

Марченко М. М.  
ORCID 0009-0004-1099-6822  
E-mail:  
kmmarchenko1208@gmail.com  
Державний біотехнологічний  
університет, м. Харків, Україна

**МОДЕЛЮВАННЯ ДЕГРАДАЦІЇ ТА  
РЕГЕНЕРАЦІЇ ПОРИСТИХ  
МАТЕРІАЛІВ НА ОСНОВІ  
ПОЛІТЕТРАФТОРЕТИЛЕНУ У  
ФІЛЬТРАЦІЇ ТРАНСФОРМАТОРНИХ  
ОЛИВ**

DOI <https://doi.org/10.31359/2311.441X.2026.28.131>

УДК 678.746.22:620.179.4:66.067.3

*Марченко М. М. Моделювання деградації та регенерації пористих матеріалів на основі політетрафторетилену у фільтрації трансформаторних олиव*

**Анотація.** Розглянуто проблему деградації та регенерації пористих фільтрувальних матеріалів на основі політетрафторетилену (ПТФЕ), що застосовуються для очищення трансформаторних олив у процесі експлуатації силового електрообладнання. Актуальність дослідження обумовлена необхідністю забезпечення стабільних діелектричних та експлуатаційних характеристик трансформаторних олив, які з часом погіршуються внаслідок накопичення механічних домішок, продуктів окиснення та вологи.

Метою роботи є розробка математичної моделі багатоциклової роботи ПТФЕ-фільтра з урахуванням процесів накопичення забруднень, зростання гідравлічного опору, деградації структури матеріалу та зниження ефективності регенерації. Об'єктом дослідження є синтерований ПТФЕ, отриманий методом вилуговування пороутворювача NaCl, що формує бімодальну камерно-каналну структуру порового простору.

Запропонована модель базується на використанні закону Дарсі для опису фільтраційного потоку та вводить безрозмірний параметр ступеня заповнення пор, який пов'язує масу накопичених забруднень із брудоемкістю матеріалу. Нелінійна залежність гідравлічного опору від ступеня кольматації враховує різні механізми заповнення великих каверн і вузьких міжпорових каналів. При моделюванні врахована деградація ефективності регенерації у багатоцикловому режимі, а також накопичення незворотних залишків, які зменшують доступну брудоемкість та збільшують базовий опір фільтра.

Проведено числове моделювання 10 робочих циклів фільтрації-регенерації при заданих технологічних параметрах. Встановлено, що ресурс роботи фільтра зменшується більш ніж у 3 рази (з 8,64 до 2,80 год), а початковий гідравлічний опір зростає у 2,44 рази. Показано, що сукупний об'єм відфільтрованої оливи за багатоциклової експлуатації у 6,3 рази перевищує ресурс одноразового використання, що підтверджує доцільність регенерації, незважаючи на її деградацію.

Встановлено домінуючий вплив початкової брудоемкості матеріалу та ефективності регенерації на ресурс роботи фільтра. Показано, що збільшення брудоемкості шляхом оптимізації гранулометричного складу пороутворювача забезпечує суттєве зростання ресурсу фільтра, тоді як підвищення ефективності регенерації (зокрема за рахунок ультразвукової обробки та застосування розчинників) дозволяє збільшити кількість робочих циклів та сумарний об'єм очищеної оливи.

**Ключові слова:** політетрафторетилен (ПТФЕ), пористі матеріали, трансформаторна олива, мікрофільтрація, математичне моделювання, деградація, регенерація, кольматація, гідравлічний опір, брудоемкість, фільтраційні процеси.

