

## ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ОДЕРЖАННЯ ТВЕРДОФАЗНОГО ФОСФОНАТНОГО АНТИСКАЛАНТУ ДЛЯ ПІДГОТОВКИ ВОДИ В ЗВОРотноОСМОТИЧНІЙ ТЕХНОЛОГІЇ

Є. О. Орестов, Т. Є. Мігченко, Н. В. Гудим

Національний технічний університет України «КПІ», м. Київ

e-mail: [e.orestov@gmail.com](mailto:e.orestov@gmail.com)

*Робота присвячена вибору оптимальних характеристик інгредієнтів для синтезу твердофазного антискалтанту (ТФА), здатного рівномірно і стабільно дозувати в потік оброблюваної води інгібітори утворення скейлінгу. Для цього на основі аналізу широкого спектру аніонітів в якості носія фосфонатного інгібітору скейлінгу (ФІС) було обрано аніоніт, який продемонстрував максимальну здатність до сорбції-десорбції активних компонентів. Було вивчено природу і встановлено механізм взаємодії компонентів ТФА. Результати досліджень дозволили обрати оптимальний інгібітор для виготовлення ТФА, що здатен максимально десорбуватись з носія і демонструє вищий ресурс. Динамічні дослідження підтвердили ефективність і доцільність застосування ТФА для стабілізаційної обробки води в технології зворотного осмосу.*

*Ключові слова: антискаланти, фосфонати, аніоніт, скейлінг, зворотний осмос.*

### Вступ

Одною з основних проблем, що виникають у процесі використання зворотноосмотичних технологій, є відкладення важкорозчинних сполук на поверхні мембран. Найбільш розповсюдженим є відкладення малорозчинних солей твердості, яке має назву скейлінгу (англ. scaling).

Традиційні методи запобігання утворенню скейлінгу включають попередню обробку води за допомогою різноманітних реагентних методів на кшталт йонного обміну. Недоліками цих методів є висока вартість необхідного устаткування, необхідність споживання реагентів і утворення високомінералізованих або агресивних стічних вод.

Альтернативним методом запобігання утворенню скейлінгу в технології зворотного осмосу є попереднє дозування в воду антискалтантів — реагентів, що запобігають процесу кристалізації малорозчинних солей із перенасичених розчинів або уповільнюють цей процес, стримуючи кристалоутворення, поки концентрат не полишить мембранний елемент. Ефективність цього методу досить висока, проте вона суттєво залежить від правильності вибору типу та дози реагенту, який в свою чергу залежить від складу води та параметрів процесу знесолення. Порушення регламенту дозування антискалтантів призводить до безповоротного забруднення та руйнування зворотноосмотичних мембранних елементів, що викликає необхідність їх дострокової заміни. Реалізація даного метода потребує використання складного та дорогого дозувального обладнання, що виключає можливість регламентних порушень процесу дозування. Крім того, під час зберігання у робочих розчинах антискалтантів часто розвиваються мікроорганізми, продукти життєдіяльності яких стають причиною утворення на поверхні мембран біофоулінгу.

Таким чином, при використанні антискалтантів для запобігання утворення відкладень на поверхні зворотноосмотичних мембран постає необхідність у більш простому і надійному методі дозування в воду цих реагентів. Раніше нами був запропонований саме такий метод, що полягає в дозуванні реагентів в розчин шляхом десорбції з поверхні насиченого ними аніоніта. Останній було запропоновано називати твердофазним антискалтантом (ТФА) [2, 3, 13].

Твердофазний антискалтант одержували із аніоніту шляхом його обробки фосфонатними та полімерними інгібіторами скейлінгу. В одержаному матеріалі

аніонообмінна смола виступає в якості носія інгібіторів. Фосфонати виступають у якості основних інгібіторів скейлінгу, які діють за механізмом порогового ефекту [1]. Полімерний реагент діє як інгібітор скейлінгу за механізмами порогового та деформаційного ефекту, а також впливає на швидкість вивільнення фосфонатного інгібітора із аніоніту [2]. Результати наших попередніх досліджень показали принципову можливість за допомогою використання запропонованого матеріалу забезпечувати в обробленій воді постійну концентрацію інгібіторів в заданому інтервалі.

В той же час для ефективного використання запропонованого матеріалу необхідно визначити оптимальні умови його отримання, а саме тип аніоніту і фосфонатного інгібітора, а також режим їх взаємодії. Вирішення указаної задачі досягне лише при врахуванні інформації про механізм взаємодії інгредієнтів. Таким чином, метою даної роботи є визначення раціональних умов отримання твердофазного антискаланта на основі аналізу результатів вивчення механізму взаємодії компонентів, що входять у його склад.

