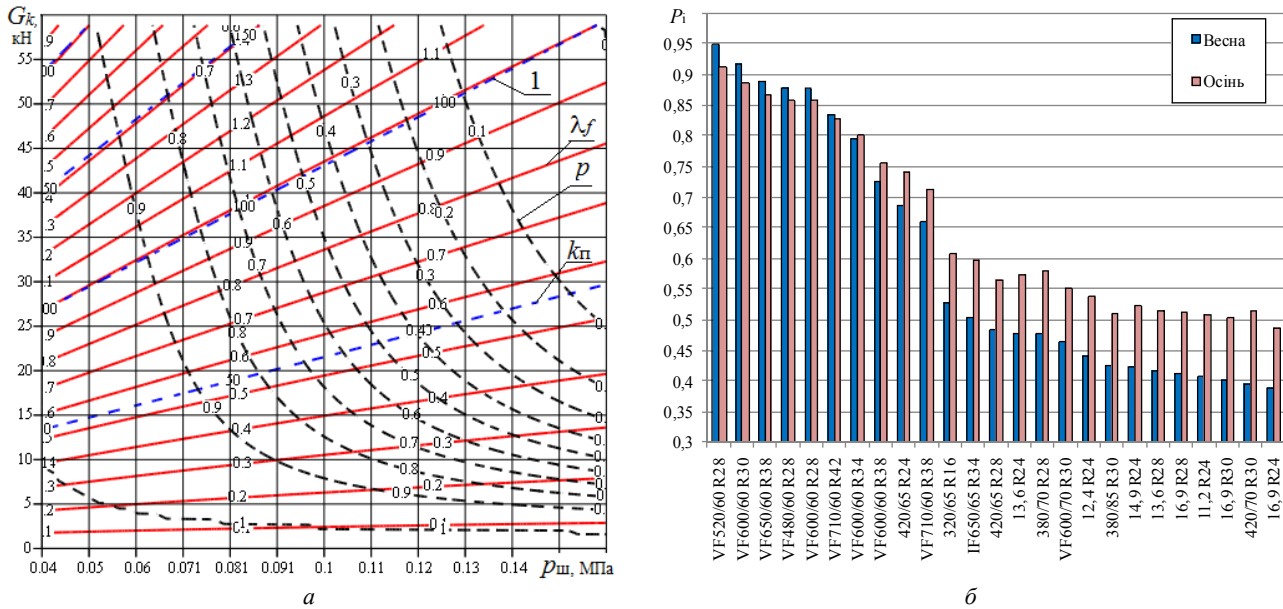


Рис. 6 – Характеристики взаємодії тракторних шин з ґрунтом:

а – універсальна характеристика шини 900/50 R42 Michelin; б – середньоінтегральна ймовірність виконання агроєкологічних умов для ряду шин під час передпосівної (весна) і основної (осінь) обробки ґрунту.

Тому рівень тиску повітря в шині та радіальне навантаження повинні бути обґрунтованими і спиратися на особливості ґрунто-кліматичних зон експлуатації. Враховуючи різноманітність ґрунто-кліматичних умов України, питання доцільності та ефективності використання окремих типорозмірів шин потребує подальшої розробки і уточнення з урахуванням також обмежень буксування, питомої сили тяги та ін.

Загалом, наведена методика розрахунку середньоінтегральної ймовірнісної оцінки відповідності тракторних шин агроєкологічним вимогам p_i з урахуванням ґрунто-кліматичних умов України може використовуватись виробниками тракторної техніки при комплектуванні тракторів шинами для різних ґрунто-кліматичних зон.

Висновки. В інтервалі експлуатаційних навантажень на шину 50 – 100 % від допустимих середньоінтегральні ймовірнісні оцінки відповідності тракторних шин агроєкологічним вимогам p_i з урахуванням ґрунто-кліматичних умов України знаходяться в широких межах від 0 до 0,95. При таких експлуатаційних навантаженнях більший вплив на максимальний тиск на ґрунт q_{\max} і, відповідно, p_i має тиск повітря в шині $p_{ш}$ у порівнянні з радіальним навантаженням G_k . Найкращі показники p_i для весняної і осінньої обробки в межах 0,66 – 0,95 мають інноваційні шини категорії VF. Середньоінтегральні ймовірнісні оцінки відповідності тракторної шини агроєкологічним вимогам p_i є еквівалентом частки території України, де шина може експлуатуватись у всьому полі значень тиску повітря і радіальних навантажень без порушень агроєкологічних вимог щодо максимального тиску на ґрунт. Тракторні сільськогосподарські шини, що мають середньоінтегральну ймовірнісну оцінку $p_i = 0$ взагалі не можна використовувати на території України, оскільки вони шкідливо впливають на ґрунт і сприяють його деградації. Нормативна величина допустимого тиску на ґрунт [6, табл. 1] для передпосівного (навесні) і основного (восени) обробітку може бути прийнятою нормально розподіленою з параметрами: $M_1 = 135$ кПа, $\sigma_1 = 13$ кПа, $M_2 = 142$ кПа, $\sigma_2 = 24$ кПа відповідно. Розроблена методика розрахунку середньоінтегральної ймовірнісної оцінки відповідності тракторних шин агроєкологічним вимогам p_i з урахуванням ґрунто-кліматичних умов України може використовуватись виробниками тракторів при обґрунтуванні шин для різних ґрунто-кліматичних зон держави.

