

УДК 625.731.1

І.П. Гамеляк<sup>1</sup>, д.т.н., проф.  
Л.А. Дмитренко<sup>2</sup>  
Т.В. Шагило<sup>2</sup>  
О.С. Гончаров<sup>2</sup>

## ЗВ'ЯЗОК ПОВЕРХНЕВОЇ ГУСТИНИ ГЕОТЕКСТИЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ З ГРАНИЧНОЮ МІЦНІСТЮ НА РОЗРИВ

<sup>1</sup>Національний транспортний університет, м.Київ, [gip65n@gmail.com](mailto:gip65n@gmail.com)

<sup>2</sup>Київський національний університет технологій та дизайну, м.Київ, [advl-textil-test@yandex.ua](mailto:advl-textil-test@yandex.ua)

*У статті на основі проведення експериментальних досліджень геотекстильних матеріалів фірми DuPont марок SF-40, SF-56, SF-77 встановлено залежність граничної міцності на розрив від поверхневої густини, що дозволило підвищити достовірність отриманих результатів випробувань.*

**Ключові слова:** геотекстильні матеріали, поверхнева густина, гранична міцність на розрив.

**Вступ.** Ще десятиліття тому основним показником, який закладався в проектні рішення була поверхнева густина геосинтетичних матеріалів (ГМ). З часом провідні фірми за рахунок нових технологій добилися значного зменшення витрат матеріалу і відповідно зменшилась вагомість врахування поверхневої густини.

В той же час, при виготовленні геосинтетиків завжди спостерігається нерівномірність у витратах на одиницю площі матеріалу, що приводить до нерівномірності товщини виробу і в подальшому до варіації фізико-механічних характеристик геосинтетичних матеріалів та виробів. Роботи по встановленню меж розкиду показників поверхневої густини і впливу неоднорідності за цим показником на фізико-механічні властивості ГМ у нашій країні відсутні і вкрай обмежені закордоном.

Вибір матеріалу для конкретних умов будівництва та експлуатації дорожніх споруд визначається згідно норм [1]. Однак поверхнева густина при виборі ГМ не враховується.

**Мета дослідження.** Встановлення взаємозв'язку неоднорідності поверхневої густини геотекстильних матеріалів з міцністю на розрив для прогнозування варіації фізико-механічних показників властивостей геосинтетичних матеріалів.

**Результати проведених досліджень** У АДВЛ «Текстиль -ТЕСТ» проведено випробування г. еотекстильних матеріалів фірми DuPont марок SF-40, SF-56, SF-77, які є типовими представниками даного асортименту геотекстильних матеріалів, що використовуються в дорожньому будівництві, з метою виявлення взаємозв'язку між структурними і механічними характеристиками.

Основні технічні характеристики термоскріпленого геотекстилю ТУРАР за даними виробника наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Основні технічні характеристики термоскріпленого геотекстилю ТУРАР за даними виробника

Характеристики	Стандарт	Од. вимір.	SF 40	SF 56	SF 77
Поверхнева густина	EN 965	г/м <sup>2</sup>	136	190	260
Товщина при 2 кН/м <sup>2</sup>	EN 964-1	мм	0,45	0,54	0,65
Товщина при 200кН/м <sup>2</sup>	EN 964-1	мм	0,39	0,48	0,59
Енергія адсорбції	EN ISO 10319	кДж/м	3,7	5,8	9,7
Гранична міцність на розтяг	EN ISO 10319	кН/м	9,0	13,1	20,0
Видовження при граничній міцності	EN ISO 10319	%	52	55	55
Міцність при 5% видовженні	EN ISO 10319	кН/м	4,0	5,7	8,2

На рис. 1 наведено порівняння залежності граничної міцності на розтяг від поверхневої густини різних типів ГМ [2-3].