### Об'єкти дослідження

Об'єктами дослідження в даній роботі є фосфонатні інгібітори скейлінгу (ФІС), широкий спектр аніонообмінних смол та модельний розчин для проведення десорбції.

Характеристики досліджуваних інгібіторів, що відрізняються об'ємами молекул та константами дисоціації, наведені в табл. 1.

Таблиця 1. Основні характеристики досліджуваних ФІС

Назва	Молекулярний об'єм, Å <sup>3</sup>	Константи дисоціації рK <sub>a</sub> (1a та 2a)	Застосування
ФІС1	209,02	0,32; 1,90	Антискаланти, антинакипіни
ФІС2	142,75	1,35; 2,87	

Досліджувані аніоніти відрізнялись природою матриці, функціональними групами, пористою структурою тощо. Їхні характеристики наведені в табл. 2.

Таблиця 2. Основні характеристики досліджуваних аніонітів

Зразок	Функціональний тип	Природа матриці	Тип пористої структури	ПОС, г-екв/дм <sup>3</sup>	Ефективний розмір гранул, мм	Коефіцієнт однорідності	Гранулометричний склад, мм	
A1	НОА	СДВБ	Макропористий	Гелевий	1,6	0,54	1,5	0,5 – 0,75
A2				1,2	0,62	1,4	0,3 – 1,2	
A3				1,35	0,64	1,55	0,315-1,0	
A4				1,34	0,65	1,6	0,25 - 1,5	
A5				1,3	0,4	1,2	0,315 - 1,25	
A6				1,63	0,61	1,23	0,315 - 1,25	
A7				1,1	0,6	1,57	0,315 - 1,25	
A8				1,1	0,68	1,1	0,64 ± 0,05	
A9	ВОА I типу	СДВБ	Гелевий	1,2	0,6	1,45	0,3 - 1,2	
A10				1,2	0,52	1,15	0,575 ± 0,05	
A11				1,15	0,63	1,42	0,315 - 1,25	
A12	ВОА II типу		1,3	0,49	1,1	0,575 ± 0,05		

НОА — низькоосновний аніоніт; ВОА — високоосновний аніоніт; АДВБ — акрилдивінілбензолний співполімер; СДВБ — стиролдивінілбензолний співполімер; ПОС — повна обмінна ємність.

Для дослідження процесу десорбції використовувалась модельна вода зі складом, вказаним у табл.3.

Таблиця 3. Склад модельної води для дослідження десорбції ФІС

Показник	Од. вимірювання	Значення
Концентрація СІ	мг-екв/дм <sup>3</sup>	2,83
Концентрація SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	мг-екв/дм <sup>3</sup>	2,5
Концентрація HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	мг-екв/дм <sup>3</sup>	4,5
Твердість загальна	мг-екв/дм <sup>3</sup>	3,85

### Методи дослідження та обробки результатів

Критерієм порівняння для вибору найбільш ефективних матеріалів для синтезу ТФА виступав коефіцієнт  $\beta$ , який показує здатність матеріалу до найбільш ефективного та стабільного дозування інгібітору до розчину, що оброблюється:

$$\beta = \frac{a_{dec}}{a_c - a_{dec}}, \quad (1)$$

де  $a_c$  – сорбція відповідного ФІС аніоном, мг-екв/см<sup>3</sup>;  $a_{dec}$  – десорбція відповідного фосфонату з аніоніту, мг-екв/см<sup>3</sup>.

Для визначення максимальної сорбції фосфонату аніонами зразки смол приводили в контакт з розчинами ФІС протягом 48 год. Після цього визначалась концентрація фосфору загального за ДСТУ ISO 6878:2008 та [10]. Сорбцію фосфонату розраховували за формулою:

$$a_c = \frac{(C_0 - C_K) \cdot V_{роз} \cdot z_{\phi}}{V_{ан} \cdot \nu_p \cdot M_{\phi}}, \quad (2)$$

де  $C_0$  і  $C_K$  – концентрація ФІС по Р у вихідному розчині та після сорбції відповідно, мг/дм<sup>3</sup>;  $V_{роз}$  – об'єм розчину ФІС, дм<sup>3</sup>, приведений у контакт із об'ємом аніоніту  $V_{ан}$ , см<sup>3</sup>;  $z_{\phi}$  – число еквівалентності ФІС;  $\nu_p$  – масова частка Р у ФІС;  $M_{\phi}$  – молярна маса ФІС, мг/ммоль.

