

УДК 624.138.9

ПРОГНОЗ МЕХАНІЧНОЇ КОЛЬМАТАЦІЇ НЕТКАНИХ ГЕОТЕКСТИЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ

В. Л. Фрідріхсон, О. І. Кривоног, В. В. Кривоног[†], Л. С. Орлова

Інститут гідромеханіки НАН України
вул. Марії Капніст, 8/4, 03057, Київ, Україна

[†]E-mail: igmggs@ukr.net

Отримано 04.07.2024

Кольматація, при якій відбувається закупорювання провідних каналів твердими мікрочастинками, призводить до втрати працездатності фільтрувальних пристроїв, використовуваних у побуті й техніці. Це викликає потребу у виробленні критеріїв, за якими оцінюють ймовірну необхідність заміни робочих частин фільтрів. Однак існуючих інженерних методик недостатньо для того, щоб розрахувати зміну ступеня кольматації фільтра в ході його експлуатації в певних умовах. Виходячи з цього, запропоновано новий теоретико-експериментальний підхід до вирішення даної проблеми. Проведено дослідження порової структури тонких волокнисто-пористих фільтрів, які відрізняються за своїми структурними характеристиками, способами виробництва та матеріалами. Для експериментів було відібрано дев'ятнадцять зразків, які належать до трьох типів. Перший тип – отриманий способом пневмоекструзії фільтруючий матеріал з поліетиленових волокон. Другий тип – неткані геотекстильні матеріали з поліпропіленових волокон, скріплених термічним способом. Третій тип – нетканий геотекстильний матеріал з поліефірних волокон, скріплених термічним способом. За допомогою фотометоду, методу просипання каліброваних частинок ґрунту та апроксимації степеневою функцією для цих матеріалів отримано інтегральні криві розподілу пор по діаметру. На їх підставі встановлено експериментальну залежність, яка дає можливість спрогнозувати ступінь кольматації фільтра. Це дозволяє обчислити площу незакольматованих пор, які будуть забезпечувати фільтраційні можливості фільтра протягом усього терміну його експлуатації. Запропоновано методику визначення площі незакольматованих фільтраційних каналів на одиницю площі фільтра. На конкретних прикладах проілюстровано зв'язок між відсотком залишкового вільного перерізу каналів у нетканому геотекстильному матеріалі та збереженням можливості ефективного виконання ним фільтрувальної функції.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: кольматація, неткані геотекстильні пористі матеріали, порова структура, фільтрація

1. ВСТУП

Процес кольматації нетканих волокнисто-пористих матеріалів пов'язаний з процесом фільтрування й залежить від концентрації суспензії, яка проходить крізь фільтр, і від

розмірів твердих частинок у ній. Згідно з вимогами до нетканих волокнисто-пористих матеріалів, які використовуються в галузі будівництва, ефективний розмір отворів фільтрів має бути максимальним – для зменшення небезпеки колюматції фільтра – і водночас достатнім для забезпечення контактної стійкості зони ґрунт-фільтр [1, 2].

Якщо фільтр контактує з відносно сухим ґрунтом, то механічна колюматція фільтра визначається стійкістю контакту ґрунт-фільтр. Такий контакт буде стійким при забезпеченні умов непросипання (для незв'язних ґрунтів) або невідшарування (для зв'язних ґрунтів). Якщо фільтр перебуває під дією зависонесучого фільтраційного потоку, то його колюматція є наслідком фільтрування суспензії. Характер і ступінь колюматції фільтра залежить від його захоплюючої здатності по відношенню до твердих частинок суспензії, яка, в свою чергу, визначається відношенням розміру пор фільтра до діаметра цих частинок і концентрацією суспензії.

Дослідження колюматції тонких нетканих волокнисто-пористих матеріалів потребує досконального вивчення їх порової структури, а саме, розподілу пор по діаметрах. Експериментальні й натурні дослідження довели, що контактна стійкість для волокнистих фільтрів забезпечується за умови [1]

$$d_{cep}^o \leq (2 \dots 2.5)d_{cep}, \quad (1)$$

де d^o – розмір пор, менше яких у фільтрі міститься 50% пор по площі; d – розмір фракції, дрібніше якої в ґрунті міститься 50% частинок за масою сухого ґрунту.

