

УДК 621.647.231

Луговський О. Ф., Кришук М. Г., Зілінський А. І., Шульга А. В., Гришко І. А.
КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, Україна

Ударна взаємодія частинки бруду з фільтроелементом при ультразвуковому кавітаційному фільтруванні

Анотація. В даній роботі проведено імітаційне моделювання ударної взаємодії частинки забруднювача з твердою поверхнею фільтроелементу, який розміщений в кавітаційному середовищі при ультразвуковому фільтруванні забруднених рідин. Представлено вираз закону збереження енергії, який враховує домінуючі фактори, що діють у процесі взаємодії забруднювача з поверхнею фільтроелементу. Наведено результати порівняльного аналізу даних математичного моделювання в програмному середовищі ANSYS® Academic Research Mechanical, Release 2019R3 ударної взаємодії частинки бруду діаметром 10мкм та 100мкм з двома типами фільтроелементів, виготовленими зі сталі 12X18H10T та фторопласту Ф4.

Ключові слова: фільтрування; ультразвукова кавітаційна обробка; ультразвукове поле; ультразвукова кавітація, удар, імітаційне моделювання, деформації, напруження

Якісна та надійна робота гідросистем, а також ефективність багатьох технологічних процесів забезпечується за допомогою фільтрування технічних рідин. Проблеми якісного фільтрування рідин вирішують за допомогою застосування різних способів фільтрування, наприклад, фільтрів з пористими або сітчастими перегородками [1-3], відцентрових фільтрів [1], фільтрами, що створюють високі відносні швидкості переміщення фільтрувальної перегородки і забрудненої рідини, наприклад, за рахунок швидкого обертання в рідині циліндричної фільтрувальної перегородки [4]. Усі ці способи фільтрування мають декілька суттєвих недоліків. По-перше, це необхідність в періодичному механічному очищенні фільтроелементу за допомогою протитиску або періодичного обертання ножів, які прочищають пази щільних фільтроелементів, та за допомогою низькочастотних вібраційних електроприводів, які забезпечують періодичне або безперервне скидання осаду з фільтруючої перегородки. Ще один суттєвий недолік полягає в малій сміттеємності фільтроелементів у фільтрах тонкого очищення, що призводить до швидкого засмічування фільтроелементу і, як наслідок, зростання перепаду тиску на ньому [5].

Існує ще один спосіб фільтрування рідини, який полягає в розміщенні фільтроелементу в ультразвуковому полі, інтенсивність якого перевищує поріг виникнення кавітації в рідині за даних умов. Особливості фільтрування в даному випадку забезпечуються вторинними ефектами, що супроводжують явище ультразвукової кавітації, а саме, мікротечіями, дегазацією, акустичною турбулентністю, ударними хвилями, потужними кумулятивними мікроструменями і т. ін. [6-8]. Однак, широкому застосуванню цього способу фільтрування заважає недостатня вивченість деяких процесів в кавітаційному середовищі, а саме, вплив частинок забруднювача на стійкість та довговічність фільтроелементу та деталей корпусу, відсутність рекомендацій з вибору конструкційних матеріалів для подібних конструкцій. Тому проведемо дослідження процесу ударної взаємодії частинки забруднювача з фільтроелементом, виготовленим зі сталі 12X18H10T або фторопласту, при ультразвуковому кавітаційному фільтруванні забрудненої рідини.

Для розрахунку силової взаємодії рухомих частинок забруднювача з нерухомою поверхнею фільтроелементу, що деформується, доцільно використовувати методику, в основанні якої лежить розв'язок контактної задачі Герца. Такий підхід може бути застосований для обчислення деформацій і напружень фільтроелементу з врахуванням енергії удару частинок забруднювача [9].

Під час взаємодії твердої частинки забруднювача з нерухою стінкою відбувається удар і напруження, які виникають в цей час, можуть бути значно більші ніж межа пружності. Вони концентруються на незначній поверхні та діють лише протягом частки секунди. При розрахунку задачі Герца допускають, що при статичному навантаженні в тілах відбуваються лише пружні деформації. Ударну взаємодію частинки забруднювача з поверхнею нерухої стінки по нормалі до поверхні можна представити згідно рис.1. Тобто, частинка забруднювача рухається як жорстке тіло з дуже великою швидкістю $v > 1000 \text{ м/с}$, кут між напрямом руху і площиною поверхні φ твердої стінки, що деформується, складає майже 90° . Частинка діє на нерухою поверхню з силою F , яку можна представити у вигляді нормальної сили F_n та сили тертя F_T .

