



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, igmggs@ukr.net)

ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗПОДІЛУ ПОР ПО РОЗМІРАМ НЕТКАНИХ ВОЛОКНИСТО-ПОРИСТИХ МАТЕРІАЛІВ

В статті приведено результати досліджень порової структури різних типів нетканих волокнисто-пористих матеріалів, як об'ємних, так і тонких, які відрізняються за своїми структурними характеристиками, складом матеріалу і методами обробки.

Порова структура вивчалась за допомогою комплексної методики, а саме:

– розподіл переважної частини пор більшого розміру, які за площею займають більш ніж 50% від загальної площі пор, було досліджено експериментальним шляхом методом просипання каліброваних піщаних частинок крізь фільтр, фотометодом і методом пропресовування повітря крізь змочений фільтр;

– розподіл пор по діаметрах в зоні малих їх розмірів було виконано аналітичним методом за степеневою функцією.

За результатами досліджень отримано узагальнені залежності характерних параметрів порової структури нетканих волокнисто-пористих фільтрів від їх структурних характеристик, на основі яких отримано експериментальні формули для визначення величини d_{50}^o і d_{90}^o , що дає можливість вирахувати величину вірогідності $P_{d_u}^o$

розрахункового діаметра фільтраційного ходу d_u^o і спрогнозувати можливий ступінь кольматації фільтра в період його експлуатації.

Ключові слова: неткані волокнисто-пористі матеріали; порова структура.

Вступ. Неткані волокнисто-пористі фільтруючі матеріали широко застосовуються в сучасних конструкціях дренажів в гідротехнічному, цивільному та дорожньому будівництві [1–4]. Чинні в будівельній індустрії нормативні документи регламентують використання нетканих волокнисто-пористих матеріалів, але, як показує практика, конструкції з фільтруючими матеріалами, які підбрано згідно з цими нормативами, не завжди забезпечують експлуатаційну надійність споруд, тому що недостатньо враховується

структурна будова цих матеріалів.

Структурна будова нетканих волокнисто-пористих фільтруючих матеріалів визначається технологією їх виробництва, при якій елементарні волокна, довжина яких значно більше за їх діаметр, розміщені пошарово в площі полотна. Порова структура таких матеріалів залежить від масової щільності полотна та діаметра елементарних волокон і стабілізується при товщині фільтра $\delta \geq 10 d_{e.v.}$, де $d_{e.v.}$ – діаметр елементарного волокна [5].

Так як порова структура нетканих волокнисто-пористих матеріалів визначає їх функціональні властивості, а саме водопроникність, контактну стійкість і ступінь колюматції фільтра твердими частинками суспензії фільтраційного потоку, то згідно структурних теорій будови пористого матеріалу його функціональні властивості залежать від середнього діаметра пор фільтра і функції розподілу пор по діаметрах [5; 6].

Тому для більш обґрунтованого підбору фільтруючих матеріалів до конкретних умов їх експлуатації при проєктуванні будівельних конструкцій важливо мати, крім паспортних фізико-механічних характеристик цих матеріалів, дані про їх порову структуру.

Задачі досліджень. Дослідження порової структури різних типів нетканих волокнисто-пористих матеріалів, як об'ємних, так і тонких, які відрізняються за своїми структурними характеристиками, складом матеріалу і методами обробки.

Мета досліджень. Метою проведених досліджень є отримання узагальнених емпіричних залежностей характерних параметрів порової структури від структурних характеристик матеріалів.

Методика досліджень. Дослідження порової структури нетканих волокнисто-пористих матеріалів були виконані за допомогою комплексної методики. Розподіл переважної частини пор більшого розміру, які за площею займають більш як 50% від загальної площі пор, було досліджено експериментальним шляхом методом просипання каліброваних піщаних частинок крізь фільтр, фотометодом і методом пропресовування повітря крізь змочений фільтр. Побудову кривої розподілу пор по діаметрах в зоні малих їх розмірів було виконано аналітичним методом за степеневою функцією.

Результати роботи. Було досліджено 5 зразків фільтрів з нетканих волокнисто-пористих матеріалів, виготовлених способом пневмоекструзії зі застосуванням різних методів обробки, основні паспортні характеристики яких приведено в табл. 1.