*Marchenko M. M. Modeling of degradation and regeneration of porous materials based on polytetrafluoroethylene in transformer oil filtration*

**Abstract.** *The paper addresses the problem of degradation and regeneration of porous filtering materials based on polytetrafluoroethylene (PTFE) used for purification of transformer oils during the operation of power electrical equipment. The relevance of the study is обусловлена the need to ensure stable dielectric and эксплуатационные properties of transformer oils, which deteriorate over time due to the accumulation of mechanical impurities, oxidation products, and moisture.*

*The aim of the work is to develop a mathematical model of multi-cycle operation of a PTFE filter, taking into account contaminant accumulation, increase in hydraulic resistance, structural degradation of the material, and reduction in regeneration efficiency. The object of the study is sintered PTFE obtained by leaching a NaCl pore-forming agent, which results in a bimodal cavity-channel pore structure.*

*The proposed model is based on Darcy's law for describing fluid flow in porous media and introduces a dimensionless pore filling factor that relates the mass of accumulated contaminants to the dirt-holding capacity of the material. The nonlinear dependence of hydraulic resistance on the degree of clogging accounts for different mechanisms of filling of large cavities and narrow inter-pore channels. Particular attention is paid to modeling the degradation of regeneration efficiency under multi-cycle operation, as well as to the accumulation of irreversible residues that reduce the available dirt-holding capacity and increase the initial hydraulic resistance of the filter.*

*Numerical simulation of 10 filtration–regeneration cycles was carried out under specified operating parameters. It was established that the filter lifetime decreases by more than three times (from 8.64 to 2.80 hours), while the initial hydraulic resistance increases by a factor of 2.44. It is shown that the total volume of filtered oil in multi-cycle operation is 6.3 times higher than that of single-use operation, confirming the feasibility of regeneration despite its gradual degradation.*

*Sensitivity analysis revealed the dominant influence of two key factors: the initial dirt-holding capacity and the regeneration efficiency. It is shown that increasing the dirt-holding capacity through optimization of the pore-former granulometry significantly enhances the filter lifetime, while improving regeneration efficiency (e.g., by ultrasonic treatment combined with heated solvents) increases the number of operating cycles and the total volume of purified oil.*

**Keywords:** *polytetrafluoroethylene (PTFE), porous materials, transformer oil, microfiltration, mathematical modeling, degradation, regeneration, fouling, hydraulic resistance, dirt-holding capacity, filtration processes.*

## **Вступ**

Тривала надійна робота силових трансформаторів у значній мірі визначається якістю трансформаторної оливи, яке одночасно виконує функції рідкої ізоляції та теплоносія. В процесі експлуатації олива піддається термічному окисненню, зволоженню та накопиченню механічних домішок (продуктів зносу конструкційних матеріалів, оксидів металів і смолистих компонентів), що призводить до погіршення її діелектричних характеристик [1]. Вміст механічних частинок понад 20 мг/л або їх розмір більш ніж 10 мкм є критичним для надійності трансформаторної ізоляції [2].

Мікрофільтрація трансформаторних олив із застосуванням фільтрувальних елементів на основі політетрафторетилену (ПТФЕ) є перспективним методом відновлення якості оливи безпосередньо у системі трансформаторного вузла [2]. Синтерований ПТФЕ, виготовлений методом вилуговування твердих пороутворювачів (зокрема NaCl, NaHCO<sub>2</sub>), поєднує унікальну хімічну інертність до вуглеводневих

середовищ, широкий робочий температурний діапазон ( $-200...+260$  °C) та регульовану пористість від 60 до 80 % із розміром пор 0,3–200 мкм [3].

Проте питання кількісної оцінки деградації фільтрувальних властивостей матеріалу в процесі багатоциклової експлуатації із регенерацією залишається мало дослідженим. Safiddine та ін. [2] дослідили регенерацію трансформаторних ізоляційних рідин з використанням мембранної технології, але математичне моделювання багатоциклової деградації не було проведено. Zhang та ін. [4] оптимізували умови очищення ПТФЕ-мембран для обробки нафтових стічних вод, але особливості камерно-канальної структури, об'ємних фільтрів, та їх вплив на ефективність регенерації не враховано.

Важливим є розуміння того, як специфічна бімодальна камерно-канальна архітектура порової структури, що утворюється при NaCl-вилуговуванні, обумовлює механізми незворотної коагуляції та обмежує ефективність відновлення.

Метою роботи є розробка математичної моделі багатоциклової роботи ПТФЕ-фільтра, реалізація кількісного моделювання та аналізу чутливості, а також формулювання рекомендацій щодо раціональних методів регенерації.

