

**Фрідріхсон В. Л., к.т.н., с.н.с., Кривоног О. І., к.т.н., с.н.с.,
Кривоног В. В., к.т.н., с.н.с.** (Інститут гідромеханіки НАН України,
м. Київ, igmgs@ukr.net)

ВИЗНАЧЕННЯ ПОРОВОЇ СТРУКТУРИ ТОНКИХ НЕТКАНИХ ГЕОТЕКСТИЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ АНАЛІТИЧНИМ МЕТОДОМ

В статті вивчено можливість використання аналітичного методу побудови кривої розподілу пор по діаметрам в діапазоні малих пор при дослідженні порової структури тонких рулонних нетканих волокнисто-пористих матеріалів методом просипання каліброваних частинок.

Порова структура волокнисто-пористих матеріалів визначає їх функціональні властивості: водопроникність, контактну стійкість і захоплюючу здатність, яка характеризує ступінь кольматації фільтра по відношенню до твердих частинок суспензії фільтраційного потоку.

В статті наведено результати досліджень розподілу пор по діаметрам в тонких нетканих волокнисто-пористих матеріалах, які отримано експериментальним шляхом за допомогою методу сухого просипання каліброваних піщаних частинок і аналітичним шляхом за допомогою степеневі функції, та обґрунтовано можливість використання цієї функції для побудови кривої розподілу пор по діаметрам в діапазоні малих пор.

Встановлено, що для тонких фільтруючих матеріалів, в яких доля пор розміром 0.05 мм і більше становить не менше 70%, аналітичне обчислення за допомогою степеневі функції кривої розподілу пор в усьому її діапазоні від максимальних до мінімальних діаметрів дає результат близький до експериментальних значень.

***Ключові слова:* геотекстильні матеріали; порова структура; розподіл пор по діаметрам.**

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В теорії фільтрації рідин і газів в штучних волокнисто-пористих матеріалах відомі ряд формул для визначення середнього діаметра пор фільтра [1; 2]. Однак середній діаметр пор фільтра не дає повної характеристики

порової структури волокнисто-пористого матеріалу, а саме розподілу пор по діаметру.

Існують різні методи визначення діаметрів пор фільтруючих матеріалів. Для штучних об'ємних волокнисто-пористих матеріалів використовують метод пропресовування газу крізь змочений фільтр. Цей метод дозволяє побудувати криву розподілу пор по діаметрам в діапазоні від їх максимального розміру до певного діаметра і не дає можливості визначити розміри малих пор, які суттєво впливають на розмір середнього діаметра пор фільтра при його визначенні, тому криву розподілу розмірів пор в діапазоні їх малих значень описують за допомогою степеневої функції, яка в інтегральній формі має вид [3; 4]

$$P_{(x)} = A \cdot e^{-\alpha x^P}, \quad (1)$$

де x – діаметр пори; α і P – коефіцієнти, які визначаються експериментально;

$A = 1$ – стала нормування.

Для тонких (до 3 мм) рулонних нетканих волокнисто-пористих матеріалів при визначенні розподілу пор по діаметрам використовують методи мокрого і сухого просипання каліброваних частинок або скляних бусинок крізь фільтр [2; 5].

Обмеженням для використання цього методу є випадки, коли діаметр основних пор в фільтрі менше 0.05 мм, або можливе прилипання каліброваних частинок ґрунту діаметром менше 0.1 мм до елементарних волокон, що призводить до недостатньо достовірних результатів досліджень.

Основні цілі дослідження

В розвиток методу просипання каліброваних частинок крізь фільтр при визначенні кривої розподілу пор в діапазоні їх малих діаметрів ($d^o < 0.1$ мм), обґрунтувати можливість використання степеневої функції (1), яка раніше при застосуванні цього методу не використовувалась.

В такий спосіб, криву розподілу пор по діаметрам можна отримати за допомогою методу сухого просипання каліброваних частинок (ділянка кривої в межах діаметрів пор $d_{\max}^o > d_i^o > d_1^o$) і степеневої функції (ділянка кривої $d_1^o > d_i^o > 0$).

Точка d_1^o знаходиться на ділянці кривої розподілу пор, яку визначено методом просипання, а також добре описується

степеневою функцією.