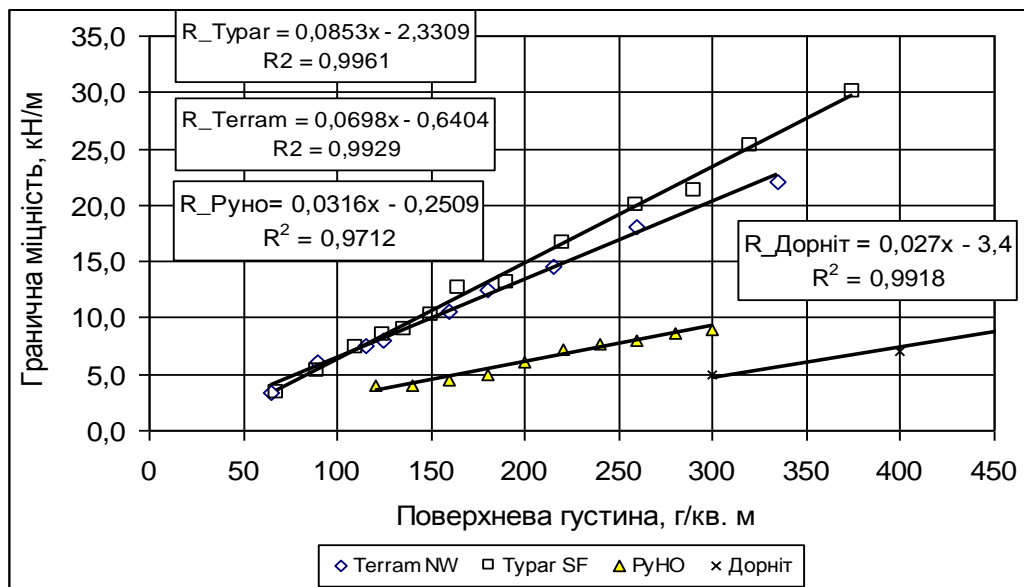


Рис. 1. Залежність граничної міцності на розтяг від поверхневої густини ГМ різних типів

Як видно із графіку для матеріалів одного і того ж виробника, виготовлених за тією ж технологією існує чітка лінійна залежність міцності з поверхневою густиною.

Для встановлення взаємозв'язку поверхневої густини елементарної проби і її розривних характеристик були відібрані точкові проби і підготовлені елементарні проби розміром 50 мм на 100 мм. (Стандартна ширина проби для визначення граничної міцності становить 200 мм [4]). Для проведення експерименту пробу перед випробуванням зважували для розрахунку поверхневої густини, а потім визначали її граничну міцність при розриві і подовження при граничній міцності. За середніми значеннями розраховували середньоквадратичне відхилення  $\sigma$ , коефіцієнт варіації  $V$  та межі розширеної невизначеності  $U$  (табл. 2).

Таблиця 2

Середні значення показників поверхневої густини, граничної міцності та видовження при граничній міцності, значення середньоквадратичного відхилення  $\sigma$ , коефіцієнта варіації  $V$  та меж розширеної невизначеності  $U$

марка ГМ	поверхнева густина, г/м <sup>2</sup>	розривне навантаження, Н	гранична міцність, кН/м	видовження, %	поверхнева густина, г/м <sup>2</sup>	розривне навантаження, Н	гранична міцність, кН/м	видовження, %
за довжиною								
SF-40	141	424	8,49	39,6	8,70	66,28	1,33	8,70
SF-56	187	508	10,16	38,5	5,45	113,28	2,27	5,45
SF-77	272	907	18,14	36,9	3,46	91,51	1,83	3,46
за шириною								
SF-40	133	293	5,87	36,1	9,59	57,68	1,15	9,59
SF-56	182	556	11,12	38,9	7,85	56,51	1,13	7,85
SF-77	263	894	17,88	39,2	5,51	92,52	1,85	5,51
коефіцієнт варіації $V$				межа розширеної невизначеності $U$				
за довжиною								
SF-40	6,26	-	15,62	21,97	18,61	139,74	2,79	18,34
SF-56	6,63	-	22,30	14,13	2,32	10,09	0,20	9,39
SF-77	26,13	-	238,81	11,48	13,28	192,92	3,86	7,30
за шириною								
SF-40	3,42	-	19,67	26,54	9,62	121,60	2,43	20,21
SF-56	4,25	-	10,17	20,17	16,34	119,14	2,38	16,55
SF-77	3,43	-	10,35	14,06	18,97	195,05	3,90	11,62

На наступному етапі досліджень за отриманими даними випробувань було здійснено кореляційний аналіз, результати якого представлено в в табл. 3.