Також існує норма для некритичних умов експлуатації фільтра [2]:

$$O_{90} < 2d_{85}, \quad (2)$$

де O_{90} – необхідний розмір отворів геотекстильного фільтра згідно з EN ISO 12956; d_{85} – розмір фракції, дрібніше якої в ґрунті міститься 85% частинок за масою сухого ґрунту.

Відомо, що при концентрації суспензії, яка перевищує 1%, фільтрування проходить з утворенням осаду, при концентрації менше 0.1% – із закупорюванням пор, а при концентрації (0.1...1.0)% – у проміжному режимі [1].

За критерій співвідношення між діаметром фільтраційного ходу d_u^o та максимальним діаметром суфозійних частинок d_{ci}^{max} , при якому можна уникнути часткової колюматції, було прийнято співвідношення [3]:

$$d_u^o \geq (3.3 \dots 4.4)d_{ci}^{max}. \quad (3)$$

Утім відомі результати досліджень, які показують, що, навіть при дотриманні цієї умови та при дуже низькій концентрації суспензії ($< 0.1\%$), фільтрування проходить з утворенням осаду. При цьому тверді частинки суспензії практично не проникають в товщу фільтра, а осад, утворений на його поверхні, визначає водопроникність системи фільтр-осад [3]. Тому для мінімізації колюматжу фільтра перевагу віддають матеріалу з максимальним значенням O_{90} , який задовольняє критерію контактної стійкості [2].

Відомі формули для визначення за структурними параметрами фільтра розрахункового фільтраційного ходу d_u^o , при якому ступінь колюматції фільтра буде мінімальним [4]:

$$d_u^o = 2d \left(\frac{1}{\sqrt{1-n}} - \frac{1}{\sqrt{\pi}} \right), \quad (4)$$

де $d_{\text{ев}}$ – діаметр елементарного волокна фільтра; n – пористість. При цьому додатково має виконуватись умова (3). Однак, ні за формулами (3) та (4), ні за відомою величиною O_{90} неможливо спрогнозувати ступінь кольматації фільтра в процесі всього періоду його експлуатації в певних умовах.

2. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Можливість спрогнозувати ступінь кольматації фільтра й вирахувати площу його пор, які будуть забезпечувати довготривалі фільтраційні можливості, дає побудова повної кривої розподілу пор фільтра по діаметрах. Зазначимо, що існують різні методи визначення діаметрів пор [5,6]. Для штучних об'ємних волокнисто-пористих матеріалів використовують метод пропресовування газу крізь змочений фільтр [7]. Він дозволяє побудувати криву розподілу пор по діаметрах у діапазоні від їхнього максимального розміру лише до певної величини й не дає можливості оцінити розміри малих пор, які суттєво впливають на середній діаметр пор фільтра при його визначенні. Тому криву розподілу розмірів пор у діапазоні їхніх малих значень описують за допомогою степеневої функції, яка в інтегральній формі має вигляд [7,8]

$$P(x) = Ae^{-\alpha x^P}, \quad (5)$$

де x – діаметр пори; α і P – коефіцієнти, які визначаються експериментально; $A = 1$ – стала нормування.

Для тонких нетканних волокнисто-пористих матеріалів при визначенні розподілу пор по діаметрам використовують фотометод і метод мокрого й сухого просипання каліброваних частинок або скляних бусинок крізь фільтр [1,9]. Обмеженням для використання методу просипання є випадки, коли діаметр основних пор у фільтрі менший за 0.05 мм або можливе прилипання каліброваних частинок ґрунту діаметром менше 0.1 мм до елементарних волокон, що призводить до зниження достовірності отримуваних даних.

У цій статті використано результати визначення розподілу пор по діаметрах у тонких нетканних волокнисто-пористих матеріалах, які були отримані авторами експериментальним шляхом за допомогою фотометоду, методу просипання каліброваних піщаних частинок і аналітичним шляхом з використанням степеневої функції (5). Було досліджено 19 зразків різних типів тонких нетканних волокнисто-пористих матеріалів, які відрізняються за своїми структурними характеристиками, способами виробництва та матеріалами основи.