Визначення діаметрів елементарних волокон у досліджуваних зразках виконувалося за допомогою стереоскопічного мікроскопа зі

Таблиця 1

Паспортні характеристики досліджених зразків нетканних волокнисто-пористих матеріалів						
№ зразка	Склад	Поверхнев а щільність $\gamma_s, \text{Г/М}^2$	Товщина δ_ϕ , при тиску $P = 2 \text{ кН/М}^2$, мм	Масова щільність $\gamma_\phi, \text{Г/СМ}^3$	Діаметр елементарного волокна, $d_{e,v}, \text{ММ}$	Метод обробки матеріалу
1	Волокно поліетиленове	49...735	0.38...2.02	0.13...0.364	~ 0.100	Пневмоекструзія поліетиленових волокон і термічне з'єднання в місці їх контакту
2	Волокно поліефірне – 45%, волокно БК – 35%, волокно поліпропіленове – 100%	580	15.0	0.039	~ 0.040	Термічна усадка за рахунок низькоплавного полімера БК, що забезпечує ефект склеювання
3	Волокно поліпропіленове – 100%	300	1.80	0.167	~0.026	Механічне скріплення + термічне зміцнення з обох сторін
4	Волокно поліпропіленове – 100%	136	0.47	0.289	~0.050	Термічне скріплення
5	Волокно поліпропіленове – 100%	164	1.45	0.113	~0.030	Термічне скріплення

шкалою для визначення лінійних розмірів при 16–32-кратному збільшенні. Для кожного зразка вимірювався діаметр 100–150 волокон на площі близько 1 см^2 та визначався їх середній діаметр $d_{e.v.}$ як середнє арифметичне всіх вимірювань. У деяких зразках діаметр волокон змінювався трохи, в інших – мінімальний і максимальний діаметри відрізнялися в кілька разів.

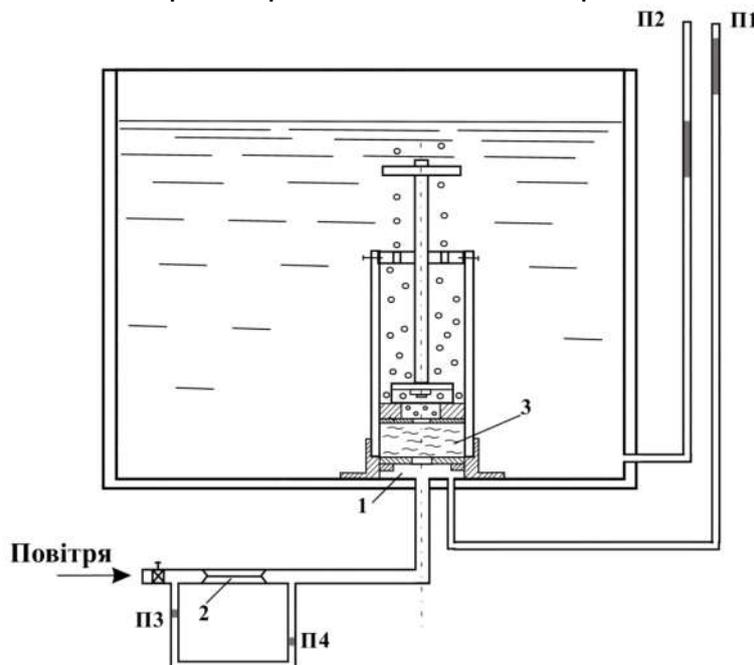


Рис. 1. Схема експериментальної установки

Дослідження порової структури фільтрів з поліетиленових волокон, зразок 1, приведені в нашій роботі [7].

Для визначення розподілу пор більших розмірів в зразках 2–5 було виготовлено експериментальну установку для дослідження розподілу пор по площі методом пропресовування повітря (рис. 1).

При проведенні дослідів в порожнину під фільтром 1 через реометр 2 подавалось повітря дуже малими порціями, для того, щоб зафіксувати по п'єзометрам П1 і П2 мінімальний надмірний тиск P_{\min} , при якому з'являлася перша, барботована крізь фільтр 3, бульбашка повітря. При збільшенні тиску під фільтром збільшувалась кількість бульбашок, а саме працюючих пор. Зафіксовані під час досліду по п'єзометрам П1 і П2 перепади тиску на фільтрі ΔP_{ϕ} і реометрі ΔP_{ρ} – по п'єзометрам П3 і П4 були використані для розрахунку витрат повітря та його об'ємної швидкості при проходженні крізь робочу площу фільтра, яка дорівнювала 0.785 см^2 .



Об'ємна швидкість проходження повітря необхідна для подальших розрахунків по визначенню розподілу пор по площі та діаметрам.

Розрахунок максимального діаметра пори d_{\max}^o , яка починає барботувати при P_{\min} , проведено згідно відомої математичної залежності між радіусом капіляра і тиском газу, який необхідний для подолання сил поверхневого натягу, за формулою:

$$d_{\max}^o = \frac{4\sigma \cos\varphi}{P_{\min}}, \quad (1)$$

де σ – коефіцієнт поверхневого натягу, $\sigma = 73.27$ дин/см² при температурі води $t_b = 15^\circ\text{C}$;

φ – кут змочування для досліджуваних фільтрів, які вироблено з волокон і яким характерні добрі властивості до змочування, прийнято $\varphi = 45^\circ$.