Список літератури

1. Медведєв В. В., Лактионова Т. Н. Почвенно-технологическое районирование пахотных земель Украины. – Х. : Изд. "13 типография", 2007. – 395 с.
2. Медведєв В. В., Лактионова Т. Н. Гранулометрический состав почв Украины (генетический, экологический и агрономический аспекты). – Х. : Апостроф, 2011. – 292 с.

3. *Медведев В. В.* Физические свойства и обработка почв в Украине. – Х. : Изд-во. "Городская типография", 2013. – 224 с.
4. *Русанов В. А.* Проблема переуплотнения почв движителями и эффективные пути ее решения. – М. : ВИМ, 1998. – 368 с.
5. *Водяник И. И.* Воздействие ходовых систем на почву (научные основы). – М. : Агропромиздат, 1990. – 172 с. : ISBN 5-10-000783-4.
6. ГОСТ 26955-86 Техника сельскохозяйственная мобильная. Нормы воздействия движителей на почву.
7. ГОСТ 26953-86 Техника сельскохозяйственная мобильная. Методы определения воздействия на почву.
8. Wong, J. Y. (Jo Yung) Theory of ground vehicles. – 2001. – 528 p. ISBN 0-471-35461-9.
9. ДСТУ ISO 4251-2:2003 Шини (серії маркування норми шарування) та ободи для сільськогосподарських тракторів і машин. Частина 2. Номінальні навантаження на шини. – К. : Держспоживстандарт України, 2005. – 12 с.
10. ДСТУ 4883:2007 Шини пневматичні для тракторів та сільськогосподарських машин. Загальні вимоги до експлуатування. – К. : Держспоживстандарт України, 2009. – 30 с.
11. *Бидерман В. Л., Гуслицер Р. Л., Захаров С. П.* Автомобильные шины (конструкция, расчет, испытания, эксплуатация). – М. : Госхимиздат, 1963. – 384 с.
12. *Ксеневиц И. П., Скотников В. А., Ляско М. И.* Ходовая система – почва – урожай. – М. : Агропромиздат, 1985. – 304 с.
13. *Ребров А. Ю.* Идентификация сельскохозяйственных тракторных шин численным методом // Вісник НТУ «ХПІ» : зб. наук. пр. Серія : Математичне моделювання в техніці та технологіях. – Х. : НТУ «ХПІ». – 2015. – № 6 (1115). – С. 114 – 121.
14. *Ребров А. Ю., Мигущенко Р. П.* Использование информационных технологий при идентификации показателей инновационных тракторных сельскохозяйственных шин категорий IF и VF // Механіка та машинобудування. – 2015. – № 1. – С. 98 – 105.

References (transliterated)