Десорбцію активної речовини визначали шляхом приведення в 48-годинний контакт наважки ТФА з модельним розчином наведеного складу (табл. 3), а потім визначали вміст ФІС у рідкій фазі. Десорбцію фосфонату розраховували за формулою:

$$a_{dec} = \frac{C_K \cdot V_{роз} \cdot z_{\phi}}{m_{ан} \cdot \mu_{ан} \cdot k \cdot \nu_p \cdot M_{\phi}}, \quad (3)$$

де  $m_{ан}$  – наважка аніоніту, г;  $\mu_{ан}$  – граничний об'єм повітряно-сухого аніоніту, см<sup>3</sup>/г;  $k$  – коефіцієнт набухання аніоніту.

Еквівалентність обміну визначалась за методикою [12]. Кінетичні криві одержували в статичних умовах за методикою [11, 12].

Дослідження за динамічних умов проводили з використанням корпусів фільтрів для зернистих фільтрувальних матеріалів, що випускаються промисловістю. Об'єм завантаження становив 100 см<sup>3</sup>. Водогінна вода (загальна твердість 4,5–4,8 мг-екв/дм<sup>3</sup>) безпосередньо подавалася на фільтр зі швидкістю 1000 лит. об./год., після фільтру був встановлений лічильник-витратомір для фіксації поточної витрати води та пропущеного об'єму. Експеримент проводився до тих пір, поки концентрація десорбованого інгібітору залишилась в межах, рекомендованих для запобігання скейлінгу на поверхні зворотноосмотичних мембран: 0,004–0,033 мг-екв/дм<sup>3</sup> [7].

### Обговорення результатів

Дослідження сорбції та десорбції ФІС різними аніонами показали наступні результати, які представлені в табл. 4. Найвищим значенням  $\beta$  для обох ФІС характеризується зразок А6 в ОН-формі. А6 представляє собою макропористий низькоосновний стиролдивінілбензолний аніоніт із ПОЄ не менш ніж 1,6 моль-екв/дм<sup>3</sup>. Цей

аніоніт відрізняється високим вмістом функціональних груп, більш ніж 90% з яких є низькоосновними, відносно рівномірним гранулометричним складом, а також високою осмотичною стабільністю та хімічною чистотою. Для проведення усіх подальших досліджень процесу одержання зразків ТФА та вивчення їх властивостей обрано саме зразок А6.

Таблиця 4. Сорбція та десорбція ФІС1 та ФІС2

Зразок	Іонна форма	ФІС1			ФІС2		
		Сорбція, мг-екв/см <sup>3</sup>	Десорбція, мг-екв/см <sup>3</sup>	$\beta$	Сорбція, мг-екв/см <sup>3</sup>	Десорбція, мг-екв/см <sup>3</sup>	$\beta$
A1	ОН	1,52	0,51	0,50	1,47	0,23	0,19
	СІ	0,96	0,29	0,43	1,24	0,15	0,14
A2	ОН	1,38	0,49	0,55	1,30	0,26	0,25
	СІ	0,65	0,20	0,44	1,04	0,18	0,21
A3	ОН	1,28	0,41	0,47	1,27	0,23	0,22
	СІ	0,67	0,19	0,40	1,00	0,19	0,23
A4	ОН	1,29	0,44	0,52	1,22	0,17	0,16
	СІ	0,71	0,25	0,54	0,84	0,08	0,11
A5	ОН	1,10	0,39	0,55	1,05	0,24	0,30
	СІ	0,56	0,15	0,37	1,02	0,19	0,23
A6	ОН	1,01	0,37	0,58	1,58	0,39	0,33
	СІ	0,61	0,20	0,49	1,47	0,25	0,20
A7	ОН	0,99	0,29	0,41	0,98	0,22	0,29
	СІ	0,59	0,19	0,48	0,98	0,21	0,27
A8	ОН	0,87	0,21	0,32	1,00	0,13	0,15
	СІ	0,89	0,25	0,39	0,89	0,11	0,14
A9	ОН	0,96	0,21	0,28	1,15	0,23	0,25
	СІ	0,83	0,23	0,38	1,08	0,16	0,17
A10	ОН	1,06	0,29	0,38	1,05	0,16	0,18
	СІ	0,82	0,21	0,34	1,09	0,12	0,12
A11	ОН	0,93	0,20	0,27	0,99	0,14	0,16
	СІ	0,79	0,16	0,25	0,97	0,11	0,13
A12	ОН	1,18	0,42	0,55	1,10	0,21	0,24
	СІ	0,76	0,19	0,33	0,94	0,18	0,24