Відповідно, максимальна площа пори

$$S_o = \frac{\pi (d_{\max}^o)^2}{4}. \quad (2)$$

Ефективну площу пор фільтра визначали за формулою:

$$S_{nop} = S_o \cdot e^{k(P-P_{\min})}, \quad (3)$$

де $e^{k(P-P_{\min})} = V$ – об'ємна швидкість проходження повітря; P – тиск повітря; k – експериментальний коефіцієнт, який вираховували за результатами досліду по кожному з досліджених зразків.

Величину вірогідності $P_{(x)}$ ефективної площі пор S_i відповідного діаметра d_i^o при тиску P визначали за допущенням, що сумарна площа пор S_{nop} на одиницю площі фільтра дорівнює пористості n .

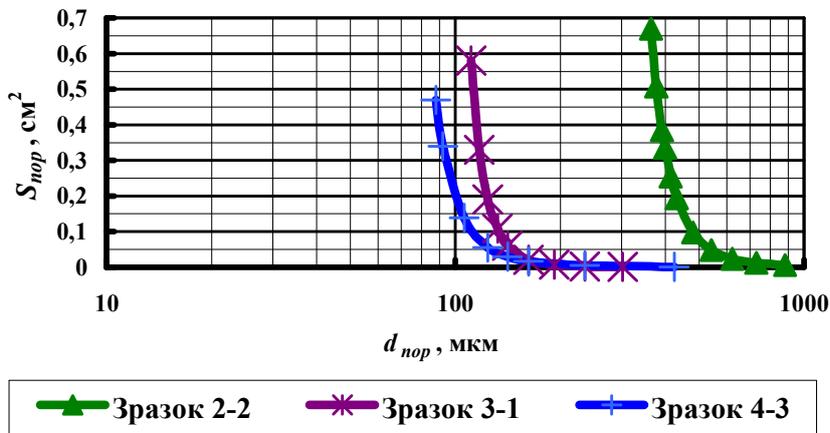
$$S_{nop} = \frac{\pi \cdot d^2}{4} n, \quad (4)$$

де $\frac{\pi d^2}{4}$ – робоча площа фільтра, яка в дослідах дорівнювала 0.785 см².

Таким чином, вірогідність ефективної площі пор визначається згідно з формулою (4)

$$P_{(x)} = \frac{S_{nop}}{0.785 n}. \quad (5)$$

За результатами дослідів для зразків 2, 3, 4, 5 побудовано графіки залежностей



$S_{пор} = f(d_{пор})$, частину з яких приведено на рис. 2.

Аналіз отриманих графіків дозволяє стверджувати, що метод пропресовування повітря крізь змочений фільтр можна

Рис. 2. Графіки залежності $S_{пор} = f(d_{пор})$

використовувати при дослідженні порової структури нетканих волокнисто-пористих матеріалів, як об'ємних, так і тонких, для визначення переважно більшої частини їх пор, але не у всьому діапазоні існуючих пор. Це є очевидним, оскільки функція розподілу пор по радіусам r не справедлива при $r \rightarrow 0$:

$$F_r = \frac{k\sigma}{\pi^2 r^5} \cdot e^{-\frac{2k\sigma}{r}} \quad (6)$$

Тому метод пропресовування повітря крізь змочений фільтр дозволяє визначити розподіл пор в нетканих волокнисто-пористих матеріалах на ділянці в діапазоні пор більших діаметрів $d_{max}^o \rightarrow d_1^o$.

В діапазоні пор менших діаметрів $d_1^o > d_i^o \rightarrow 0$ криву розподілу пор по діаметрах було описано за допомогою степеневої функції, яка в інтегральній формі має вигляд [8]:

$$P_{(x)} = A e^{-\alpha x^P}, \quad (7)$$

де α і P – параметри функції розподілу, які було визначено по результатам досліджень; A – коефіцієнт, який дорівнює сумарній площі всіх пор, але оскільки площу пор виражено в долях від загальної площі, то $A = 1$; x – діаметр пори.

В результаті проведених експериментальних досліджень і аналітичних розрахунків для досліджених зразків нетканих волокнисто-пористих матеріалів побудовано інтегральні криві розподілу пор по діаметрах в діапазоні $d_{max}^o - d_{min}^o$, частину з яких приведено на рис. 3.



Порову структуру зразка 1 було визначено методом просипання каліброваних піщаних частинок + аналітичний метод, порова структура зразків 2–5 методом пропресовування повітря + аналітичний метод.

В табл. 2 приведено структурні параметри досліджених зразків і, відповідно до них, основні характеристики їх порової структури, які отримано з кривих розподілу пор по діаметрах цих зразків.

В результаті аналізу приведених на рис. 3 інтегральних кривих розподілу пор по діаметрах було отримано узагальнені залежності характерних параметрів порової структури нетканих волокнисто-пористих матеріалів від їх основних структурних характеристик, за допомогою яких можна буде спрогнозувати фільтраційні і захисні властивості цих матеріалів, не проводячи спеціальних досліджень.