1. 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 неорієнтовано в площині фільтра та з'єднаних між собою в місці контакту (зразки №№ 1–16).
2. Другий тип – неткані геотекстильні матеріали закордонних виробників, вироблені з поліпропіленових волокон діаметром (0.03...0.05) мм, неорієнтованих у площині фільтра і скріплених термічним способом (зразки №№ 17–18).
3. Третій тип – нетканний геотекстильний матеріал вітчизняного виробництва з поліефірних волокон діаметром порядку 0.017 мм, неорієнтованих у площині фільтра і скріплених термічним способом (зразок № 19).

Табл. 1. Вихідні структурні параметри досліджених зразків і результати визначення характеристик їхньої порової структури

№ зразка	Об'ємна вага, $\gamma_{cp}, \text{г/см}^3$	Товщина, $\delta_o, \text{мм}$	Діаметр елемента, волокна, $d_{dev}, \text{мм}$	Пористість, n	$O_{90}, \text{мм}$	$d_{50}^p, \text{мм}$	$d_u^p, \text{мм}$	P_{d_u}
1	0.170	0.47	0.096	0.820	1.000	0.321	0.350	0.20
2	0.180	0.65	0.200	0.810	2.300	0.602	0.685	0.22
3	0.130	0.38	0.100	0.860	1.350	0.368	0.428	0.29
4	0.180	0.61	0.100	0.800	0.630	0.190	0.332	0.53
5	0.298	1.71	0.105	0.086	0.138	0.037	0.257	0.97
6	0.328	0.98	0.105	0.655	0.320	0.068	0.238	0.78
7	0.364	2.02	0.105	0.611	0.230	0.053	0.221	0.89
8	0.347	1.80	0.105	0.635	0.150	0.062	0.230	0.96
9	0.318	1.86	0.105	0.665	0.145	0.029	0.244	0.94
10	0.290	1.38	0.105	0.690	0.270	0.076	0.257	0.88
11	0.322	1.18	0.105	0.660	0.300	0.066	0.244	0.82
12	0.266	1.06	0.100	0.720	0.410	0.083	0.265	0.70
13	0.190	0.55	0.100	0.800	0.820	0.224	0.334	0.40
14	0.171	0.50	0.150	0.820	1.490	0.531	0.538	0.24
15	0.152	0.42	0.150	0.840	1.800	0.694	0.305	0.23
16	0.190	0.54	0.200	0.800	2.000	0.810	0.668	0.22
17	0.289	0.47	0.050	0.680	0.066	0.020	0.122	0.98
18	0.138	1.29	0.030	0.850	0.100	0.023	0.120	0.93
19	0.131	1.16	0.017	0.900	0.042	0.016	0.088	0.96

Примітка: d_u^p визначається за формулою (4).

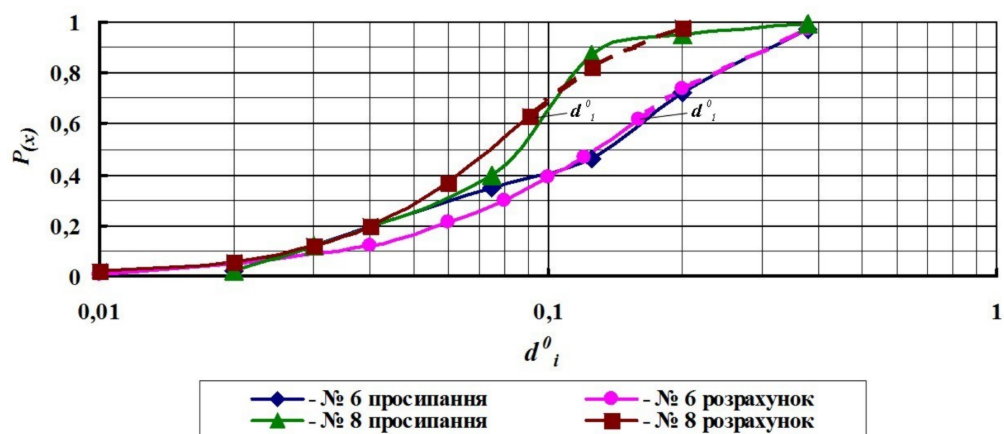


Рис. 1. Інтегральні криві розподілу пор у зразках № 6 і № 8, які отримано методом просипання й на основі розрахунку