Із даних табл. 4 також очевидно, що із двох досліджуваних краще сорбується ФІС2, в той час як десорбується краще ФІС1. Для останнього вищими виявились і значення коефіцієнту  $\beta$ , що дозволяє допустити більшу принадність ФІС1 для використання в ТФА. Більші значення сорбції ФІС2, ніж ФІС1, відповідають даним про їх розміри молекул та константи дисоціації. Так, ФІС2, який має менший розмір молекули, здатен глибше проникати в фазу аніоніта і, завдяки вищому ніж у ФІС1 ступеню дисоціації, утворювати більш стійкі сполуки з його функціональними групами. Саме з цих причин значення коефіцієнту  $\beta$  для ФІС1 майже вдвічі вище, ніж для ФІС2 в той час як величина сорбції ФІС1 в залежності від форми аніоніту в 1,5-2,5 рази нижча за ФІС2.

Проте для остаточного висновку щодо вибору оптимального ФІС доцільним є також порівняння кінетичних характеристик зразків ТФА, виготовлених з використанням обох ФІС.

Вивченню кінетичних параметрів процесу сорбції ФІС аніонітом повинно передувати встановлення характеру взаємодії компонентів. Для цього відомим методом вивчалась еквівалентність обміну ФІС на хлорид-іон при взаємодії з аніонітом в хлоридній формі. Результати дослідження представлені в табл. 5.

Таблиця 5. Дослідження еквівалентності обміну ФІС на СІ

Параметр	ФІС1	ФІС2
Вихідна концентрація ФІС, мг-екв/дм <sup>3</sup>	22,4	48,5
Вихідна концентрація СІ, мг-екв/дм <sup>3</sup>	0	0
Рівноважна концентрація ФІС, мг-екв/дм <sup>3</sup>	1,86	2,73
Рівноважна концентрація СІ, мг-екв/дм <sup>3</sup>	20,7	7,2
Сорбція ФІС, мг-екв/см <sup>3</sup>	1,13	1,39
Десорбція СІ із НОА мг-екв/см <sup>3</sup>	1,14	1,44
Еквівалентність обміну А, %	96,9	96,7
Число еквівалентності	2,02	2,07

Як видно із даних, наведених в табл. 5, сорбція ФІС в обох випадках супроводжується вивільненням у розчин хлорид-йонів в еквівалентних кількостях, що підтверджує припущення про суто йонообмінну природу взаємодії ФІС з аніоном.

При цьому встановлені значення чисел еквівалентності для реакцій обміну обох ФІС на хлорид-йони, прийняті рівними 2, узгоджуються із існуючими літературними даними [6] і дозволяють в подальшому виконувати всі необхідні розрахунки із використанням еквівалентних концентрацій.

З метою встановлення необхідного часу взаємодії НОА із розчинами ФІС при одержанні ТФА, а також для одержання додаткової інформації щодо механізму взаємодії ФІС із НОА, було проведено дослідження кінетичних особливостей перебігу процесів сорбції ФІС НОА. Дослідження було виконано із використанням ОН-форми НОА А6 при приведенні в контакт розчинів ФІС із НОА за умови постійного перемішування. За результатами одержаних експериментальних даних було побудовано залежності ступеня досягнення рівноваги  $F_{сорб}$  від часу сорбції (рис.1). Процес десорбції здійснювався аналогічно: зразки аніоніту, насичені ФІС, приводились в контакт з модельним розчином. Кінетичні криві процесу десорбції представлені на рис. 2.

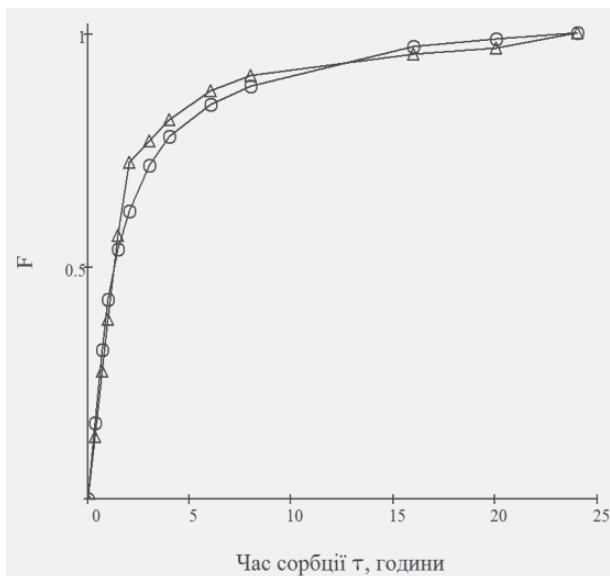


Рис. 1. Кінетичні криві процесу сорбції ФІС1 (°) та ФІС2 (Δ).