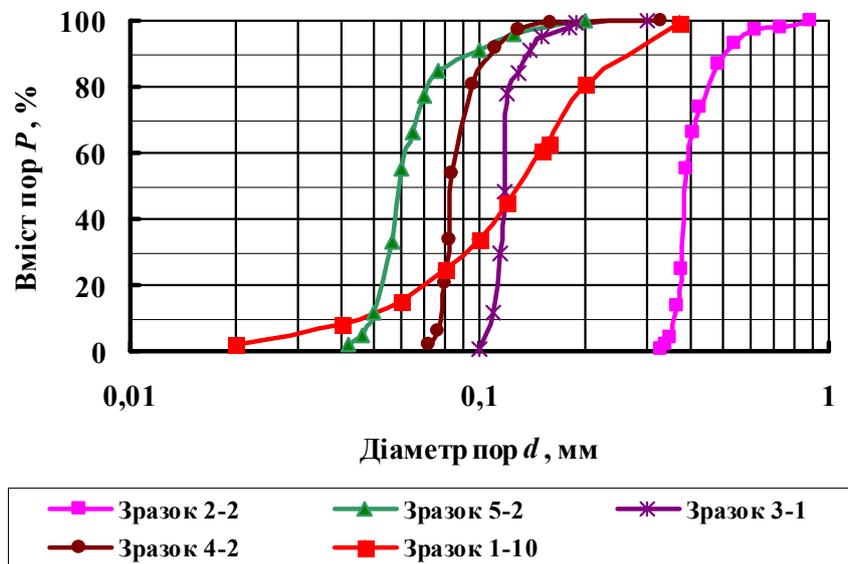


Рис. 3. Інтегральні криві розподілу пор по діаметрах

Характерним узагальненим параметром порової структури є середній діаметр пор d_{50}^o , який залежить як від масової щільності, так і від діаметра елементарного волокна, що наглядно видно з рис. 4, на якому для досліджених зразків приведено залежність $d_{50}^o = f(\gamma_\phi)$.

Якщо вважати, що середній діаметр пори характеризує криву розподілу пор по діаметрах, то, судячи з приведених на рис. 4 результатів досліджень, можна стверджувати, що порова структура нетканих волокнисто-пористих матеріалів стабілізується при різній масовій щільності в залежності від діаметра елементарного волокна.

Різну масову щільність зразків 2–5 було отримано за рахунок їх стиснення.

Таблиця 2

Основні структурні параметри та характеристики порової структури зразків фільтрів

№ досліду з/п	γ_{ϕ} , г/см ³	δ_{ϕ} , мм	$d_{e.в.}$, мм	n	d_{90}^o , мм	d_{50}^o , мм	d_u^o , мм	$P_{d_u^o}$	$d_{сер.о}^o = \frac{nd_{e.в.}}{2(1-n)}$, мм
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Зразок 1									
1-1	0.17	0.47	0.096	0.82	1.0	0.57	0.344	0.20	0.218
1-2	0.18	0.65	0.200	0.81	1.9	1.07	0.692	0.26	0.426
1-3	0.13	0.38	0.100	0.86	1.1	0.54	0.422	0.39	0.307
1-4	0.18	0.61	0.100	0.81	0.63	0.29	0.346	0.60	0.213
1-5	0.328	0.98	0.105	0.66	0.29	0.135	0.239	0.81	0.100
1-6	0.364	2.02	0.105	0.62	0.20	0.102	0.221	0.92	0.086
1-7	0.347	1.80	0.105	0.63	0.15	0.080	0.229	0.96	0.089
1-8	0.318	1.86	0.105	0.66	0.145	0.078	0.244	0.95	0.102
1-9	0.290	1.38	0.105	0.69	0.24	0.127	0.262	0.92	0.117
1-10	0.322	1.18	0.105	0.66	0.30	0.107	0.242	0.82	0.102
Зразок 2									
2-1	0.041	14.2	0.040	0.97	3.0	0.94	0.417	0.001	0.647
2-2	0.058	10.0	0.040	0.95	0.52	0.40	0.312	0.01	0.380
2-3	0.116	5.0	0.040	0.91	0.21	0.182	0.221	0.95	0.202
2-4	0.231	2.3	0.040	0.82	0.108	0.095	0.143	0.99	0.091

продовження табл. 2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Зразок 3									
3-1	0.186	2.30	0.026	0.81	0.105	0.082	0.090	0.72	0.055
3-2	0.134	2.24	0.026	0.86	0.141	0.118	0.111	0.17	0.080
3-3	0.215	1.80	0.026	0.78	0.092	0.077	0.081	0.77	0.046
3-4	0.234	1.80	0.026	0.76	0.085	0.071	0.078	0.80	0.041
3-4	0.292	1.10	0.026	0.70	0.062	0.058	0.066	0.96	0.031
Зразок 4									
4-1	0.288	0.43	0.050	0.71	0.125	0.097	0.128	0.91	0.060
4-2	0.300	0.45	0.050	0.69	0.108	0.084	0.123	0.94	0.056
4-3	0.305	0.40	0.050	0.69	0.119	0.092	0.123	0.94	0.056
4-4	0.289	0.47	0.050	0.70	0.074	0.062	0.127	0.99	0.060
Зразок 5									
5-1	0.113	1.45	0.030	0.89	0.102	0.080	0.143	0.99	0.115
5-2	0.138	1.29	0.030	0.85	0.094	0.059	0.121	0.95	0.085

Масова щільність фільтра та питома вага матеріалу, з якого виготовлено елементарні волокна фільтра, визначають його пористість ρ і щільність укладання волокон на одинцю об'єму $\alpha = 1 - \rho$.