Таблиця 3

Значення коефіцієнтів кореляції поверхневої густини, навантаження і подовження.

Коефіцієнти кореляції	довжина		ширина	
	$X_1, X_2$	$X_1, X_3$	$X_1, X_2$	$X_1, X_3$
SF-40	0,9274	0,5909	0,6467	0,6049
SF-56	0,9094	-0,338	0,6887	0,0751
SF-77	0,8919	0,557	0,7427	0,4448

Результати кореляційного аналізу в межах однієї марки не дозволяє зробити достовірні висновки, тому дані трьох вибірок були об'єднані та подальший аналіз виконувався для всього масиву даних випробувань різних марок геотекстилю. Залежність між поверхневою густиною та навантаженням для різних марок термоскріпленого геотекстилю за результатами зведених даних наведена на рис. 2.

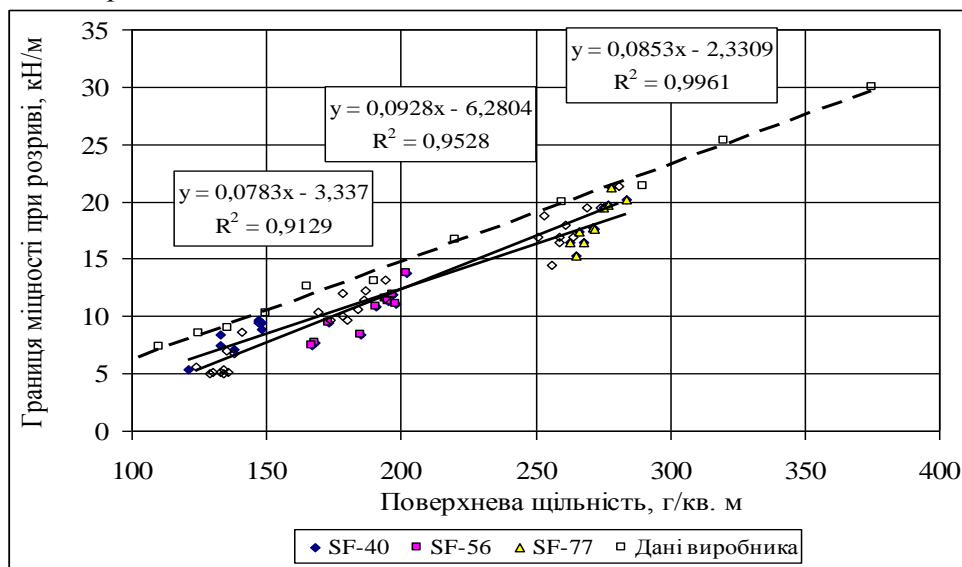


Рис. 2. Залежність між поверхневою густиною та граничною міцністю для різних марок термоскріпленого геотекстилю

Порівняння отриманих даних з паспортними даними виробника вказує на систематичне заниження міцності, що пов'язане з методикою випробувань вузькою смужкою (50 мм) в порівнянні з широкою смужкою (200 мм). Випробування проводили згідно [5], використовуючи зразки ГМ шириною 50 мм. Для перерахунку даних випробувань для стандартної ширини зразка 200 мм використовували кореляційну залежність для термоскріплених геотекстилів даного типу [6]:

$$R_{20} = (0,2263 \cdot Q_5 + 0,9673) \cdot 10 \quad (1)$$

де  $R_{20}$  – значення межі міцності, в кН/м, на розрив при стандартній ширині зразка 200 мм,  $Q_5$  – максимальне навантаження, кг, яке витримує зразок шириною 50 мм.