1. Medvedev V. V., Laktionova T. N. *Pochvenno-tehnologicheskoe rayonirovaniye pakhotnykh zemel' Ukrainy* [Soil regionalization zoning of arable land in Ukraine]. Kharkov, Izd. "13 tipografiya" Publ., 2007. 395 p.
2. Medvedev V. V., Laktionova T. N. *Granulometricheskyy sostav pochv Ukrainy (geneticheskyy, ekologicheskyy i agronomicheskyy aspekty)*. [Grain size distribution of soils of Ukraine (genetic, environmental and agronomic aspects)]. Kharkov, Apostrof Publ., 2011. 292 p.
3. Medvedev V. V. *Fizicheskie svoystva i obrabotka pochv v Ukraine* [Physical properties and treatment of soils in Ukraine]. Kharkov, Izd-vo. "Gorodskaya tipografiya" Publ., 2013. 224 p.
4. *Rusanov V. A. Problema pereuplotneniya pochv dvizhiteleyami i effektivnye puti ee resheniya* [The problem of soil paddling by propulsors and effective ways to solve it]. Moscow, VIM Publ., 1998. 368 p.
5. *Vodyanik I. I. Vozdeystvie khodovykh sistem na pochvu (nauchnye osnovy)* [Impact of running systems on soil (scientific basis)]. Moscow, Agropromizdat Publ., 1990. 172 p. ISBN 5-10-000783-4.
6. *GOST 26955-86 Tekhnika sel'skokhozyaystvennaya mobil'naya. Normy vozdeystviya dvizhiteley na pochvu* [State Standard 26955–86. Agricultural mobile machinery. Rates of impact of propelling agents on soil].
7. *GOST 26953-86 Tekhnika sel'skokhozyaystvennaya mobil'naya. Metody opredeleniya vozdeystviya na pochvu* [Agricultural mobile machinery. Methods for determining impact of propelling agents on soil].
8. Wong J. Y. (Jo Yung) Theory of ground vehicles. 2001. 528 p. ISBN 0-471-35461-9.
9. *DSTU ISO 4251-2:2003 Shyny (seriyi markuvannya normy sharuvannya) ta obody dlya sil'skogospodars'kykh traktoriv i mashyn. Chastyna 2. Nominal'ni navantazhenyay na shyny* [State Standard ISO 4251-2:2003 Tires (ply rating marked series) and rims for agricultural tractors and machines. Part 2. Tire load ratings]. Kiev, Derzhspozhyvstandart Ukrayiny Publ., 2005. 12 p.
10. *DSTU 4883:2007 Shyny pnevmatychni dlya traktoriv ta sil'skogospodars'kykh mashyn. Zagal'ni vymogy do ekspluatuvannya* [State Standard Pneumatic tires for tractors and agricultural machinery. General maintenance requirements]. Kiev, Derzhspozhyvstandart Ukrayini Publ., 2009. 30 p.
11. *Biderman V. L., Guslitsr R. L., Zakharov S. P. Avtomobil'nye shyny (konstruktsiya, raschet, ispytaniya, ekspluatatsiya)* [Tires (design, calculations, tests, maintenance)]. Moscow, Goskhimizdat Publ., 1963. 384 p.
12. *Ksenevich I. P., Skotnikov V. A., Lyasko M. I. Khodovaya sistema – pochva – urozhay* [Suspension system - soil - crop]. Moscow, Agropromizdat Publ., 1985. 304 p.
13. *Rebrov A. Yu. Identifikatsiya sel'skokhozyaystvennykh traktornykh shyn chislennym metodom* [Farm tractor tires identification by numeric method]. *Visnyk NTU «KhPI» : zb. nauk. pr. Ser.: Matematychnye modelyuvannya v tekhnitsi ta tekhnologiyakh* [Bulletin of National Technical University «KhPI» Series: Mathematical modeling in engineering and technologies]. Kharkiv, NTU «KhPI» Publ., 2015, no. 6 (1115), pp. 114–121.
14. *Rebrov A. Yu., Miguschenko R. P. Ispol'zovanie informatsionnykh tekhnologiy pri identifikatsii pokazateley innovatsionnykh traktornykh sel'skokhozyaystvennykh shyn kategoriy IF i VF* [Using information technologies for identification of indicators of innovative agricultural tractor tires of categories IF and VF]. *Mekhanika ta mashynobuduvannya* [Mechanics and Mechanical Engineering]. 2015, no. 1, pp. 98–105.

Надійшла (received) 10.03.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Інтегральна ймовірнісна оцінка відповідності тракторної шини агроекологічним вимогам в ґрунто-кліматичних умовах України / О. Ю. Ребров // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Математичне моделювання в техніці та технологіях. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 6 (1228). – С. 127 – 136. Бібліогр.: 14 назв. – ISSN 2222-0631.

Інтегральная вероятностная оценка соответствия тракторной шины агроэкологическим требованиям в почвенно-климатических условиях Украины / А. Ю. Ребров // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Математичне моделювання в техніці та технологіях. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 6 (1228). – С. 127 – 136. Бібліогр.: 14 назв. – ISSN 2222-0631.

Integral probability estimate of the conformity of a tractor tire to the agro-ecological requirements in the soil and climatic conditions of Ukraine / O. Yu. Rebrov // Bulletin of National Technical University «KhPI» Series: Mathematical modeling in engineering and technologies. – Kharkiv : NTU «KhPI», 2017. – № 6 (1228). – pp. 127 – 136. Bibliogr.: 14 titles. – ISSN 2222-0631.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / Information about authors

Ребров Олексій Юрійович – кандидат технічних наук, доцент кафедри автомобіле- та тракторобудування, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків; тел.: (057) 707-64-64; e-mail: alexrebrov0108@gmail.com.

Ребров Алексей Юрьевич – кандидат технических наук, доцент кафедры автомобиле- и тракторостроения, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», г. Харьков; тел.: (057) 707-64-64; e-mail: alexrebrov0108@gmail.com.

Rebrov Oleksii Yuriyovich – Candidate of Engineering Sciences, Associated Professor at the Department of Car and Tractor Industry, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkov; tel.: (057) 707-64-64; e-mail: alexrebrov0108@gmail.com.