По результатам дослідів встановлено, що розмір середнього діаметра пори d_{50}^o залежить від структурних параметрів фільтра $d_{e.в.}$ і α і цю залежність може бути описано степеневою функцією $y = a x^b$, згідно з якою отримано експериментальну формулу:

$$d_{50}^o = 0.408 \left(\frac{d_{e.в.}}{\alpha} \right)^{0.89} \quad (8)$$

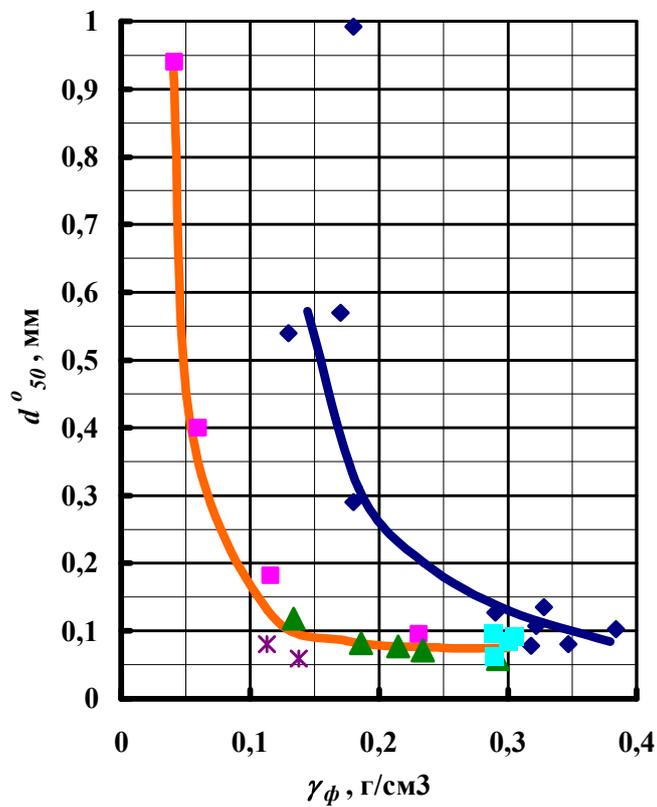
На рис. 5 для досліджених зразків приведено узагальнений графік залежності $d_{50}^o = f(d_{e.в.}/\alpha)$.

В нормативних документах рекомендації щодо використання в будівельній індустрії нетканих волокнисто-пористих матеріалів базуються на характерному параметрі d_{90}^o порової структури цих матеріалів, який визначає розмір пор, менше яких в фільтрі міститься 90 відсотків пор по площі [2].

За результатами проведених досліджень побудовано залежність $d_{90}^o = f(d_{50}^o)$ (рис. 6), по якій отримано експериментальну формулу:

$$d_{90}^o = 1.57 d_{50}^o \quad (9)$$

В теорії фільтрації рідини через пористі середовища використовують безрозмірні параметри – число Рейнольдса Re і



◆ Зразок 1, $d_{e.в.} = 0.1$ мм ■ Зразок 2, $d_{e.в.} = 0.04$ мм
▲ Зразок 3, $d_{e.в.} = 0.026$ мм ■ Зразок 4, $d_{e.в.} = 0.05$ мм
✕ Зразок 5, $d_{e.в.} = 0.03$ мм

Рис. 4. Графіки залежності $d_{50}^o = f(\gamma_{\phi})$



коефіцієнт опору λ , при визначенні яких використовують середньооб'ємний гідравлічний радіус пор r_o , який вираховують за формулою, приведеною в роботі [5].

$$r_o = \frac{n d_{e.в.}}{4(1-n)} \quad (10)$$

або

$$d_{cep.o}^o = \frac{n d_{e.в.}}{2(1-n)}, \quad (11)$$

де $d_{cep.o}^o$ – середньооб'ємний гідравлічний діаметр пори.

В табл. 2 приведено розрахункові значення $d_{cep.o}^o$ для порівняння з експериментально отриманими значеннями d_{50}^o , за якими побудовано залежність $d_{50}^o = f(d_{cep.o}^o)$ (рис. 7), графік якої є пряма лінія, що проходить через початок координат з коефіцієнтом $b = 1.37$, тобто

$$d_{50}^o = 1.37 d_{cep.o}^o \quad (12)$$

$$d_{50}^o = 1.17 d_{cep.o}^o \quad (13)$$

Співставлення результатів обчислення середнього діаметра пор волокнисто-пористих матеріалів, визначеного за експериментальною формулою (8) зі значенням їх середньооб'ємного гідравлічного діаметра, визначеного аналітичним методом, можна виразити співвідношенням.