### Математична модель

Розглянемо об'ємно-пористий ПТФЕ-фільтрувальний елемент, виготовлений методом холодного одновісного пресування суміші порошку ПТФЕ та пороутворювача NaCl із подальшим спіканням та вилуговуванням солі у воді. Мікроструктура такого матеріалу має бімодальний характер: великі ізодіаметричні каверни (100–500 мкм), що відтворюють форму кристалів солі, з'єднані між собою вузькими міжпоровими каналами (5–30 мкм), утвореними контактами частинок полімеру [4].

Модель базується на наступних допущеннях:

1. Фільтр розглядається як пористе середовище із бімодальною поровою структурою (каверни + канали).
2. Потік рідини описується законом Дарсі для ламінарної течії у пористому середовищі.
3. Накопичення забруднень відбувається рівномірно за часом при сталій концентрації на вході.
4. Зміна проникності описується через безрозмірний ступінь заповнення пор.
5. Ефективність регенерації знижується лінійно відносно номера циклу.
6. Температура та в'язкість оливи вважаються сталими протягом експлуатації.

Введемо наступні змінні та параметри моделі (табл. 1).

Таблиця 1

Основні змінні та параметри моделі

Змінна	Фізичний зміст	Одиниця вимірювання
$\Phi$	Ступінь заповнення пор	-
$m_{зобр}$	Маса накопичених забруднень	г
$m_{емк}$	Брудоемкість фільтра	г
$\Delta P$	Гідравлічний опір	Па
$Q$	Витрата фільтрації	м <sup>3</sup> /с
$K$	Проникність	м <sup>2</sup>
$\eta_{\phi}$	Ефективність фільтрації	-
$\eta_{рег}$	Ефективність регенерації	-
$N$	Номер циклу	-

Безрозмірний ступінь заповнення пор визначається як:

$$\varphi = \frac{m_{\text{забр}}}{m_{\text{емк}}}$$

де  $m_{\text{забр}}$  - маса вже накоплених забруднень;  $m_{\text{емк}}$  - максимальна маса забруднень, яку може вмістити фільтр (брудоемкість). Фізичний зміст:  $\varphi = 0$  - фільтр чистий,  $\varphi = 1$  - фільтр повністю заповнений.

Гідрравлічний опір описується функцією:

$$\Delta P(\varphi) = \Delta P_0 \cdot F(\varphi)$$

$$F(\varphi) = 1 + \alpha_1 \varphi^2 + \frac{\alpha_2 \varphi^4}{(1 - \varphi)^2}$$

Перший доданок ( $1 + \alpha_1 \varphi^2$ ) відповідає заповненню великих каверн при малих  $\varphi$  - опір зростає квадратично ( $\alpha_1 = 2,5$ ). Другий доданок ( $\frac{\alpha_2 \varphi^4}{(1 - \varphi)^2}$ ) описує катастрофічний зріст опору при наближенні до повної кольматації при заповненні вузьких каналів ( $\alpha_2 = 3,0$ ). Фізичний зміст полягає у тому, що спочатку забруднення заповнюють великі порожнини - опір зростає плавно, потім починають перекриватися вузькі канали - і опір різко зростає через кубічну залежність втрат від діаметра каналу (аналог закону Гагена-Пуазейля:  $\Delta P \sim 1/r^4$ ).

При сталих витратах  $Q$  та середній концентрації забруднень на вході  $C_{\text{вх}}$  швидкість накопичення забруднень:

$$\dot{m} = \frac{dm_{\text{забр}}}{dt} = \eta_{\text{ф}} \cdot C_{\text{вх}} \cdot Q = \text{const}$$

При базових параметрах ( $\eta_{\text{ф}} = 0,85$ ;  $C_{\text{вх}} = 12$  мг/л;  $Q = 300$  л/год) отримуємо  $\dot{m} = 3,06$  г/год.

Лінійний ріст забруднень у часі описується як:

$$m_{\text{забр}}(t) = \dot{m} \cdot t$$

Тоді ступінь заповнення у часі визначається за формулою:

$$\varphi(t) = \frac{\dot{m} \cdot t}{m_{\text{емк}}}$$

Цикл закінчується, коли  $\Delta P$  досягає граничного значення  $\Delta P_{\text{гр}} = 0,25$  МПа:

$$F(\varphi^*) = \frac{\Delta P_{\text{гр}}}{\Delta P_0}$$

де  $\varphi^*$  - граничний ступінь заповнення.