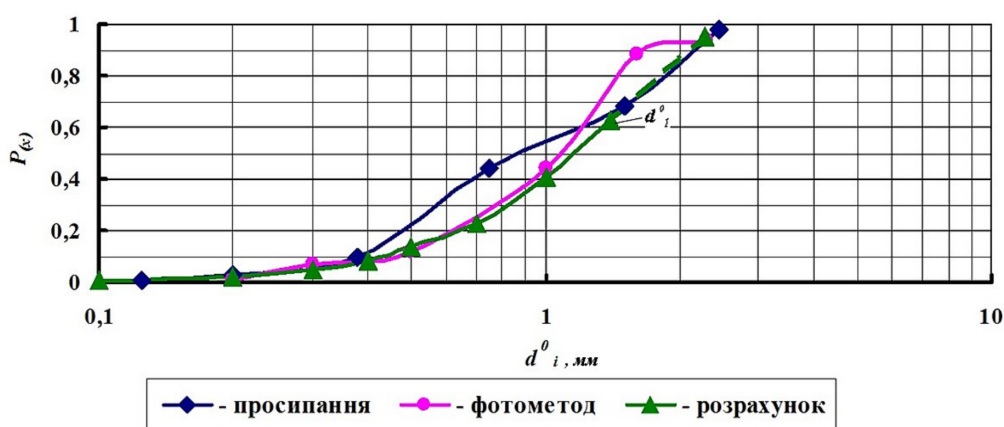


Рис. 2. Інтегральні криві розподілу пор у зразку № 2, які отримано методом просипання, фотометодом і на основі розрахунку

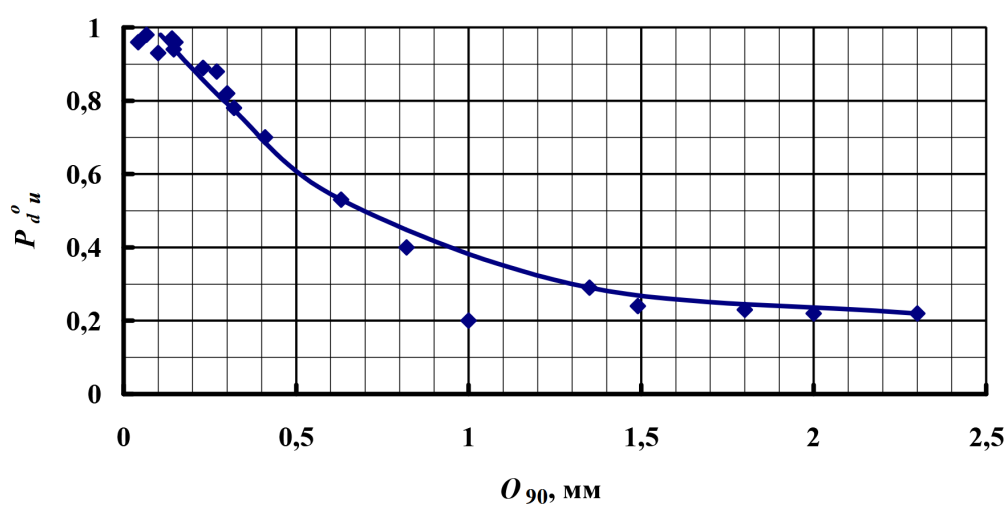


Рис. 3. Залежність $P_{d_u}^0 = f(O_{90})$

На підставі цих досліджень побудовано інтегральні криві розподілу пор по діаметрах, де верхню частину кривих до точки d_1 інтерпольовано за результатами методу сухого просипання каліброваних піщаних частинок, а нижню – за степеневую залежністю, з визначенням вірогідності фільтраційного ходу по кривій розподілу пор для кожного зразка P_{d_u} . Вихідні структурні параметри досліджених зразків і отримані результати щодо характеристик їхньої порової структури наведено в Табл. 1, а на Рис. 1 і 2 – деякі з отриманих кривих.