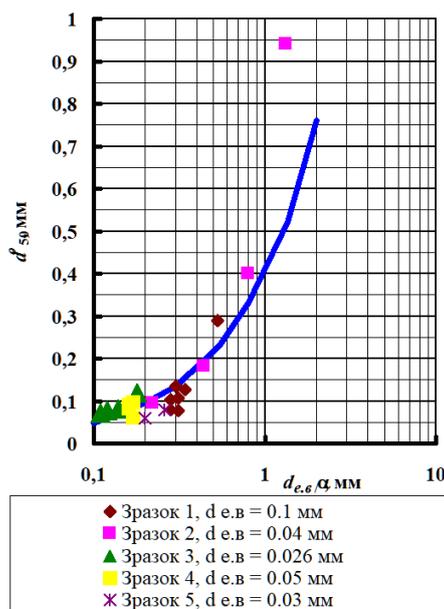


Рис. 5. Графік залежності

$$d_{50}^o = f(d_{e.в}/\alpha)$$

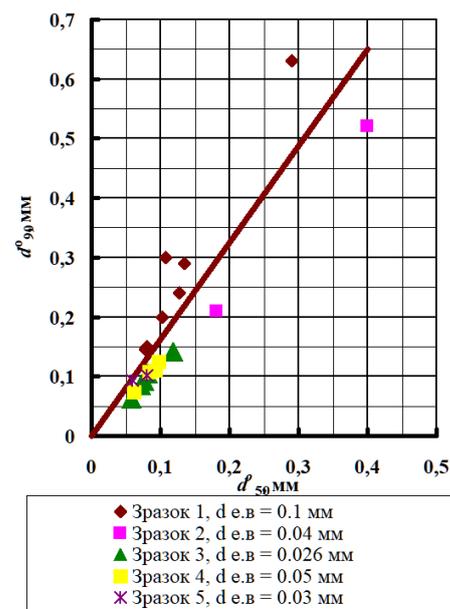
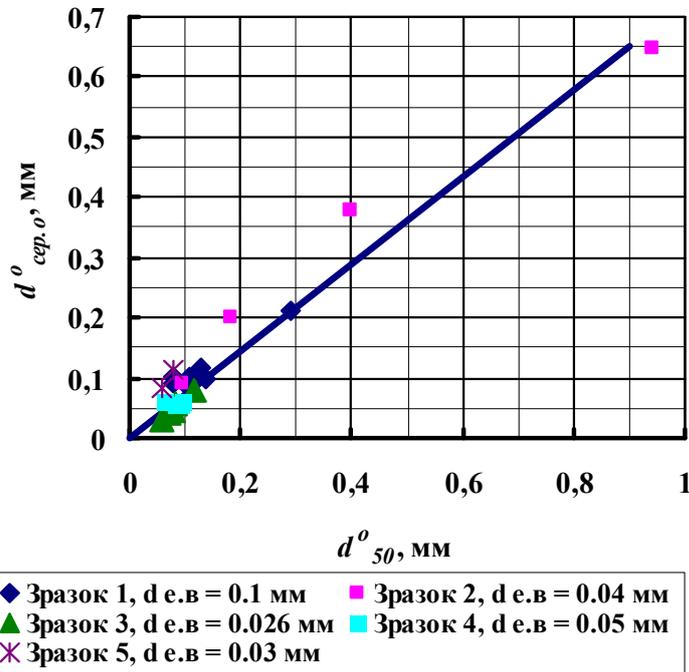


Рис. 6. Графік залежності

$$d_{90}^o = f(d_{50}^o)$$

Проведені порівняння підтверджують можливість використання комплексної методики дослідження порової структури різних типів



нетканих волокнисто-пористих матеріалів та отриманих за результатами досліджень експериментальних формул, які дають близькі результати визначення ключового параметра порової структури матеріалу d_{50}^o з середньооб'ємним діаметром пори, визначеного аналітичним методом.

Рис. 7. Графік залежності $d_{сер.о}^o = f(d_{50}^o)$

Для прогнозування кольматації нетканих волокнисто-пористих фільтрів в процесі експлуатації деякі автори використовують розрахунковий діаметр фільтраційного ходу d_u^o , який визначають за формулою [9]

$$d_u^o = 2d_{e.в} \left(\frac{1}{\sqrt{1-n}} - \frac{1}{\sqrt{\pi}} \right). \quad (14)$$

В табл. 2 для досліджених зразків приведено значення d_u^o і величини вірогідності цього діаметра $P_{d_u^o}$ на кривій розподілу пор. За результатами досліджень встановлено залежність $P_{d_u^o}$ від характерного параметра порової структури фільтра d_{90}^o . На рис. 8

приведено узагальнену залежність $\frac{P_{d_u^o}}{d_{50}^o} = f\left(\frac{1}{d_{90}^o}\right)$, для якої отримано експериментальну формулу:

$$\frac{P_{d_u^o}}{d_{50}^o} = 0.63 \left(\frac{1}{d_{90}^o} \right)^{1.33}, \quad (15)$$



де $P_{d_u^o}$ – у частках від одиниці.