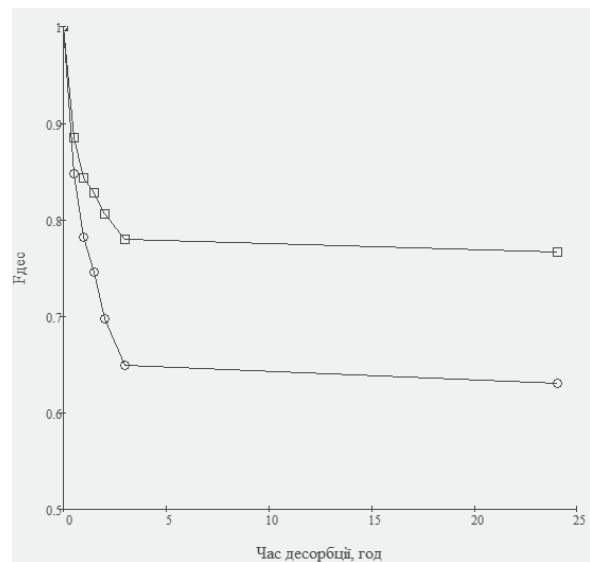


Рис. 2. Кінетичні криві процесу десорбції ФІС1 (°) та ФІС2 (□).

З метою встановлення механізму, який визначає перебіг кінетичного процесу сорбції та десорбції ФІС з НОА, за результатами досліджень було побудовано графіки залежності

$F_{сорб} = f(\sqrt{\tau})$  (рис. 3) та  $F_{десорб} = f(\sqrt{\tau})$  (рис. 4). Результати дослідження дозволяють стверджувати про внутрішньодифузійний механізм кінетичного процесу. Доказом даного механізму є лінійний характер початкової ділянки графіка залежності ступеня досягнення рівноваги  $F$  від квадратного кореня з часу сорбції  $\sqrt{\tau}$  (до значення  $F_{сорб} \approx 0,7$ ) та подальше викривлення ходу графіка залежності (рис. 2). Жодні інші механізми кінетичного процесу не дають такого типу залежності [11].

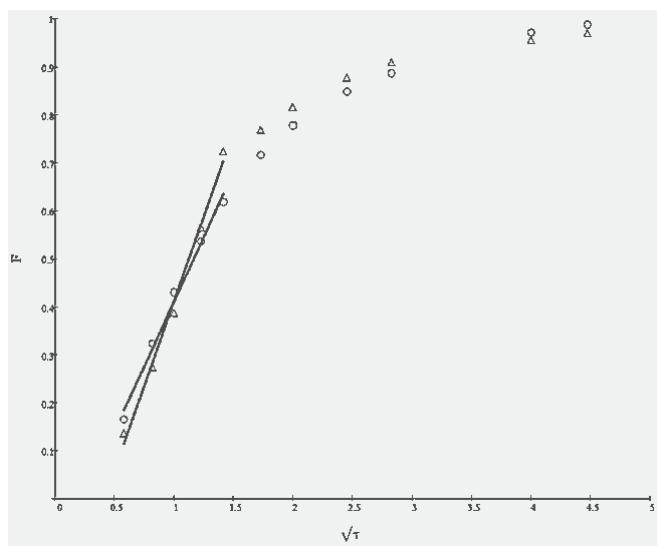


Рис. 3. Залежність ступеня досягнення рівноваги  $F_{сорб}$  від  $\sqrt{\tau}$  для ФІС1 (°) та ФІС2 (Δ).