Перераховані значення граничної міцності за приведеною формулою представлено в табл. 5.

У результаті отримано лінійні залежності між поверхневою густиною та навантаженням за довжиною і шириною, для різних марок термоскріпленого геотекстилю після виправлення даних з врахуванням ширини смуги, що випробовується (рис. 3). Ці залежності максимально наближаються до даних виробника (коефіцієнт кореляції 0,91 ... 0,95).

Результати статистичної обробки більше 60 даних випробувань для геотекстилю Турат SF-56 за 2010 -2014 роки наведено в табл. 4.

На рис. 4 наведено порівняння полігону частот і нормальної кривої розподілу поверхневої густини термоскріпленого геотекстилю Турат SF-56.

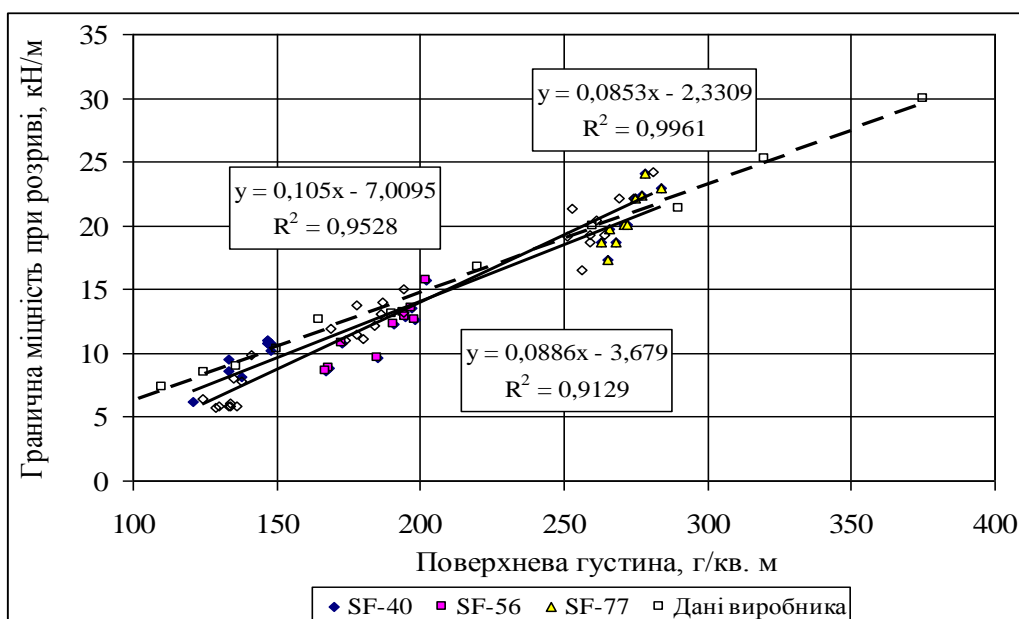


Рис. 3. Залежність між поверхневою густиною та навантаженням для різних марок термоскріпленого геотекстилю після виправлення даних з врахуванням ширини смуги

Таблиця 4

Результати статистичної обробки даних випробувань для геотекстилю Турар SF-56

Параметр	Поверхнева густина, г/м <sup>2</sup>	Гранична міцність (за результатами випробувань зразка 50 мм), кН/м	Гранична міцність (перерахована на 200 мм), кН/м	Коефіцієнт перерахунку	Видовження при граничній міцності, мм %	Навантаження при видовженні 5%, кН/м
дані виробника	190,0	-	13,10	-	52	
мінімум	167,0	8,58	11,91	0,94	24,90	4,44
максимум	220,0	15,73	16,44	1,40	62,70	7,32
середнє значення	192,6	12,47	14,10	1,14	42,04	6,01
СКВ	12,66	1,74	1,15	0,12	9,51	0,78
коєф. варіації	6,57	13,99	8,15	10,68	22,63	13,01



Рис. 4. Полігон частот і нормальна крива розподілу поверхневої густини термоскріпленого геотекстилю Турар SF-56

Щільність розподілу поверхневої густини за результатами статистичної обробки апроксимується нормальним законом

$$f(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi \cdot S_y}} \cdot e^{-\frac{(\gamma_i + \bar{\gamma})^2}{2 \cdot S_y^2}} \quad (2)$$

де параметри розподілу  $\bar{\gamma}$  – середнє значення поверхневої густини,  $S_y$  – середньоквадратичне відхилення (СКВ) поверхневої густини.