Використовуючи цю залежність, можна для нетканих волокнисто-пористих фільтрів, знаючи їх паспортні характеристики та структурні параметри, вирахувати величину забезпеченості площі незакольтатованих пор фільтра $(1 - P_{d_u^o})$ і спрогнозувати можливий ступінь його кольтатації в період експлуатації.

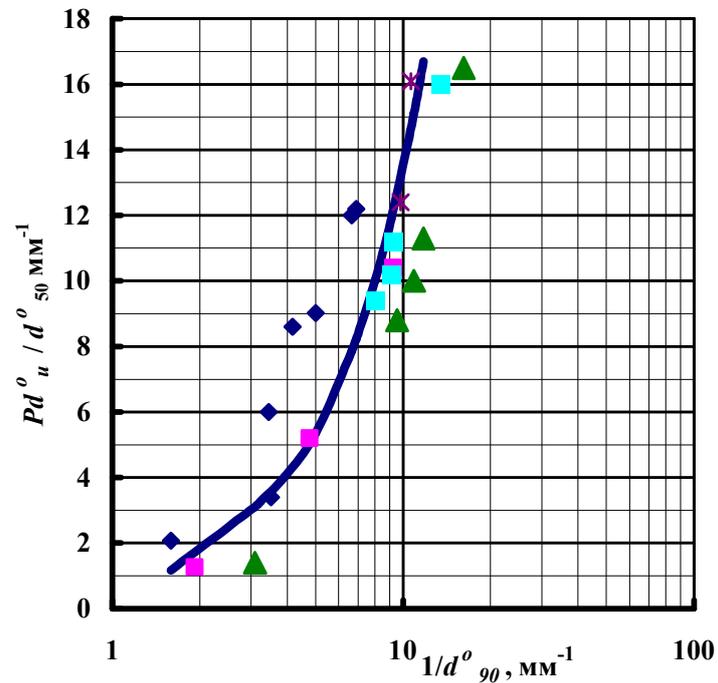
Слід відмітити, що при отриманні експериментальних залежностей було прийнято допущення, що форма пор фільтрів є циліндрична. Насправді порова структура нетканих волокнисто-пористих матеріалів дуже складна і форма їх пор далеко не циліндрична, тому отримані результати можна використовувати тільки для попереднього оцінювання функціональних властивостей цих матеріалів.

Висновки

В результаті проведених досліджень авторами отримано узагальнені залежності характерних параметрів порової структури нетканих волокнисто-пористих фільтрів від їх структурних характеристик

незалежно від матеріалу, з якого вони вироблені, і способу виробництва. На основі цих залежностей отримано експериментальні формули для визначення величини d_{50}^o і d_{90}^o , які дають можливість вирахувати величину вірогідності $P_{d_u^o}$

розрахункового діаметра фільтраційного ходу d_u^o і спрогнозувати можливий ступінь кольтатації фільтра в



◆ Зразок 1, d е.в = 0.1 мм ■ Зразок 2, d е.в = 0.04 мм
 ▲ Зразок 3, d е.в = 0.026 мм ■ Зразок 4, d е.в = 0.05 мм
 ✱ Зразок 5, d е.в = 0.03 мм

Рис. 8. Графік залежності $\frac{Pd_u^o}{d_{50}^o} = f\left(\frac{1}{d_{90}^o}\right)$

період його експлуатації.