Оскільки функція  $F(\varphi)$  монотонно зростає від 1 (при  $\varphi = 0$ ) до  $\infty$  (при  $\varphi \rightarrow 1$ ), для будь-якого  $R = \Delta P_{\text{гр}}/\Delta P_0 > 1$  існує єдине розв'язання  $\varphi^* \in (0, 1)$ , яке знаходиться методом бісекції.

Час роботи циклу:

$$t_{\text{рес}} = \frac{\varphi^* \cdot m_{\text{емк}}}{\dot{m}}$$

З кожним циклом промивка працює гірше, в зв'язку з деградацією ефективності регенерації:

$$\eta_{\text{рег}}(n) = \eta_{\text{рег}}(0) \cdot (1 - k_{\eta}(n - 1))$$

де  $\eta_{\text{рег}}(0) = 0,88$  — початкова ефективність;  $k_{\eta} = 0,020$  — швидкість деградації (2 % за цикл);  $n$  — номер циклу. Причина деградації полягає у тому, що вузькі канали звужуються, розчинник гірше проникає, смоли, що важко видаляються, накопичуються.

Залишкове забруднення після регенерації визначаються як:

$$\Delta m_{\text{ост}}(n) = (1 - \eta_{\text{рег}}(n)) \cdot m_{\text{забр}}(n)$$

Кумулятивне залишкове забруднення:

$$M_{\text{ост}}(n) = \sum_{k=1}^n \Delta m_{\text{ост}}(k)$$

Деградація початкового опору:

$$\Delta P_0(n) = \Delta P_{0,\text{рег}} \cdot (1 + k_{\text{стр}})^{n-1} \cdot \left(1 + k_{\text{пор}} \cdot \frac{M_{\text{ост}}(n-1)}{m_{\text{емк},0}}\right)$$

де  $(1 + k_{\text{стр}})^{n-1}$  описує структурну деградацію ПТФЕ-матриці при термоцилюванні та ультразвуці ( $k_{\text{стр}} = 0,020$ ); другий множник враховує вплив залишкових забруднень на базовий опір ( $k_{\text{пор}} = 1,5$ ).

Зниження брудоемкості:

$$m_{\text{емк}}(n) = m_{\text{емк},0} - f_{\text{емк}} \cdot M_{\text{ост}}(n-1)$$

де  $f_{\text{емк}} = 0,80$  — коефіцієнт зниження емкості. Залишкові забруднення «забивають» частину об'єму каверн назавжди, зменшуючи корисний об'єм для наступних циклів.

Фільтр вважається непридатним, якщо виконується хоча б одна з умов:  $\Delta P_0(n) \geq \Delta P_{\text{гр}}$  (базовий опір досяг границі — цикл триває нуль часу), або  $m_{\text{емк}}(n) \leq 0$  (брудоемкість вичерпана).

Для циклу  $n$  виконується наступна послідовність кроків:

1. Визначення початкових параметрів: суха маса ПТФЕ + залишки  $m_{\text{сух}} = m_{\text{PTFE}} + M_{\text{зал}}(n-1)$ ; початковий опір  $\Delta P_0(n)$ ; доступна брудоемкість  $m_{\text{емк}}(n)$ .

2. Перевірка придатності: якщо  $\Delta P_0(n) \geq \Delta P_{\text{пр}}$  або  $m_{\text{емк}}(n) \leq 0$  - фільтр непридатний.

