

УДК 539.4

О.М. Волинець, М.Г. Крищук

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна

**Чисельне моделювання НДС конструкційних матеріалів фільтроелементів в умовах пошкоджень від кавітаційної корозії**

На сьогоднішній день методи фільтраційної очистки різних типів забруднених рідин, як побутових, так і технічного призначення є дуже важливим аспектом сучасної цивілізації. За типом фільтрації їх можна умовно поділити на такі групи: механічні, фізико-хімічні, біологічні, магнітні, гравітаційні та інші [1]. Всі вони мають своє призначення, переваги та недоліки. Механічні фільтри використовуються для очистки рідин від твердих домішок та являють собою сітчастий елемент, що утримує домішки всередині фільтру. Фізико-хімічні фільтри основані на відповідних процесах. Найбільш поширеним є метод сорбції. Процес оснований на поглинанні домішок із рідин або газів поверхнями твердих тіл (адсорбентів). Ультразвукові фільтри можна віднести до категорії фізико-хімічних фільтрів. Вони працюють на основі явища кавітації, яке виникає внаслідок інтеграції у фільтрувальну конструкцію ультразвукового поля. При очищенні забруднених в'язких рідин це призводить до кавітаційної корозії – руйнування поверхні металу фільтроелементу, спричинене одночасною дією ударних тисків у рідині (тріскання бульбашок, утворення каверн) і корозії або кавітаційного зношування, як різновиду механічного зношування. Традиційним критерієм ерозійної стійкості матеріалу служить втрата його маси (об'єму) за певний період часу.

*Об'єктом дослідження* в даній роботі вибрано конструкції з фільтрувальним елементом для ультразвукових процесів очищення забруднених рідин різної в'язкості, що супроводжуються кавітаційними явищами.

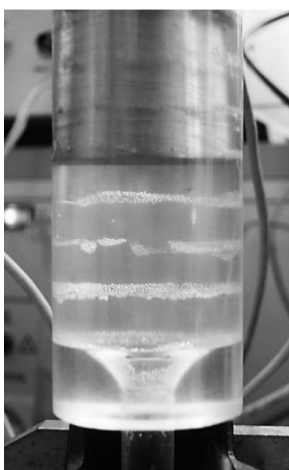
*За мету роботи* покладено визначення напружено-деформованого стану (НДС) фрагменту конструкції фільтроелементу з покращеними характеристиками ресурсу працездатності матеріалів в існуючих системах ультразвукової очистки забруднених рідин та оцінки об'єму її деформаційних

пошкоджень в умовах кавітаційної корозії при гідродинамічному навантаженні частинками засміченої рідини.

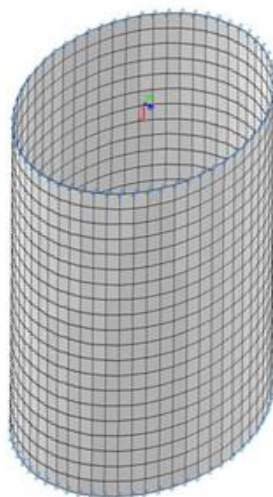
Дослідна конструкція проточного ультразвукового кавітатора [2] являє собою трубчатий резонансний вібратор (рис.1а), відрізок труби з зовнішнім діаметром 75 мм і внутрішнім діаметром 62 мм. Джерелом коливань в даному випадку слугують чотири п'єзоелектричні приводи, зібрані за півхвильовою акустичною схемою зі ступінчастим трансформатором швидкості, ступінь малої площі якого була невидною і фіксувалася уздовж твірної на зовнішній поверхні трубчастого вібратора. Резонансна частота коливань задана величиною у 22,2 кГц. Довжина труби вібратора становить 80 мм, що істотно менше половини довжини хвилі коливань згинальної форми по довжині труби. Тому під час роботи кавітатора поверхня вібратора здійснює на нульовій моді чисто радіальні коливання.

В існуючих системах ультразвукової очистки забруднених рідин параметри гідродинамічного навантаження циліндричного фільтрувального елемента визначають його НДС. Він зазвичай представляє собою циліндричну тонкостінну металеву оболонку та має типову коміркову структуру (рис.1б).

Для спрощення чисельних розрахунків НДС розглянуто типовий фрагмент циліндричної оболонки фільтрувального елемента у вигляді суцільного деформівного середовища напівпростору з вигнутою поверхнею (рис.2) відповідного радіусу, яке сприймає удари частинок забрудненої рідини.