Результати роботи та їх обґрунтування

Було досліджено 14 зразків різних типів тонких нетканних волокнисто-пористих матеріалів, які відрізняються за своїми структурними характеристиками, способами виробництва та матеріалами.

Перший тип – фільтруючий матеріал з поліетиленових волокон, отриманий способом пневмоекструзії, який представляє собою тонкий (до 2 мм) нетканний матеріал з волокон діаметром 0.08–0.1 мм, розташованих неорієнтовно в площині фільтра і з'єднаних між собою в місці їхнього контакту (зразки №№ 1–11).

Другий тип – нетканний геотекстильний матеріал різних закордонних виробників з поліпропіленових волокон діаметром 0.03–0.05 мм неорієнтованих в площині фільтра і скріплених термічним способом (зразки №№ 12–13).

Третій тип – нетканний геотекстильний матеріал вітчизняного виробника з поліефірних волокон діаметром ~0.017 мм неорієнтованих в площині фільтра і скріплених термічним способом (зразок № 14).

В табл. 1 наведено дані вихідних структурних параметрів досліджених зразків.

Таблиця 1

№ зразка	Об'ємна вага, γ_f , г/см ³	Товщина, δ_o , мм	Діаметр елементарного волокна, $d_{e,в}$, мм	Пористість, n
1	0.170	0.47	0.096	0.82
2	0.180	0.65	0.20	0.81
3	0.130	0.38	0.10	0.86
4	0.180	0.61	0.10	0.80
5	0.298	1.71	0.105	0.086
6	0.328	0.98	0.105	0.655
7	0.364	2.02	0.105	0.611
8	0.347	1.80	0.105	0.635
9	0.318	1.86	0.105	0.665
10	0.290	1.38	0.105	0.69
11	0.322	1.18	0.105	0.66
12	0.289	0.47	0.050	0.68
13	0.138	1.29	0.030	0.85
14	0.131	1.16	0.017	0.90

По результатам дослідження розподілу пор по діаметрам методом сухого просипання в цих зразках побудовано графіки

залежностей $P_{(x)} = f\left(\frac{d_i^o}{d_{\max}^o}\right)$, (рис. 1–3), де $P_{(x)}$ – вірогідність діаметра d_i^o на кривій розподілу пор, а d_{\max}^o – максимальний діаметр пор на цій кривій.

На рис. 1 маємо явно виражений характер кривої, яка може бути описана степеневою функцією

$$P_{(x)} = e^{-\alpha x^P}, \quad (2)$$

де $x = \frac{d_i^o}{d_{\max}^o}$.