3. Знаходження граничного ступеня заповнення:

$$R_n = \frac{\Delta P_{\text{пр}}}{\Delta P_0(n)} \cdot \varphi_n^*$$

Знаходимо  $\varphi_n^*$  (граничний ступінь заповнення) методом бісекції для  $R_n$

4. Розрахунок ресурсу циклу:

- Маса забруднень у циклі:

$$m_{\text{загр}} = \varphi_n^* \cdot m_{\text{емк}}(n)$$

- Час роботи:

$$t_{\text{рес}} = \frac{\dot{m}_{\text{загр}}}{\dot{m}}$$

- Об'єм відфільтрованої оливи:

$$V = Q \cdot t_{\text{рес}}$$

5. Реєстрація мас до та після фільтрації:

$$m_1 = m_{\text{сух}} + m_{\text{загр}}$$

6. Регенерація з ефективністю  $\eta_{\text{рег}}(n)$ :

- Вилучені забруднення:

$$m_{\text{вил}} = \eta_{\text{рег}}(n) \cdot m_{\text{загр}}$$

- Маса після регенерації:

$$m_2 = m_1 - m_{\text{вил}}$$

- Нові залишки:

$$\Delta m_{\text{зал}} = m_{\text{загр}} - m_{\text{вил}}$$

7. Оновлення кумулятивних залишків  $M_{\text{зал}}(n)$

$$M_{\text{зал}}(n) = M_{\text{зал}}(n-1) + \Delta m_{\text{зал}}$$

8. Розрахунок ступеня відновлення робочого діапазону:

$$\Psi = \frac{\Delta P_{\text{пр}} - \Delta P_0(n+1)}{\Delta P_{\text{пр}} - \Delta P_{0,\text{ref}}} \cdot 100\%$$

Числове моделювання 10 робочих циклів виконано за таких базових параметрів:  
 $Q = 300$  л/год,  $C_{\text{вх}} = 12$  мг/л,  $\eta_{\text{ф}} = 0,85$ ,  $\eta_0 = 0,88$ ,  $k_{\eta} = 0,02$  цикл<sup>-1</sup>,  $\Delta P_{0,\text{ref}} = 0,050$  МПа,  $\Delta P_{\text{гр}} = 0,250$  МПа,  $m_{\text{смк},0} = 40$  г,  $k_{\text{стр}} = 0,02$ ,  $k_{\text{пор}} = 1,5$ ,  $f_{\text{смк}} = 0,80$ .

Результати моделювання наведено у таблиці 2.

Таблиця 2

Результати числового моделювання 10 робочих циклів

n	$\Delta P_0$ , МПа	$m_{\text{смк}}$ , Г	$m_{\text{забр}}$ , Г	$t_{\text{рес}}$ , ГОД	$V_{\text{фільт}}$ , Л	$\eta_{\text{рег}}$ , %	$\Psi$ , %
1	0,0500	40,00	26,44	8,64	2592	88,0	96,4
2	0,0571	37,46	23,94	7,82	2347	86,2	92,7
3	0,0646	34,82	21,52	7,03	2109	84,5	88,7
4	0,0726	32,15	19,29	6,30	1891	82,7	84,6
5	0,0808	29,49	16,90	5,52	1657	81,0	80,5
6	0,0891	26,91	14,83	4,85	1454	79,2	76,3
7	0,0974	24,45	13,01	4,25	1275	77,4	72,2
8	0,1057	22,10	11,40	3,73	1118	75,7	68,1
9	0,1139	19,88	10,00	3,27	980	73,9	64,0
10	0,1220	17,79	8,57	2,80	840	72,2	60,1

Ресурс першого циклу становить  $t_1 = 8,64$  год при відфільтрованому об'ємі  $V_1 = 2592$  л. До десятого циклу ресурс скорочується до  $t_{10} = 2,80$  год, тобто у 3,1 рази, що відображає кумулятивний характер деградації. Початковий гідравлічний опір зростає нелінійно від  $\Delta P_0(1) = 0,050$  МПа до  $\Delta P_0(10) = 0,122$  МПа, тобто у 2,44 рази за 10 циклів.

Суттєво, що ступінь відновлення робочого діапазону  $\Psi$  знижується значно швидше, ніж масова ефективність регенерації  $\eta_{\text{рег}}$ : до 10-го циклу  $\eta_{\text{рег}} = 72,2$  %, тоді як  $\Psi = 60,1$  %. Це пояснюється кубічною залежністю гідравлічних втрат від діаметра каналу (аналог закону Гагена-Пуазейля): навіть незначні незмивні залишки, локалізовані у вузьких каналах, справляють непропорційно великий вплив на опір.