Отримані інтегральні криві дають можливість спрогнозувати ступінь кольматації фільтра. Для цього потрібно за відомою методикою [3] вирахувати максимальний розмір суфозійної частинки d_{ci}^{max} , визначити за формулою (3) діаметр фільтраційного ходу d_u^o та величину вірогідності цього діаметра $P_{d_u^o}$ на кривій розподілу пор. Вірогідність $P_{d_u^o}$ визначає можливу ступінь кольматації фільтраційних каналів фільтра на одиницю його площі, а величина $(1 - P_{d_u^o})$ – площу фільтраційних каналів, які будуть незакольматовані.

Незакольматовану площу пор визначають у припущенні, що сумарна площа пор на одиницю площі фільтра кількісно дорівнює пористості фільтра n . Якщо за одиницю площі фільтра прийняти поверхню фільтра в діаметрі 1 см, то загальна площа пор на цій ділянці фільтра буде

$$S_{пор} = \frac{\pi d^2}{4} n,$$

де $d = 1$ см, а площу незакольматованих пор $S_{пор,р}$ (робочу в $см^2$) вираховують наступним чином:

$$S_{пор,р} = 0.785n (1 - P_{d_u^o}). \quad (6)$$

На підставі наведених у Табл. 1 результатів досліджень побудовано залежність $P_{d_u^o} = f(O_{90})$ (Рис. 3). За нею, знаючи паспортну характеристику O_{90} та структурні параметри d і n тонкого нетканого геотекстильного матеріалу, можна вирахувати по відношенню до пор розміром O_{90} величину забезпеченості площі незакольматованих пор фільтра $(1 - P_{d_u^o})$ й спрогнозувати можливий ступінь його кольматації в певних умовах експлуатації.

Як приклад, для зразка № 6 можливий ступінь кольматації площі пор фільтра становить 78% (див. Табл. 1). Проте й 22% площі незакольтованих пор, діаметр яких більше величини розрахункового фільтраційного ходу d_u^o , можуть забезпечити водопроникність фільтра, достатню для стабільної роботи дренажної конструкції протягом розрахункового періоду її експлуатації. Для зразка № 8 можливий ступінь кольматації площі пор фільтра становить 96%. У цьому випадку площа незакольматованих пор становить лише 4%, що значно зменшує водопропускну здатність і збільшує його гідравлічний опір, внаслідок чого може настати підняття рівня ґрунтових вод і підтоплення території.

3. ВИСНОВКИ

1. Запропоновано методику прогнозування механічної кольматації нетканих геотекстильних матеріалів при їх довготривалій роботі. Вона дозволяє вирахувати площу каналів, які будуть забезпечувати фільтраційні можливості, на одиницю площі фільтра.
2. Отримано експериментальну залежність $P_{d_u^o} = f(O_{90})$, за допомогою якої можна вирахувати ступінь кольматації фільтрів, подібних дослідженим нами.

REFERENCES

- [1] N. G. Pivovar, N. G. Bugai, V. L. Fridrihson, A. I. Krivonog, and V. V. Krivonog, *Drainage with fibrous filters to protect territories from flooding*. Kyiv: Institute of Hydromechanics of NASU, 2000.
- [2] Sectoral Building Codes of Ukraine, “Automobile roads. application of geotextiles in road structures. basic requirements: GBN B.2.3-37641918-544:2014,” Ministry of Infrastructure of Ukraine, Kyiv, 2015.
- [3] A. N. Patrashev and G. H. Pravednii, *Instructions for the design of reverse filters of hydroengineering constructions*. VSN-02-65. Moscow: Energiya, 1965.
- [4] L. S. Blazhko and V. Y. Shtykov, “The work of geotextiles in the construction of the upper structure of the track,” *Nauka i Transport*, pp. 60–64, 2009.
- [5] S. Satish, “Structural characterization of fibre foam materials using tomographic data,” mthesis, KTH Royal Institute of Technology School of Engineering Sciences, Stockholm, 2024.
- [6] T. Yang, L. Hu, D. Yu, X. Xiong, J. Chvojka, M. Venkataraman, M. Petrou, B. Tomková, H. Morikawa, and J. Militký, “Simple determination of key structural parameters for fibrous materials enabled by Ergun-type and Kozeny-type equations,” *Polymer Testing*, vol. 108, p. 107514, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2022.107514>
- [7] N. G. Bugai, “Pore size in fibrous filters,” *Melioratsiya i Vodnoe Khoziaistvo*, vol. 29, pp. 94–101, 1974.
- [8] N. G. Pivovar, N. G. Bugai, and V. A. Rychko, *Drainage with fibrous filters*. Kyiv: Naukova Dumka, 1980.
- [9] D. Fayoux, “Filtration hydrodynamique des sols par des textiles,” in *Colloque International sur l’emploi des textiles en Géotechnique*, Paris, 1980, pp. 68–80.