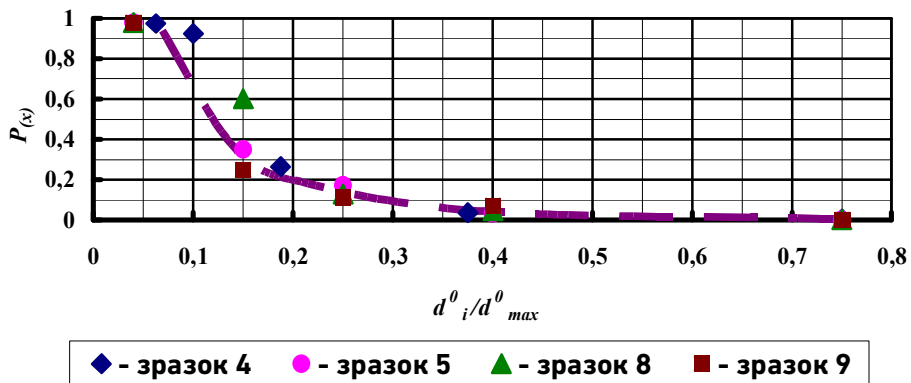


Рис. 1. Графіки залежностей $P_{(x)} = f\left(\frac{d_i^o}{d_{\max}^o}\right)$

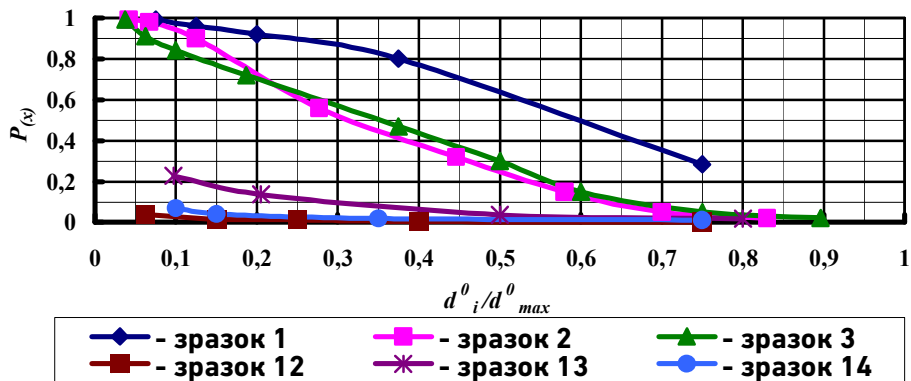


Рис. 2. Графіки залежностей $P_{(x)} = f\left(\frac{d_i^o}{d_{\max}^o}\right)$

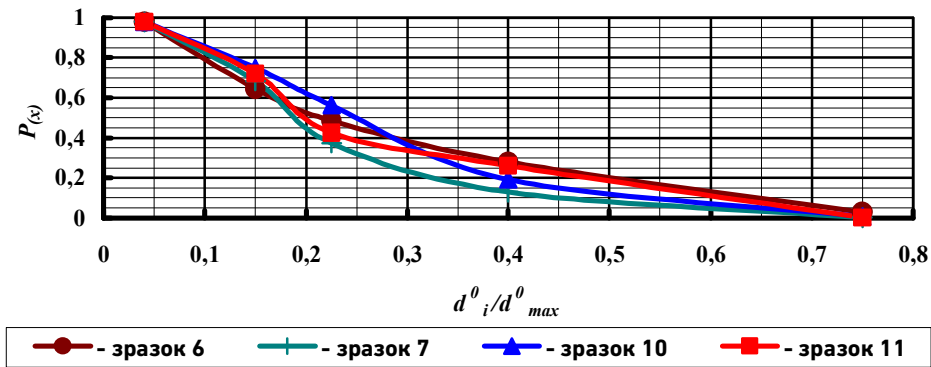


Рис. 3. Графіки залежностей $P_{(x)} = f\left(\frac{d_i^o}{d_{max}^o}\right)$

З графіків на рис. 2 видно, що при визначенні порової структури нетканих геотекстильних матеріалів в зразках № 12, № 13 і № 14 метод сухого просипання каліброваних піщаних частинок можна використовувати, коли розмір цих частинок $d \geq 0.1$ мм.

Графіки, які представлено на рис. 1–3, схожі, але дещо відрізняються між собою.

На рис. 2 та рис. 3 характер кривих не має явно вираженої степеневій залежності. В таких випадках, зазвичай, можна вибрати функціональну залежність з числа найбільш простих і порівняти їх графіки з графіком заданої функції. В нашому випадку для графіків, представлених на рис. 2 та рис. 3 для визначення їх функціональної залежності, виберемо також степеневу функцію.

За методикою, яку наведено в роботах [3; 4], визначаємо коефіцієнти α і P , для чого логарифмуємо функцію (2)

$$\begin{aligned} \ln P_{(x)} &= -\alpha x^P \ln e \\ \ln \ln P_{(x)} &= -\ln \alpha + P \ln x \end{aligned} \quad (3)$$

За допомогою графіків в системі координат $\ln \ln \frac{1}{P_{(x)}} - \ln \frac{d_i^o}{d_{max}^o}$ для кожного зразка, а саме на ділянках графіків, що наближаються до прямої лінії і описуються рівнянням $\ln \ln \frac{1}{P_{(x)}} = a \ln \frac{d_i^o}{d_{max}^o} + b$, визначаємо коефіцієнти a і b , де $a = P$, $b = -\ln \alpha$, та характерну точку d_1 . Отримані результати приведено в табл. 2.