Кумулятивна маса незмивних залишків зростає з 3,27 г (цикл 1) до 30,15 г (цикл 10), тоді як доступна брудоемкість скорочується з 40 г до 17,79 г — менше половини початкового значення. Загальний об'єм відфільтрованої оливи за 10 циклів становить  $V_{\Sigma} = 16263$  л, що у 6,3 рази перевищує ресурс одноразового використання (2592 л).

Аналіз чутливості виявив ієрархію впливу параметрів на сукупний ресурс. Результати наведено у таблиці 3 та на рис. 1.

Таблиця 3

Вплив ефективності регенерації  $\eta_0$  на ресурс фільтра

Показник	$\eta_0 = 0,75$	$\eta_0 = 0,88$ (базовий)	$\eta_0 = 0,95$
Ресурс 1-го циклу, год	8,64	8,64	8,64
Ресурс 5-го циклу, год	3,80	5,52	7,14
Ресурс 10-го циклу, год	0,95	2,80	5,30
Число придатних циклів ( $t > 2$ год)	~8	~12	~18
$V_{\Sigma}$ за 10 циклів, л	10 840	16 263	20 950
Кратність продовження ресурсу	×4,2	×6,3	×8,1

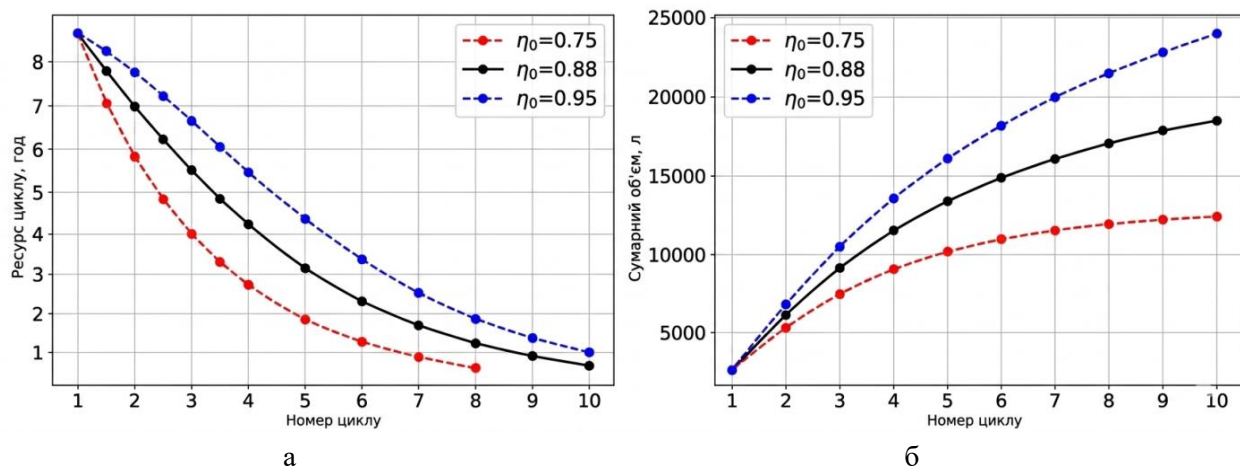


Рис. 1. Залежність чутливості від  $\eta_{\text{рег}}$ :

- а - ресурс роботи (год) залежно від номера циклу для трьох значень  $\eta_0$  (0,75; 0,88; 0,95);
- б - сумарний відфільтрований об'єм (л) залежно від номера циклу

Як видно з рис. 1а, ресурс роботи циклу монотонно зменшується з номером циклу для всіх значень  $\eta_0$ , проте темп зменшення суттєво залежить від ефективності регенерації. При  $\eta_0 = 0,75$  ресурс 10-го циклу становить лише 0,95 год, тоді як при  $\eta_0 = 0,95$  — 5,30 год. Рис. 1б показує, що сумарний відфільтрований об'єм зростає сублінійно через накопичення незмивних залишків. Кожні 10 відсоткових пунктів приросту  $\eta_0$  дають приблизно 2–3 додаткових робочих цикли та 25–30 % приросту сукупного ресурсу.

При  $C_{\text{вх}} = 5, 12, 25$  мг/л сумарний об'єм за 10 циклів однаковий (16263 л), але часовий ресурс скорочується пропорційно концентрації. Висока концентрація потребує частіших регенерацій, прискорюючи деградацію.