1. Clemente Fuggini, Donato Zangani, Aleksander Wosniok, Katerina Krebber, Petra Franitza, Luciano Gabino, Frank Weigand. Innovative approach in the use of geotextiles for failures prevention in railway embankments. *6th Transport Research Arena*. April 18–21. 2016. P. 1875–1883. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.05.154>. 2. ГБН В.2.3-37641918-544. Автомобільні дороги. Застосування геосинтетичних матеріалів у дорожніх конструкціях. Основні вимоги. Мін-во інфраструктури України. Київ, 2014. 143 с. 3. ДБН В 2.3-19:2018. Споруди транспорту. Залізничі колії 1520 мм. Норми проектування. Мінрегіон України. Київ, 2018. 126 с. 4. Домбровський Я. І., Шумінський В. Д., Хлапук М. М., Шумлянський А. О. Геосинтетичні матеріали в гідротехнічному та дорожньому будівництві. *Вісник НУВГП. Сер. Технічні науки*. 2024. Вип. 1(105). С. 63–83. DOI: <https://doi.org/10.31713/vt120246>. 5. Пивовар Н. Г., Бугай Н. Г., Фридрихсон В. Л., Кривоног А. І., Кривоног В. В. Дренаж с волокнистыми фильтрами для защиты территорий от подтопления. Изд-во Института гидромеханики НАН Украины. К., 2000. 332 с. 6. Р. Коллинз. Течение жидкостей через пористые материалы. М. : Мир, 1964. 350 с. 7. Фридрихсон В. Л., Кривоног О. І., Кривоног В. В. Визначення порової структури тонких нетканних геотекстильних матеріалів аналітичним методом. *Вісник НУВГП. Сер. Технічні науки*. 2024. Вип. 1(105). С. 127–137. DOI: <https://doi.org/10.31713/vt220232>. 8. Пивовар Н. Г., Бугай Н. Г., Рычко В. А. Дренаж с волокнистыми фильтрами. К. : Наук. Думка, 1980. 214 с. 9. Кириченко О. В. Формування асортименту та комплексне оцінювання якості геотекстильних нетканних матеріалів : дис. ... канд. техн. наук. Львів, 2018. 226 с.

REFERENCES:

1. Clemente Fuggini, Donato Zangani, Aleksander Wosniok, Katerina Krebber, Petra Franitza, Luciano Gabino, Frank Weigand. Innovative approach in the use of geotextiles for failures prevention in railway embankments. *6th Transport Research Arena*. April 18–21. 2016. P. 1875–1883. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.05.154>. 2. HBN V.2.3-37641918-544. Avtomobilni dorohy. Zastosuvannia heosyntetychnykh materialiv u dorozhnikh konstruktsiiah. Osnovni vymohy. Min-vo infrastruktury Ukrainy. Kyiv, 2014. 143 s. 3. DBN V 2.3-19:2018. Sporudy transportu. Zaliznytsi kolii 1520 mm. Normy proektuvannia. Minrehion Ukrainy. Kyiv, 2018. 126 s. 4. Dombrovskiy Ya. I., Shuminskyi V. D., Khlapuk M. M., Shumlianskyi A. O. Heosyntetychni materialy v hidrotekhnichnomu ta dorozhnomu budivnytstvi. *Visnyk NUVHP. Ser. Tekhnichni nauky*. 2024. Vyp. 1(105). S. 63–83. DOI: <https://doi.org/10.31713/vt120246>. 5. Pyvovar N. H., Buhai N. H., Frydrykhson V. L., Kryvonoh A. Y., Kryvonoh V. V. Drenazh s voloknystymy fyltramy dlia zashchyty



terytoryi ot podtoplenyia. Yzd-vo Ynstituta hydromekhanyky NAN Ukrainy. K., 2000. 332 s. **6.** R. Kollynz. Tychenye zhydkostei cherez porystye materyaly. M. : Myr, 1964. 350 s. **7.** Fridrikhson V. L., Kryvonoh O. I., Kryvonoh V. V. Vyznachennia porovoi struktury tonkykh netkanykh heotekstyl'nykh materialiv analitychnym metodom. *Visnyk NUVHP. Ser. Tekhnichni nauky.* 2024. Vyp. 1(105). S. 127–137. DOI: <https://doi.org/10.31713/vt220232>. **8.** Pyvovar N. H., Buhai N. H., Rychko V. A. Drenazh s voloknystymy fyltramy. K. : Nauk. Dumka, 1980. 214 s. **9.** Kyrychenko O. V. Formuvannia assortymentu ta kompleksne otsiniuvannia yakosti heotekstyl'nykh netkanykh materialiv : dys. ... kand. tekhn. nauk. Lviv, 2018. 226 s.

Fridrikhson V. L., Candidate of Engineering (Ph.D.), Senior Researcher Fellow, Kryvonoh O. 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)

STUDY OF THE DISTRIBUTION OF PORES BY SIZE IN NON-WOVEN FIBROUS-POROUS MATERIALS

The article presents the results of studies of the pore structure of various types of non-woven fibrous-porous materials, both bulk and thin, which differ in their structural characteristics, material composition and processing methods.

The pore structure was studied using a comprehensive methodology, namely:

– the distribution of the majority of larger pores, which occupy more than 50% of the total pore area by area, was studied experimentally by the method of pouring calibrated sand particles through a filter, by the photo method and by the method of pressing air through a moistened filter;

– the distribution of pores by diameters in the zone of their small sizes was performed by the analytical method using the power function.

According to the results of the research, generalized dependences of the characteristic parameters of the pore structure of non-woven fibrous-porous filters on their structural characteristics were obtained, on the basis of which experimental formulas were obtained for determining the value of d_{50}^o and d_{90}^o , which makes it

possible to calculate the probability value $P_{d_u^o}$ of the calculated diameter of the filtration path d_u^o and predict the possible degree of filter clogging during its operation.

***Keywords:* non-woven fibrous-porous materials; pore structure.**