Як видно з результатів випробувань нерівномірність за поверхневою густиною впливає на розривні характеристики матеріалів. Як видно з графіків і таблиць між структурними і механічними властивостями існує тісний кореляційний зв'язок.

В той же час різниця між мінімальним і максимальним значеннями досліджуваних параметром дуже велика, тому за середнім значенням показника, як це встановлено стандартом, практично неможливо судити про можливі значення показника в партії продукції, а необхідно розглядати функцію щільності розподілу граничної міцності ГМ.

Для аналітичного способу рішення задача ставиться таким чином: нехай задана щільність розподілу  $f(x)$  випадкової величини  $Y$ , яка є відомою функцією  $\varphi$  від  $x$ , тобто

$$Y = f(x) \quad (3)$$

Очевидно, що ймовірність попадання випадкової величини  $y$  на елементарний проміжок  $dy$  дорівнює ймовірності попадання на проміжок  $dx$  випадкової величини  $x$ , тобто

$$P(y < Y < y + dy) = P(x < Y < x + dx)$$

Тоді, для знаходження щільності розподілу  $y$ , скористаємося відомою формулою теорії ймовірностей [7]

$$g(y) = f(\psi(y)) \cdot |\psi'(y)| \quad (4)$$

де  $\psi(y)$  – функція обернена заданій функції  $\varphi(x)$ .

Формула для встановлення міцності через густину є лінійною функцією, виду

$$f(x) = y = b_0 + b_1 \cdot x \quad (5)$$

де  $b_0$  та  $b_1$  – константи, отримані за результатами кореляції.

Для реального вирішення задачі по визначенню технологічного процесу виготовлення матеріалу із заданою міцністю з врахуванням статистичного розкиду витрат компонентів сировини і відповідно поверхневої щільності ГМ необхідно знати вид функції розподілу величини граничної міцності  $g(R_p)$ .

Тому нижче розглядаються аналітичний та графічний способи отримання функції розподілу [8].

#### Аналітичний спосіб встановлення функції щільності розподілу.

Виходячи із загального підходу, де визначається щільність розподілу суми непрямих випробуваннях та підставляючи обернену до гіперболічної функцію та її похідну в формулу (5) після спрощення шукана функція щільності випадкової величини граничної міцності ГМ має вид

$$g(R_p) = \frac{1}{\sqrt{2\pi \cdot b_1 \cdot S_y}} \cdot e^{-\frac{[-y - b_0 + \overline{M_x} \cdot b_1]^2}{b_1^2 \cdot 2 \cdot S_y^2}} \quad (6)$$

Таким чином, отримано нормальний закон щільності розподілу міцності  $g(R_p)$  від лінійної функції одного випадкового аргументу поверхневої густини  $\gamma$ , розподіленого за нормальним законом. Цей закон характеризується зміщеними параметрами середнього і СКВ.

Для розрахунку неоднорідності необхідно отримати аналітичні вирази для дисперсії та коефіцієнту варіації. Після підстановки констант формула для знаходження середнього значення міцності ГМ матиме вигляд

$$E(R_p) = b_0 + b_1 \cdot E(\bar{\gamma}) \quad (7)$$

Відповідно дисперсія  $V(R_p)$  і СКВ міцності ГМ визначатиметься за формулами:

$$V(R_p) = b_1^2 \cdot V(\bar{\gamma}) \quad (8)$$

$$S(R_p) = b_1 \cdot S(\bar{\gamma}) \quad (9)$$

Коефіцієнт варіації міцності дорівнює

$$C_{Rp} = \frac{b_1 \cdot S_{\gamma}}{b_0 + b_1 E(\bar{\gamma})} \quad (10)$$

Використовуючи отриману лінійну залежність (7) знаходимо середнє значення міцності

$$R_p = 0,086 \cdot 192,63 - 4,090 = 12,48 \text{ (кН/м)}$$

Середньоквадратичне відхилення (СКВ) дорівнює

$$S_y = 0,086 \cdot 12,66 = 1,09$$

Коефіцієнт варіації міцності становить 13,02%, що свідчить про достатньо високу точність отриманих залежностей.

#### Графоаналітичний спосіб встановлення функції щільності розподілу.

Графічний спосіб застосовують для спрощення розрахунків, візуалізації та представлення даних. Це дозволяє одночасно робити кількісний та якісний аналіз

Графоаналітичний спосіб використовує такий алгоритм:

а) на основі обробки експериментальних даних розраховується та в квадранті I будується гістограма або щільність розподілу поверхневої густини ГМ;

б) з використанням формул математичної статистики встановлюються параметри функції щільності нормального розподілу поверхневої густини ГМ  $f(\gamma)$  і в першому квадранті будується відповідна теоретична крива Гауса, яка описує експериментальні дані по визначенню поверхневої густини;

в) в квадранті II за формулою (4) будується графік лінійної функції залежності міцності на розрив (вісь ординат направлена вниз від максимального до мінімального значення міцності) від поверхневої густини (вісь абсцис);

г) в квадранті III вліво відкладається вісь абсцис, яка є частотами попадання в заданий інтервал значень міцності ГМ. По осі ординат розраховуються нові діапазони інтервалів значень  $R_p$  по відповідних діапазонах прогинів для яких відкладають частотності, рівні відповідним частотам для поверхневої густини в заданих діапазонах;

д) одержану гістограму описують відомими методами математичної статистики використовуючи формулу (4), і використовують в подальших розрахунках надійності.

На рис. 5. представлено результати такої побудови з використанням даних, одержаних на при випробуванні ГМ Турат SF 56. Як видно з приведеної номограми, при нормальному законі розподілу поверхневої густини, як випадкової величини, функція розподілу міцності симетрична і також апроксимується кривою Гауса зі зміщенням значень середнього і дисперсії.

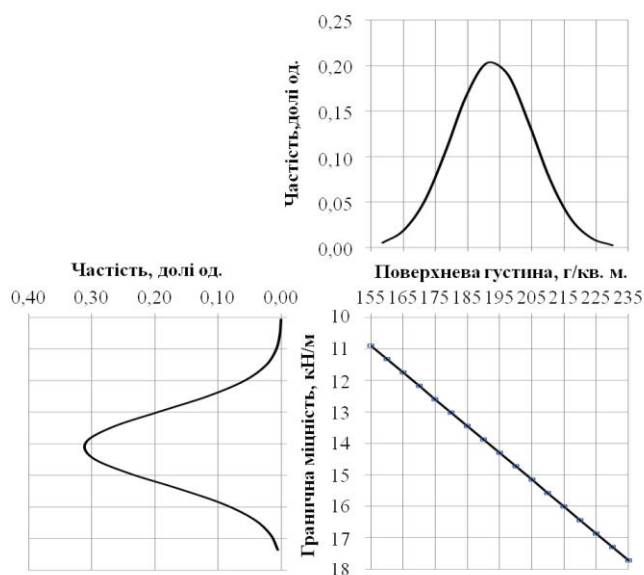


Рис. 5. Графічний спосіб встановлення функції розподілу граничної міцності на розрив геосинтетичних матеріалів за результатами визначення поверхневої густини

На рис. 6 наведено щільності розподілу міцності на розрив випробуваних геосинтетичних матеріалів, отримані за наведеним алгоритмом.