Таблиця 2

Зразок №	d_{\max}^o , мм	$d_{\text{сеп}}^o$, мм (розрахунок)	$d_{\text{сеп}}^o$, мм (експеримент)	d_1^o , мм	P	α
1	1.00	0.321	0.58	0.668	2.08	2.203
2	3.00	0.602	1.15	1.360	1.92	4.47
3	2.00	0.368	0.61	0.736	2.01	7.51
4	2.00	0.190	0.32	0.348	4.00	1091
5	0.50	0.037	0.06	0.066	3.06	497.7
6	0.50	0.068	0.13	0.166	1.47	5.204
7	0.50	0.053	0.10	0.125	1.70	10.74
8	0.50	0.062	0.07	0.091	1.83	22.52
9	0.50	0.029	0.05	0.061	2.05	75.59
10	0.50	0.076	0.13	0.158	1.85	8.32
11	0.50	0.066	0.13	0.151	2.00	11.0
12	0.50	0.020	0.02	0.075	0.95	16.36
13	0.25	0.023	0.03	0.075	0.95	5.65
14	0.50	0.016	0.02	0.025	3.50	36060

Функцію (2) можна представити як:

$$P_{(x)} = e^{-\alpha x^P} = \exp \left[-\alpha \left(\frac{d_i^o}{d_{\max}^o} \right)^P \right]. \quad (4)$$

При визначених α і P проводимо обчислення для побудови кривих розподілу пор в діапазоні $d_1^o > d_i^o > 0$. Деякі результати цих обчислень наведено в табл. 3.

Результати обчислення діаметра пор в діапазоні $d_1^o > d_i^o > 0$ табл. 3.

Таблиця 3

Зразок № з/п	d_i^o , мм	$\frac{d_i^o}{d_{\max}^o}$	$\alpha \left(\frac{d_i^o}{d_{\max}^o} \right)^P$	$P_{(x)} = \exp \left[-\alpha \left(\frac{d_i^o}{d_{\max}^o} \right)^P \right]$	Значення характерних параметрів
1	2	3	4	5	6
№ 2	2.500	0.833	3.14	0.043 (0.02)	$d_{\max}^o = 3.0$ мм $d_1^o = 1.36$ мм $P = 1.92$ $\alpha = 4.467$
	1.500	0.500	1.18	0.31 (0.32)	
	1.360	0.45	0.96	0.38	
	1.000	0.33	0.53	0.59	
	0.700	0.23	0.26	0.77	
	0.400	0.133	0.093	0.91	

продовження табл. 3

	0.300 0.200 0.100	0.10 0.067 0.033	0.054 0.025 0.006	0.95 0.98 1.0	
№ 6	0.375 0.200 0.160 0.140 0.120 0.100 0.080 0.060 0.040 0.020 0.010	0.75 0.40 0.32 0.28 0.24 0.20 0.16 0.12 0.08 0.04 0.002	3.41 1.35 0.97 0.80 0.64 0.49 0.35 0.23 0.13 0.05 0.016	0.033 (0.029) 0.26 (0.28) 0.38 0.45 0.53 0.61 0.70 0.79 0.88 0.95 0.99	$d_{\max}^o = 0.5 \text{ мм}$ $d_1^o = 0.166 \text{ мм}$ $P = 1.47$ $\alpha = 5.204$
№ 8	0.375 0.200 0.125 0.091 0.080 0.060 0.040 0.020 0.010	0.75 0.40 0.25 0.182 0.16 0.12 0.08 0.04 0.02	- 4.21 1.78 0.996 0.79 0.46 0.22 0.06 0.017	- 0.015 (0.047) 0.17 (0.13) 0.37 0.45 0.63 0.80 0.94 0.98	$d_{\max}^o = 0.5 \text{ мм}$ $d_1^o = 0.091 \text{ мм}$ $P = 1.83$ $\alpha = 22.52$

Примітка: В дужках наведено результати експериментальних досліджень

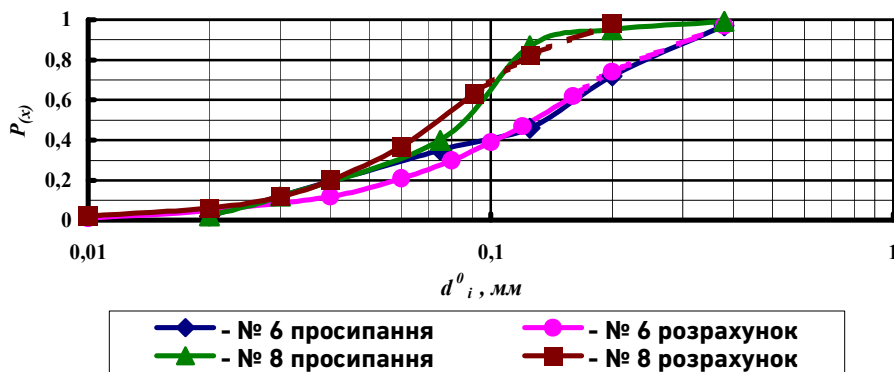


Рис. 4. Інтегральні криві розподілу пор в зразках № 6 і № 8, які отримано методом просипання і розрахунком

В цій таблиці для порівняння з експериментальними даними також наведено результати обчислення за допомогою степеневі функції (4) в зоні $d_{\max}^o > d_i^o > d_1^o$.