а)



б)

Рис. 1. Конструкція проточного ультразвукового кавітатора (а)  
та модель фільтрувального елемента циліндричного типу  
діаметром 60 мм з розмірами комірки 20 мкм (б)

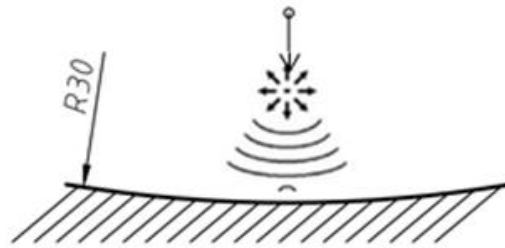


Рис. 2. Схематичне зображення процесу удару частинки  
забруднювача з поверхнею фільтроелементу

При розробці моделі гідродинамічного навантаження фільтрувального елемента вважали, що зважена частинка забруднювача рідини, опинившись біля кавітаційного пухирця, відчуває вплив потоку рідини від рухомих з великою швидкістю стінок бульбашок або вплив ударної хвилі при схлопуванні бульбашок. За даними роботи [3] характер зміни швидкості стінки кавітаційного пухирця в фазі розширення є симетричним відображенням фази стиснення.

5

Вважаючи рух стінки кавітаційної бульбашки рівноприскореним, рівняння її руху в рідині може бути представлено у вигляді [2]:

$$\frac{dv}{dt} = \frac{\pi K_{\text{оп}}}{8m} \rho d^2 (at - v)^2, \quad (1)$$

де  $m$  – маса частинки забруднювача;  $v$  – швидкість руху частинки забруднювача;  $a$  – прискорення руху частинки забруднювача;  $K_{\text{оп}}$  – коефіцієнт лобового опору;  $d$  – діаметр частинки,  $\rho$  – густина рідини.

Інтегруючи вираз (1) у межах від 0 до  $\tau = t_{\text{max}} - t_k$ , отримали аналітичні співвідношення для визначення величини швидкості прискореного руху забруднених частинок:

$$v = a\tau + \sqrt{\frac{a}{A}} \cdot \frac{1 - e^{2\sqrt{aA}\tau}}{1 + e^{2\sqrt{aA}\tau}}. \quad (2)$$

В дослідженні в якості забрудненої рідини, що підлягає фільтрації виступають вода, бензин та машинне мастило АМГ-10. Результати розрахунку швидкості руху частинок забруднювача, що знаходиться біля стінки

пульсуючої кавітаційної бульбашки, виконані за співвідношеннями (2), де  $A = \frac{\pi K_{оп} \rho d^2}{8m}$  та представлені у вигляді графіків на рис. 3. Отримані результати свідчать про можливість досягнення частинками забруднювача надзвукової швидкості переміщення в рідині.

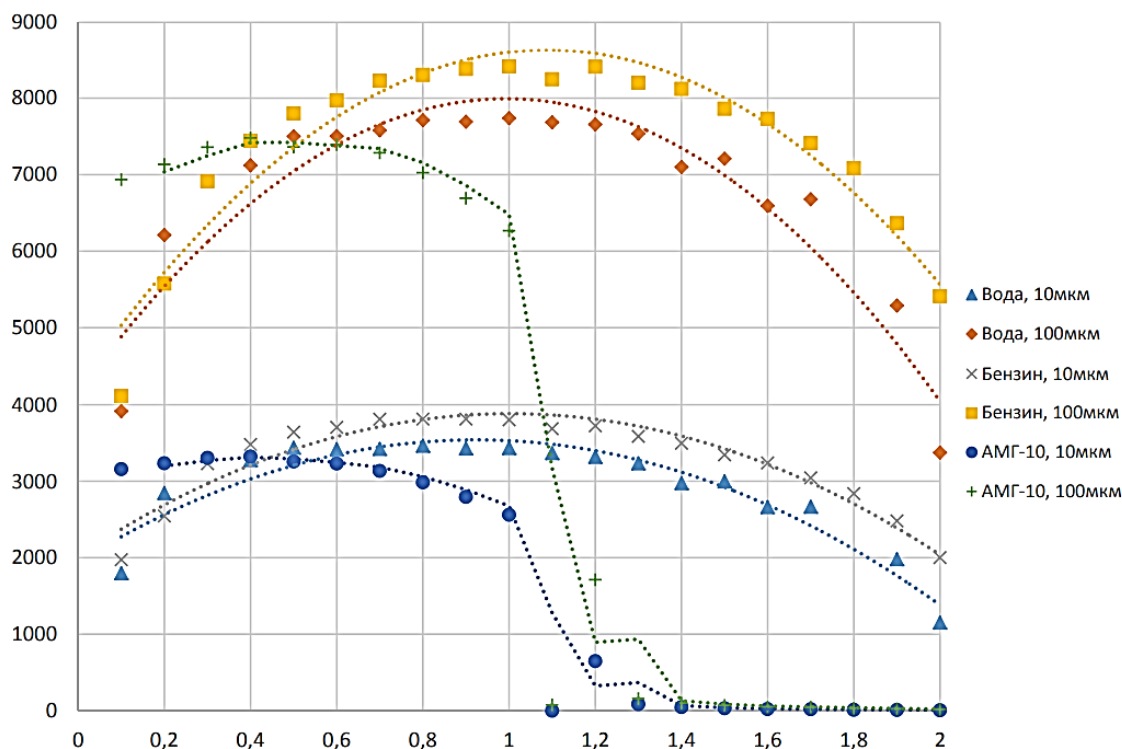


Рис. 3. Залежність швидкості руху частинок забруднювача різної маси і розмірів, що знаходяться у кавітаційному середовищі біля стінки фільтроелементу [2]