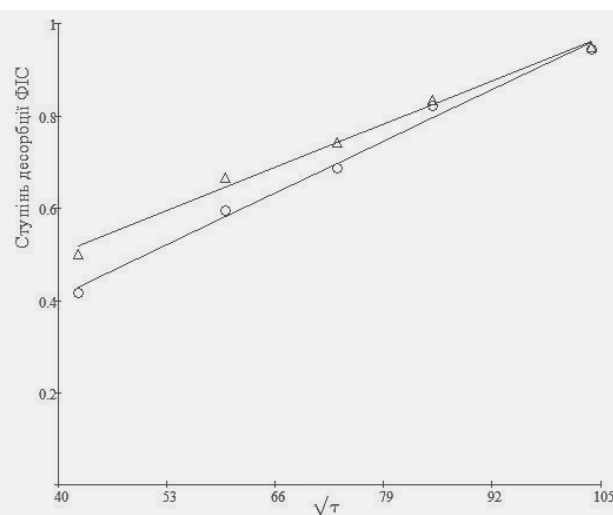


Рис. 4. Залежність ступеню десорбції ФІС1 (°) та ФІС2 (Δ) від  $\sqrt{\tau}$ .

Таким чином, швидкість процесу сорбції обох досліджуваних ФІС обмежується швидкістю взаємодифузії йонів фосфонатів та протийонів ОН у зерні аніоніту. При цьому, враховуючи співвідношення розмірів йонів ОН та йонів ФІС, можна стверджувати, що лімітує процес поглинання ФІС зерном НОА саме стадія підведення у глибину йонів ФІС із поверхні зерна аніоніту.

Після встановлення механізму кінетичного процесу стає можливим застосування відповідних рівнянь для розрахунку коефіцієнтів дифузії (взаємодифузії) йонів ФІС у зерно аніоніту та з нього. У випадку внутрішньої дифузії коефіцієнти знаходяться із відомого рівняння Бойда–Адамсона [12]. Обчислені значення коефіцієнтів дифузії для досліджуваних ФІС наведені в табл. 6.

Таблиця 6. Значення коефіцієнтів дифузії при сорбції та десорбції ФІС з НОА А6

№	ФІС	Температура, °С	Коефіцієнт дифузії процесу сорбції $D_c, \text{см}^2/\text{с}$	Коефіцієнт дифузії процесу десорбції $D_{дес}, \text{см}^2/\text{с}$
1	ФІС1	20	$5,188 \cdot 10^{-9}$	$1,438 \cdot 10^{-10}$
2	ФІС2		$5,567 \cdot 10^{-9}$	$1,741 \cdot 10^{-10}$

Як видно, для обох ФІС одержані значення коефіцієнтів дифузії процесу сорбції дуже близькі, так само як і для процесу десорбції. Проте для обох процесів швидкість дифузії дещо вища для ФІС2, що узгоджується з інформацією про менший розмір молекул цієї сполуки у порівнянні з ФІС1.

Для остаточного вибору більш ефективного ТФА, було прийнято рішення про необхідність проведення динамічного експерименту. Результати представлені на рис. 5.