Для зразків, результати обчислення яких наведено в табл. 3, побудовано інтегральні криві розподілу пор по діаметрам, де верхню частину кривих до точки d_1 побудовано по результатам методу сухого просипання каліброваних піщаних частинок, а нижню – по степеневій залежності (рис. 4 і рис. 5).

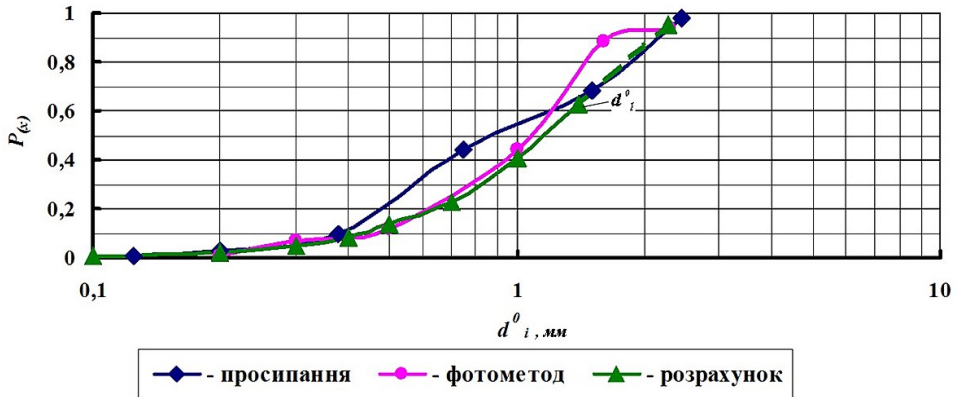


Рис. 5. Інтегральні криві розподілу пор в зразку № 2, які отримано методом просипання, фотометодом і розрахунком

На рис. 5 показано криві розподілу пор по діаметрам, які було отримано методом сухого просипання, фотометодом і по результатам обчислення по степеневій функції. Як бачимо, метод обчислення кривої розподілу пор по діаметрам по степеневій функції дає результат близький до експериментальних значень для матеріалів, в яких доля пор розміром 0.05 мм і більше становить не менше 70%.

Середній діаметр пор в діапазоні $d_{\max}^o > d_i^o > d_1^o$ було визначено як середню величину математичного очікування

$$d_{\text{сеп}}^{oI} = \sum_{i=1}^n P_i d_i^o, \quad (5)$$

а в зоні пор $d_1^o > d_i^o > 0$ – як математичне очікування функції розподілу [3; 4]

$$\bar{d}_{\text{сеп}}^o = x_o \Gamma_{t_1} \left(\frac{1}{P} + 1 \right), \quad (6)$$

де $\bar{d}_{cep}^o = \frac{d_{cep}^{oII}}{d_{max}^o}$, $x_o = d^o$ при $P_{(d^o)} = e^{-1}$, Γ_{t_1} – неповна гамма-функція,

$$t_1 = \left(\frac{d_1}{d^o} \right)^P.$$

Розмір середнього діаметра пор d_{cep}^o в діапазоні від d_{max}^o до d_{min}^o було обчислено за методикою, яку наведено в роботах [3; 4].

При обробці отриманих результатів досліджень було встановлено залежність середнього діаметра пор від структурних параметрів фільтра $d_{cep}^o = f\left(\frac{d_{e.в}}{n \cdot \delta_o}\right)$, на підставі якої отримано експериментальну формулу:

$$d_{cep}^o = 8.32 \left(\frac{d_{e.в}}{n \cdot \delta_o} \right)^2. \quad (7)$$

В табл. 2 приведено значення середніх діаметрів пор d_{cep}^o , які отримано по розрахунку і по результатам дослідження розподілу пор в фільтрах методом сухого просипання в зразках фільтрів з поліетиленових волокон. Як бачимо, по розрахунку, в порівнянні з методом сухого просипання, маємо зменшення d_{cep}^o в деяких зразках в 1.9 рази. На нашу думку, це є наслідком впливу малих пор діаметром менше 0.05 мм.