ЛІТЕРАТУРА

- [1] Дренаж с волокнистыми фильтрами для защиты территорий от подтопления / Пивовар Н. Г., Бугай Н. Г., Фридрихсон В. Л., Кривоног А. И. и Кривоног В. В. — Киев : Институт гидромеханики НАНУ, 2000. — 332 с.
- [2] Автомобільні дороги. Застосування геотекстильних матеріалів в дорожніх конструкціях. Основні вимоги: ГБН В.2.3-37641918-544:2014 / Галузеві будівельні норми України. — Київ : Міністерство інфраструктури України, 2015. — 148 с.
- [3] Патрашев А. Н., Праведный Г. Х. Инструкция по проектированию обратных фильтров гидротехнических сооружений. ВСН-02-65. — Москва : Энергия, 1965. — 88 с.
- [4] Блажко Л. С., Штыков В. И. Работа геотекстиля в конструкции верхнего строения пути // Наука и транспорт. — 2009. — С. 60–64.

- [5] Satish S. Structural characterization of fibre foam materials using tomographic data : Master's thesis ; KTH Royal Institute of Technology School of Engineering Sciences. — Stockholm, 2024. — 116 p.
- [6] Simple determination of key structural parameters for fibrous materials enabled by Ergun-type and Kozeny-type equations / Yang T., Hu L., Yu D., Xiong X., Chvojka J., Venkataraman M., Petrou M., Tomková B., Morikawa H., and Militký J. // *Polymer Testing*. — 2022. — Vol. 108. — P. 107514.
- [7] Бугай Н. Г. Размер пор в волокнистых фильтрах // *Мелиорация и водное хозяйство*. — 1974. — Т. 29. — С. 94–101.
- [8] Пивовар Н. Г., Бугай Н. Г., Рычко В. А. Дренаж с волокнистыми фильтрами. — Киев : Наукова думка, 1980. — 214 с.
- [9] Fayoux D. Filtration hydrodynamique des sols par des textiles // *Colloque International sur l'emploi des textiles en Géotechnique*. — Paris. — 1980. — P. 68–80.

V. L. Fridrikhson, O. I. Kryvonoh, V. V. Kryvonoh, L. S. Orlova
Predicting the mechanical colmatation of nonwoven geotextiles

Colmatation, in which the conductive channels are clogged with solid microparticles, leads to the loss of performance of filtering devices used in everyday life and technology. This creates a need to develop criteria to assess the likely need to replace the working parts of filters. However, existing engineering methods are not enough to calculate the change in the degree of filter clogging during its operation under certain conditions. Based on this, a new theoretical and experimental approach to solving this problem is proposed. The pore structure of thin fibrous-porous filters that differ in their structural characteristics, production methods, and materials was studied. Nineteen samples belonging to three types were selected for experiments. The first type is a filter material of polyethylene fibers obtained by pneumoextrusion. The second type is a nonwoven geotextile material made of thermally bonded polypropylene fibers. The third type is a nonwoven geotextile material made of thermally bonded polypropylene fibers. Using the photo method, the scattering of calibrated soil particles, and approximation by a power function, integral curves of the pore diameter distribution were obtained for these materials. As a result, an experimental dependence was established, which makes it possible to predict the degree of filter clogging. This allows us to calculate the area of unclogged pores that will provide the filtration capabilities of the filter throughout its service life. A method for determining the area of unclogged filtration channels per unit of filter area is proposed. Specific examples illustrate the relationship between the percentage of residual free cross-section of channels in a nonwoven geotextile material and the ability to perform its filtering function effectively.

KEY WORDS: *clogging, nonwoven porous geotextiles, pore structure, filtration*