Найсильніший вплив справляє початкова брудоемкість  $m_{\text{емк},0}$ , яка визначається пористістю та архітектурою структури: її збільшення з 25 до 55 г підвищує сукупний ресурс у 2,8 рази та число придатних циклів — понад удвічі (табл. 4). Це вказує на пріоритет технологічної оптимізації пористої структури через підбір гранулометрії пороутворювача.

Таблиця 4

Вплив початкової брудоемкості  $m_{\text{емк},0}$  на ресурс фільтра

$m_{\text{емк},0}$	Ресурс 1-го циклу, год	Ресурс 10-го циклу, год	Придатних циклів	$V_{\Sigma}$ , л
25 г	5,48	0,74	~7	8910
40 г	8,64	2,80	~12	16 263
55 г	11,80	5,23	~16	25 100

## Висновки

1. Бімодальна камерно-канална структура, утворена вилуговуванням NaCl, забезпечує у 3–10 разів вищу брудоемкість порівняно із класичним синтерованим ПТФЕ, однак принципово змінює стратегію регенерації: зворотне промивання втрачає роль основного методу очищення, а домінуючим стає розчинникова дифузійна екстракція.

2. Числове моделювання прогнозує, що при базовій ефективності регенерації  $\eta_0 = 0,88$  сукупний ресурс за 10 циклів становить 16 263 л, що у 6,3 рази перевищує ресурс одноразового використання (2592 л).

3. Деградація має виражений нелінійний кумулятивний характер: ступінь відновлення робочого діапазону тиску  $\Psi$  до 10-го циклу знижується до 60,1 %, що значно більше, ніж спад масової ефективності регенерації  $\eta_{\text{рег}} = 72,2$  %. Основним обмежувальним чинником є накопичення незмивних залишків у вузьких міжпорових каналах, а не механічне руйнування матриці.

4. Проведений аналіз показав пріоритет двох параметрів впливу: початкова брудоемкість (оптимізація через гранулометрію пороутворювача) та ефективність регенерації (підвищення ультразвуковою обробкою у поєднанні із підігрітим розчинником). Збільшення  $m_{\text{емк},0}$  з 25 до 55 г підвищує сукупний ресурс у 2,8 рази.

5. Моніторинг  $\Delta P_0$  після кожної регенерації є найінформативнішим індикатором стану фільтра. Перевищення  $\Delta P_0$  понад 50 % від  $\Delta P_{\text{гр}}$  (у досліджуваній моделі — 0,125 МПа, досягається на ~10-му циклі) є сигналом для виведення елемента з експлуатації.

6. Отримані результати мають практичне значення для проектування та експлуатації фільтрувальних елементів у системах очищення трансформаторних олів і можуть бути використані для оптимізації режимів регенерації та підвищення ресурсу роботи фільтрів.

## Список використаних джерел

1. Siva Sai, R., Suresh, P., Prasad, M. N. V. V. S. & Raju, I. Degradation studies of electrical, physical and chemical properties of aged transformer oil. *J. Phys.: Conf. Ser.* 2020, 1706(1), 012056. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1706/1/012056>
2. Safiddine, L., Ghomari, A., Flazi, A., Seladji, M., Derdour, A. & Hamou, A. Regeneration of transformer insulating fluids using membrane separation technology. *Energies*. 2019, 12(3), 368. <https://doi.org/10.3390/en12030368>
3. Kaliuzhnyi, O. B. & Platkov, V. Ya. The structure and properties of porous poly(tetrafluoroethylene). *J. Polym. Res.* 2022, 29, 32. <https://doi.org/10.1007/s10965-022-02887-w>
4. Zhang, J., Li, Y., Zhang, X., Wang, Y., Liu, Y. & Zhang, Q. A robust copper oxide-based superhydrophobic microfiltration membrane for moisture-proof treatment of trace water in transformer oil. *Colloids Surf. A.* 2021, 625, 126843. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2021.126843>

Отримано: 03.04.2026. Прийнято: 17.04.2026. Опубліковано: 15.05.2026.