Висновки

1. При дослідженні розподілу пор по діаметрах в тонких нетканих геотекстильних матеріалах методом сухого просипання для побудови кривої розподілу пор в діапазоні їх малих розмірів можна використовувати степеневу функцію.

2. Для фільтруючих матеріалів, в яких доля пор розміром 0.05 мм і більше становить не менше 70%, аналітичне обчислення за допомогою степеневі функції кривої розподілу пор в усьому її діапазоні від d_{max} до d_{min} дає результат близький до експериментальних значень.

1. Патрашев А. Н., Праведный Г. Х. Инструкция по проектированию обратных фильтров гидротехнических сооружений. ВСН-02-65. М. : Энергия, 1965. 88 с. 2. Дренаж с волокнистыми фильтрами для защиты территорий от подтопления / Пивовар Н. Г., Бугай Н. Г., Фридрихсон В. Л. и др. К. : Институт гидромеханики НАНУ, 2000. 332 с. 3. Пивовар Н. Г., Бугай Н. Г., Рычко В. А. Дренаж с волокнистыми фильтрами. К. : Наук. думка, 1980. 214 с. 4. Бугай Н. Г. Размер пор в волокнистых фильтрах. *Мелиорация и водное хозяйство*. К. : Урожай, 1974. Вып. 29. С. 94–101. 5. Fayoux D. Filtration hydrodynamique des sols par des textiles. *Colloque International sur l'emploi des textiles en Geotechnique*. Paris, 1977. P. 68–80.

REFERENCES:

1. Patrashev A. N., Pravednyi H. Kh. Ynstruktsiya po proektyrovanyiu obratnykh fyltrov hydrotekhnicheskyykh sooruzheniy. VSN-02-65. M. : Enerhiya, 1965. 88 s. 2. Drenazh s voloknystymy fyltramy dlia zashchity terrytoryi ot podtopleniya / Pyvovar N. H., Buhai N. H., Frydrykhson V. L. y dr. K. : Ynstytut hydromekhanyky NANU, 2000. 332 s. 3. Pyvovar N. H., Buhai N. H., Rychko V. A. Drenazh s voloknystymy fyltramy. K. : Nauk. dumka, 1980. 214 s. 4. Buhai N. H. Razmer por v voloknystykh fyltrakh. *Melyoratsiya y vodnoe khoziaistvo*. K. : Urozhai, 1974. Vyp. 29. S. 94–101. 5. Fayoux D. Filtration hydrodynamique des sols par des textiles. *Colloque International sur l'emploi des textiles en Geotechnique*. Paris, 1977. P. 68–80.

Fridrihson V. L., Candidate of Engineering (Ph.D.), Senior Research Fellow, Kryvonoh A. I., Candidate of Engineering (Ph.D.), Senior Research Fellow, Kryvonoh V. V., Candidate of Engineering (Ph.D.), Senior Research Fellow (Institute of Hydromechanics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, igmggs@ukr.net)

DETERMINATION OF THE POROUS STRUCTURE OF THIN NONWOVEN GEOTEXTILE MATERIALS BY ANALYTICAL METHOD

The article explores the feasibility of employing an analytical method to generate a curve depicting the distribution of pores based on diameters within the small pores range when investigating the pore structure of thin rolled non-woven fibrous porous materials using the technique of scattering calibrated particles.

The pore structure of fibrous-porous materials determines their functional properties, including water permeability, contact

resistance, and absorbency, which characterize the degree of filter clogging in relation to solid particles in the suspension of the filtration flow.

The article presents the results of studies on the distribution of pores by diameters in thin non-woven fibrous porous materials, obtained experimentally using the dry scattering method of calibrated sand particles and analytically using a power function. Additionally, the justification for utilizing this function to create the pore distribution curve by diameters within the small pores range is provided.

It was determined that for thin filter materials with a proportion of pores sized 0.05 mm or more constituting at least 70%, the analytical calculation using the power function of the pore distribution curve across its entire range, from maximum to minimum diameters, yields results close to the experimental values.

Keywords: geotextile materials; pore structure; pore diameter distribution.