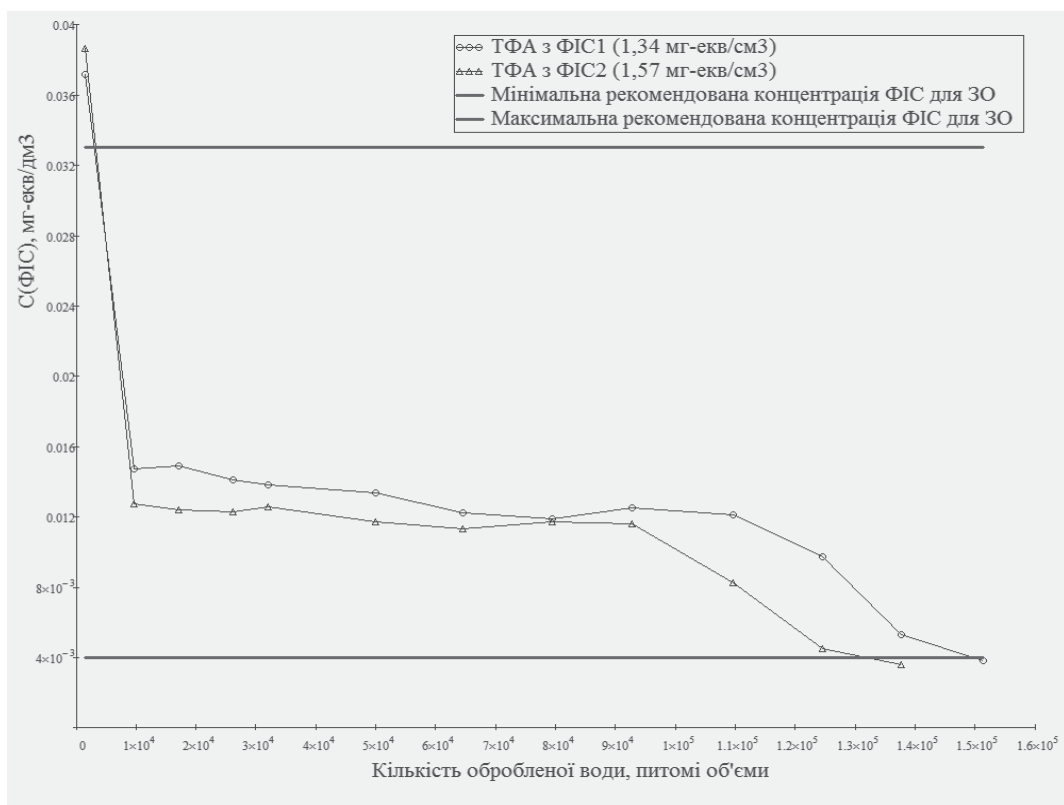


Рис. 5. Вихідні криві десорбції ФІС з ТФА.

Результати дослідження десорбції ФІС з ТФА в динамічних умовах показали, що при даному складі оброблюваної води та швидкості фільтрації ресурс ТФА на основі ФІС1 склав близько  $1,5 \cdot 10^5$  об./об., а на основі ФІС2 –  $1,3 \cdot 10^5$  об./об. Це дає підставу стверджувати, що більш ефективним при створенні ТФА на основі НОА є використання ФІС1.

Останній висновок співпадає з тим, що був зроблений на основі порівняння значень коефіцієнтів  $\beta$ , наведених в табл. 4. Це є доказом адекватності запропонованого нами коефіцієнту  $\beta$  як критерію порівняння здатності ТФА до стабільного дозування інгібітору до розчину.

## Висновки

Результати проведених досліджень дозволили встановити характеристики інгредієнтів для одержання ТФА з оптимальними властивостями для використання в процесі дозування інгібітору до води, що подається на зворотноосмотичну очистку, а саме:

а) в якості носія використовується стиролдивінілбензолний низькоосновний макропористий аніоніт в ОН-формі з вмістом функціональних груп не менше  $1,6$  мг-екв/см<sup>3</sup>, більш ніж 90% з яких є низькоосновними, відносно рівномірним гранулометричним складом, а також високою осмотичною стабільністю та хімічною чистотою;

б) в якості інгібітора скейлінгу найкраще підходить фосфонатний інгібітор скейлінгу з молекулярним об'ємом  $209,02 \text{ \AA}^3$  та константами дисоціації 0,32 та 1,90.

Використання ТФА, синтезованого на основі вищевказаних інгредієнтів, дозволяє здійснювати стабільне дозування активного компоненту в заданих межах і забезпечувати стабілізаційну обробку води для зворотного осмосу в кількості  $1,5 \cdot 10^5$  об'ємів на об'єм ТФА.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПОЛУЧЕНИЯ ТВЕРДОФАЗНОГО АНТИСКАЛАНТА ДЛЯ ПОДГОТОВКИ ВОДЫ В ОБРАТНООСМОТИЧЕСКОЙ ТЕХНОЛОГИИ

**Е. А. Орестов, Т. Е. Митченко, Н. В. Гудим**  
Национальный технический университет Украины «КПИ», г. Киев  
e-mail: [e.orestov@gmail.com](mailto:e.orestov@gmail.com)

*Работа посвящена выбору ингредиентов с характеристиками, оптимальными для синтеза твердофазного антискаланта (ТФА), способного равномерно и стабильно дозировать в поток обрабатываемой воды ингибиторы образования скейлинга. Для этого на основе анализа широкого спектра анионитов в качестве носителя фосфонатного ингибитора скейлинга (ФИС) был выбран анионит, который продемонстрировал максимальную способность к сорбции-десорбции активных компонентов. Была изучена природа и установлен механизм взаимодействия компонентов ТФА. Результаты исследований позволили выбрать оптимальный ингибитор, который способен максимально десорбироваться с носителя и обеспечивает достижение высшего ресурса ТФА. Динамические исследования подтвердили эффективность и целесообразность применения ТФА для стабилизационной обработки воды в технологии обратного осмоса.*

*Ключевые слова: антискаланты, фосфонаты, анионит, скейлинг, обратный осмос.*

## STUDY OF SYNTHESIS OF SOLID STATE ANTISCALANT FOR WATER TREATMENT IN REVERSE OSMOSIS TECHNOLOGY

**Y. Orestov, T. Mitchenko, N. Gudym**  
National technical university of Ukraine "KPI", Kyiv  
e-mail: [e.orestov@gmail.com](mailto:e.orestov@gmail.com)