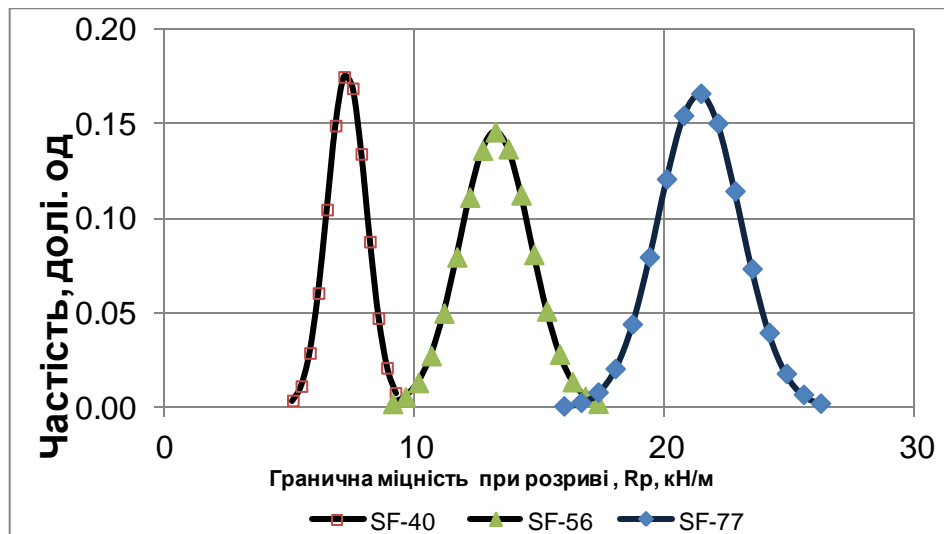


Рис. 6. Щільності розподілу міцності на розрив випробуваних геосинтетичних матеріалів, отримані за наведеним алгоритмом.

Таким чином, встановлено, що для отримання достовірних результатів випробувань характеристик міцності ГМ необхідно враховувати значення поверхневої густини, а також використовувати функцію щільності розподілу граничної міцності.

### Висновки

В результаті проведених досліджень встановлено систематичну невідповідність граничної міцності на розрив геотекстильних матеріалів фірми DuPont марок SF-40, SF-56, SF-77 даним, які заявляються в паспорті.

Для зменшення невідповідності необхідно встановлені розрахункові характеристики геотекстильних матеріалів врахувати при внесенні змін до ГБН В.2.3-218-544: 2014 “Застосування матеріалів геосинтетичних у дорожніх конструкціях. Основні вимоги” та розробці нового ДСТУ на заміну СОУ 45.2-00018112-025:2007 “Матеріали геосинтетичні. Методи випробувань”.

### Список літературних джерел

1. ГБН В.2.3-37641918-544:2014 Застосування геосинтетичних матеріалів у дорожніх конструкціях. – К.: Укравтодор, 2014. – 144 с.
2. Гамеляк І.П., Журба Г.В., Шикунів Є.В. Встановлення розрахункових характеристик геосинтетичних матеріалів. Автош. України. – К.: № 3, 2011. – С. 38-42.
3. Дмитриченко М.Ф., Дмитрієв М.М., Гамеляк І.П., Райковський В.Ф., Якименко Я.М. Надійність конструкцій дорожнього одягу. - Навч. посібник. К.: 2012. – 206 с.
4. СОУ 45.2-00018112-025: 2007 Матеріали геосинтетичні. Методи випробувань. Чинний від 01.03.2008.- К.: Укравтодор, 2007. – 109 с.
5. EN ISO 10319. Geotextiles – Wide-width tensile test (Геотекстиль. Випробовування на міцність при розтягненні широкої смуги).
6. Koerner R.M. Designing with Geosynthetics. 5th Edition, New Jersey, USA: 2005.
7. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика. – М.: Высш. школа, 1998. – 479 с.
8. Гамеляк І.П. Основи забезпечення надійності конструкцій дорожнього одягу: дис. ... доктора техн. наук: 05.22.11 / Гамеляк Ігор Павлович. – К., 2005. – 460 с.