УДК 519.6

Н. В. ЧЕРЕМСЬКА

МОДЕЛЮВАННЯ ДІЙСНОЗНАЧНИХ КОРЕЛЯЦІЙНИХ ФУНКЦІЙ З УРАХУВАННЯМ КОМПЛЕКСНОГО СПЕКТРУ

Отримано зображення для дійснозначних кореляційних функцій нестационарних випадкових послідовностей, процесів та полів з використанням трикутних моделей операторів для різних випадків спектра. Отримані зображення дійснозначних кореляційних функцій випадкових послідовностей та процесів можуть використовуватися для аналізу статистично нестационарних даних.

Ключові слова: кореляційна функція, трикутні моделі операторів, нестационарні випадкові послідовності і процеси.

Получены представления для вещественнозначных корреляционных функций нестационарных случайных последовательностей, процессов и полей с использованием треугольных моделей операторов для различных случаев спектра. Полученные представления вещественнозначных корреляционных функций случайных последовательностей и процессов могут быть использованы для анализа статистически нестационарных данных.

Ключевые слова: корреляционная функция, треугольные модели операторов, нестационарные случайные последовательности и процессы.

There is a large class of applications for which statistical transience is characteristic. The examples are: proliferation of waves in a turbulent atmosphere, the study of electromagnetic waves propagating near the globe or in the ionosphere, the analysis of the problem of growth or attenuation of surface waves by strong turbulence generated by a moving object, and others. In solving such problems the use of models of stationary random processes or homogeneous random fields leads to some errors. Thus one needs to develop the correlation theory for a broad class of non-stationary vector-valued random functions that would be promising for solving applied problems for which statistical heterogeneity or transience of relevant statistical data is essential. In this article, we obtain representations for the real-valued correlation functions of nonstationary random sequences, processes, and fields using triangular models of operators for various cases of the spectrum. The obtained representations of the real-valued correlation functions of random sequences and processes can be used to analyze statistically unsteady data.

Key words: correlation function, triangular models of operators, nonstationary random sequences and processes.

Вступ. Існує великий клас прикладних задач, для яких є характерною *статистична нестационарність*. Наприклад, розповсюдження хвиль у турбулентній атмосфері, при дослідженні електромагнітних хвиль, які поширюються поблизу земної кулі або в іоносфері, аналізі задачі загасання або зростання поверхневих хвиль сильною турбулентністю, що створюється об'єктом, який рухається, та інші. При розв'язанні таких задач використання моделей *стаціонарних випадкових процесів* або *однорідних випадкових полів* призводить до певних помилок. Тому виникає необхідність у розробці кореляційної теорії широкого класу нестационарних векторнозначних випадкових функцій, що була б перспективною для розв'язання прикладних задач, для яких статистична нестационарність або неоднорідність відповідних статистичних даних є істотною [1, 2, 3, 4].

Аналіз останніх досліджень. На цей час склалася досить повна теорія стаціонарних у широкому сенсі випадкових функцій, тобто кореляційна теорія стаціонарних випадкових послідовностей, стаціонарних випадкових процесів, однорідних випадкових полів [5, 6, 7, 8], а також випадкових процесів зі стаціонарними приростами [9, 10, 11, 5, 6,]. Проте, при розв'язанні ряду задач фільтрації та прогнозу випадкових процесів, а також поширення хвиль у турбулентній атмосфері, виявилось, що кореляційну теорію стаціонарних випадкових функцій застосувати не можна [5, 6, 12]. В роботах [12, 15] продовжено вивчення нестационарних функцій у гільбертових просторах, що почалось в роботах [5, 6].

Постановка задачі. При побудові кореляційної теорії випадкових процесів та послідовностей широко використовується комплексне зображення, тобто розглядаються випадкові функції вигляду

$$\xi(t) = \xi_1(t) + i\xi_2(t),$$

де i – уявна одиниця; t – час, неперервний або дискретний [13, 14, 15, 16].

Такий підхід дозволяє побудувати кореляційну теорію нестационарних випадкових функцій за допомогою спектральної теорії несамоспряжених або унітарних операторів та ввести поняття *комплексного спектру*. Відповідні спектральні розклади нестационарних випадкових функцій є, як і в стаціонарному випадку, суперпозицією внутрішніх станів осциляторів (неперервних або дискретних), але вже з комплексними частотами. З'являються нові типи спектральних розкладів за внутрішніми станами *струн (континуальні осцилятори)*. Для застосувань кореляційної теорії нестационарних випадкових функцій та їх моделювання зручно мати справу з дійснозначними кореляційними функціями. Тому природно виникає задача про побудову дійснозначних кореляційних функцій, структура яких урахувала б комплексний спектр.