*This work is devoted to the selection of the optimal characteristics of the ingredients for the synthesis of the solid state antiscalant (SSA), which is able to equally and consistently dosing of the scaling inhibitors into the stream of treated water. For this purpose, anion exchanger which shows the maximum capacity for absorption-desorption of active ingredients was chosen based on analysis of a wide range of anion exchangers as carrier of phosphonate scale inhibitor. The nature and mechanism of interaction between the components of SSA was studied. The results of the research allow to choose the optimum inhibitor for the synthesis of SSA, which is able to maximum desorption from the carrier and shows the highest resource. Dynamic studies have confirmed the efficacy and feasibility of TFA for stabilizing water treatment in reverse osmosis technology.*

*Keywords: antiscalants, phosphonates, anionite, scaling, reverse osmosis.*

### Список літератури

1. Орестов Є. О., Митченко Т. Є. Фізико-хімічні основи дії інгібіторів фоулінгу мембран зворотного осмосу та шляхи їхнього оптимального використання / Журнал «Вода і водоочисні технології. Науково-технічні вісті». — 2013. — №2(12). — С. 3—17.
2. Orestov E., Mitchenko T., Shevchuk E. Antiscaling water treatment applying functionalized filter media / Proceedings of 1<sup>st</sup> International Conference on Desalination using Membrane Technology. — Sitges, Spain. — 7–10 April 2013.
3. Orestov E., Mitchenko T. Novel method of stabilizing water pretreatment for reverse osmosis desalination / Proceedings of 5<sup>th</sup> IWA Young Water Professionals Conference. — Kyiv, Ukraine. — 26–28 June 2013.
4. Demadis, K. D. Metal-phosphonate chemistry: Synthesis, crystal structure of calcium-aminotris(methylenephosphonate) and inhibition of CaCO<sub>3</sub> crystal growth / K. D. Demadis, S. D. Katarachia // Phosphorus, Sulfur, and Silicon. — 2004. — Vol. 179, № 3. — P. 627—648.



5. Рудакова, Г. Я. Теория и практика применения комплексонов в энергетике / Г. Я. Рудакова, В. Е. Ларченко, Н. В. Цирульникова // Современные технологии водоподготовки и защиты оборудования от коррозии и накипеобразования. — М. : ГосНИИ «ИРЕА». — 2003. — С.11—19.
6. Чаусов, Ф. Ф. Ингибирование роста кристаллов солей щелочноземельных металлов в водных растворах : теория и технические приложения : дис. ... канд. хим. наук / Федор Федорович Чаусов ; Удмуртский гос. ун-т. — Ижевск, 2005. — 163 с.
7. Федоренко, В. И. Ингибирование осадкообразования в установках обратного осмоса / В. И. Федоренко // Мембраны. Серия «Критические технологии». — 2003. — № 2. — С. 23—30.
8. Bendiksen B. Multifunctional scale inhibitors / B. Bendiksen, L. J. Persinski, R. J. Schaper. / US Patent EP0481668A1. — 1992.
9. Investigation of CaCO<sub>3</sub> scale inhibition by PAA, ATMP and PAPEMP / Y. Tang, W. Yang, X. Yin et al. // Desalination. — 2008. — Vol. 228, № 1. — P. 55—60.
10. Standard Test Method for Phosphonate in Brine. / ASTM D6501 — USA: NACE. — 2005. — 5 p.
11. Селеменев, В. Ф. Практикум по ионному обмену / В. Ф. Селеменев, Г. В. Славинская, В. Ю. Хохлов, Г. А. Чикин. — Воронеж: Изд-во ВГУ. — 1999. — 173 с.
12. Полянский, Н.Г. Методы исследования ионитов / Н. Г. Полянский, Г. В. Горбунов, Н. Л. Полянская. — М.: Химия. — 1976. — 208 с.
13. Пат. на винахід 104361 Україна, МПК C02F 1/42. Засіб для стабілізаційної обробки води, спосіб одержання такого засобу, наповнювач картриджів фільтрів, що містить цей засіб, та спосіб обробки води на мембранах зворотного осмосу з використанням вказаного засобу [Текст] / Т.Є. Мітченко; З. В. Малецький; Є. О. Орестов; О. А. Шевчук ; заявник і патентовласник Мітченко Т. Є. — заявл. 30.07.2012; опубл. 27.01.2014, Бюл. № 2. — 3 с. : іл.