При розробці математичних моделей НДС фільтроелементу прийняли гіпотези про ізотропні та пружно-пластичні характеристики матеріалів Д16АТ, АМГ61Гк, 12Х18Н10Т для його виготовлення. Механічні та фізичні властивості матеріалів наведені в таблиці 1 такі, як границя міцності,  $\sigma_s$ , границя пропорційності,  $\sigma_m$ , модуль пружності,  $E$ , ударна в'язкість,  $KCU$ , густина,  $\rho$  та твердість по Брінеллю,  $HV$ .

Таблиця 1. Механічні та фізичні властивості вибірки матеріалів фільтроелементу

Матеріал	$\sigma_s$	$\sigma_m$	$E$	$KCU$	$\rho$	$\nu$	$HV$
	МПа	МПа	МПа	кДж/м <sup>2</sup>	Кг/м <sup>3</sup>	-	МПа

Д16АТ	480	350	$0,72 \cdot 10^5$	0,3	2800	0,3	420
АМГ61Гк	355	190	$0,71 \cdot 10^5$	0,2	2640	0,33	650
12Х18Н10Т	529	225	$1,98 \cdot 10^5$	0,0215	7900	0,28	1790

Для розрахунку силової взаємодії рухомих частинок забруднювача з нерухомою поверхнею фільтроелементу, що деформується, використовували методу, в основанні якої лежить розв'язок контактної задачі Герца. Такий підхід може бути застосованим для обчислення деформацій і напружень фільтроелементу з врахуванням енергії удару частинок забруднювача.

При збільшенні сили удару частинки забруднювача до поверхні фільтроелементу контактні напруження можуть досягати границі міцності. Згідно роботи [4], руйнування твердої стінки відбувається за умови, якщо напруження на контактуючій поверхні перевищує  $K_\delta \sigma_\epsilon$ , де  $\sigma_\epsilon$  – границя міцності матеріалу твердої стінки;  $K_\delta$  – коефіцієнт динамічності при ударному навантаженні.

$$K_\delta = 1 + \sqrt{1 + \frac{v^2}{2g\delta_{ст}}} \quad (3)$$

Таблиця 2. Максимальні значення еквівалентних за Мізесом напружень,  $\sigma_{екв}$

Середовище	Матеріал	$\sigma_{екв}$ , МПа, $d = 100\text{мкм}$	$\sigma_{екв}$ , МПа, $d = 100\text{мкм}$
Вода	Д16АТ	30061	27541
	АМГ61Гк	28468	27394
	12Х18Н10Т	50593	49726
Бензин	Д16АТ	23353	21580
	АМГ61Гк	22276	21261
	12Х18Н10Т	39605	38790
АМГ-10	Д16АТ	25837	23841
	АМГ61Гк	24672	23510
	12Х18Н10Т	43694	42711

Чисельні експерименти по визначенню НДС імітаційних моделей фільтроелементів, виготовлених з різних типів матеріалів ультразвукового фільтрування води, бензину та АМГ-10 проведені в середовищі програмного коду ANSYS WB v.19.0 Student Edition. Результати обчислень НДС матеріалів фільтроелементу представлені полями ізоліній переміщень, деформацій та еквівалентних за Мізесом напружень. Екстремальні величини розрахункових

значень даних величин напружень для гідросилового навантаження поверхні фільтроелементу частинками засміченої рідини діаметром 10мкм та 100 мкм представлені в таблиці 2.

#### Висновки:

Отримані результати дозволяють оцінити кавітаційну стійкість конструкційних матеріалів при гідросиловому навантаженні і забезпечити аналіз закономірностей НДС фільтроелементу для обґрунтування вибору застосування ударостійких матеріалів в ультразвуковому технологічному обладнанні. Розмір частинки забруднювача від 10 мкм до 100 мкм майже не впливає на виникаючі напруження матеріалу фільтроелементу, і навпаки менша частинка викликає навіть менші напруження, хоч і різниця не велика.

#### Список використаних джерел

1. Луговський О.Ф., Чорний В.І. Застосування ультразвукових коливань у пристроях фільтрування рідини // Вестник Национального технического университета Украины «КПИ». Машиностроение.- 1999. - Вил. 35.-с. 111-119.
2. Зилинский А.И., Луговской А.Ф., проф., Гришко И.А., Луговской А.Ф. Ультразвуковая кавитация в современных технологиях / А.Ф. Луговской, Н.В. Чухраев. - К.: Видавничо-поліграфічний центр «Київський університет», 2007. - 244 с.
3. Розенберг Л.Д. Труды VI всесоюзной акустической конференции, серия Д11. Изд-во АН СССР, 1968
4. Ландау, Л. Д., Лившиц, Е. М. Теория упругости: Москва: Наука, 1987. – 246с.