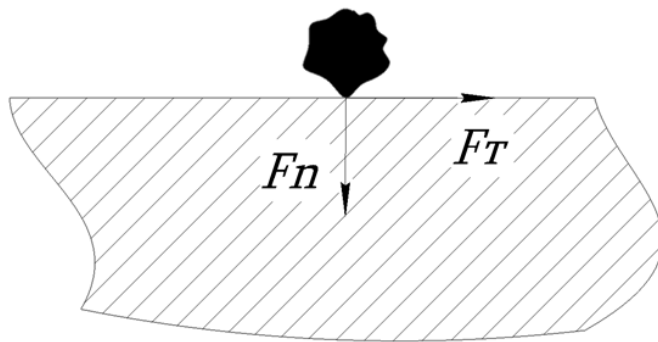


Рис. 1. Силовa схема ударної взаємодії частинки забруднювача з поверхнею фільтроелементу

ударному навантаженні.

Проаналізувавши отримані результати моделювання видно, що напруження, які виникають під час зіткнення частинки невеликих розмірів при надзвукових швидкостях з нерухою поверхнею, перевищують межі міцності досліджених конструкційних матеріалів. Зіткнення таких частинок з фільтрувальною перегородкою викликає ерозійне руйнування фільтрувального матеріалу, що потребує ретельного підбору конструкційних матеріалів для виготовлення фільтрів, які працюють в ультразвуковому кавітаційному середовищі.

Основою побудови математичної моделі став саме закон збереження енергії. Передбачається, що кінетична енергія руху частинки забруднювача при контакті з нерухою поверхнею фільтроелементу переходить в енергію пружної деформації його матеріалу, тертя на контактних поверхнях та енергію ударних хвиль, що поширюються по частинці забруднювача та нерухомій поверхні. Тому доцільно буде записати

$$E_{\kappa 1} = E_{y1} + E_{y2} + E_{mp} + E_{n2} + E_{\epsilon 1} + E_{\epsilon 2},$$

де: $E_{\kappa 1}$ - кінетична енергія частинки забруднювача; E_{y1}, E_{y2} - енергія пружних деформацій частинки забруднювача та нерухої поверхні; E_{mp}, E_{n2} - втрати енергії на тертя, пластичні деформації та інші види втрат; $E_{\epsilon 1}, E_{\epsilon 2}$ - хвильова енергія частинки забруднювача та фільтроелементу, яка визначається об'ємами, що охоплені ударною хвилею.

Також проведено математичне моделювання ударної взаємодії частинки бруду з фільтроелементом при ультразвуковому кавітаційному фільтруванні з використанням проєкційно-сіткових методів скінченних елементів та скінченних різниць, які реалізовані в програмному забезпеченні ANSYS® Academic Research Mechanical, Release 2019R3 [11]. Для виготовлення фільтроелементу обрано зразки з сталі 12X18H10T та фторопласту Ф4 з ізотропними фізико-механічними характеристиками. Границя статичної міцності матеріалу

При збільшенні сили удару частинки забруднювача до поверхні фільтроелементу контактні напруження збільшуються і можуть досягати границі міцності. Згідно роботи [10] руйнування твердої стінки відбувається за умови, якщо напруження на контактуючій поверхні перевищує $K_d \sigma_s$, де σ_s - границя міцності матеріалу твердої стінки; K_d - коефіцієнт динамічності при

заготовки зі сталі 12X18H10T дорівнює 490 МПа, а для фторопласту Ф4 – 32 МПа. Для моделі забруднювача використовувались частинки іржі (Fe_2O_3) сферичної форми діаметром 10 мкм та 100 мкм. Початкова швидкість жорстких частинок забруднювача вибрана як мінімальна швидкість. Для розглянутих в дослідженні чотирьох розрахункових схем з різними типами матеріалів фільтроелемента швидкість двох видів частинок іржі дорівнювала 2000 м/с. В якості імітаційної моделі фільтроелементу обрали обмежену частину циліндру діаметром 8 мм. Така форма вибрана з огляду на проведення подальшого натурного експерименту. Співвідношення товщини фільтроелемента та діаметра частинки забруднювача підбиралося експериментально з метою виконання умови повного нівелювання енергії, що виникає внаслідок співудару двох тіл.

Дискретизація об'ємів контактуючих тіл для проведення обчислень деформацій та напружень фільтроелемента виконувалась тетраїдальними скінченними елементами в кількості 431 089 для моделей з частинками забруднювача 100 мкм (рис.2а) та відповідно – 396 863 для моделей з частинками забруднювача 10 мкм (рис.2б).

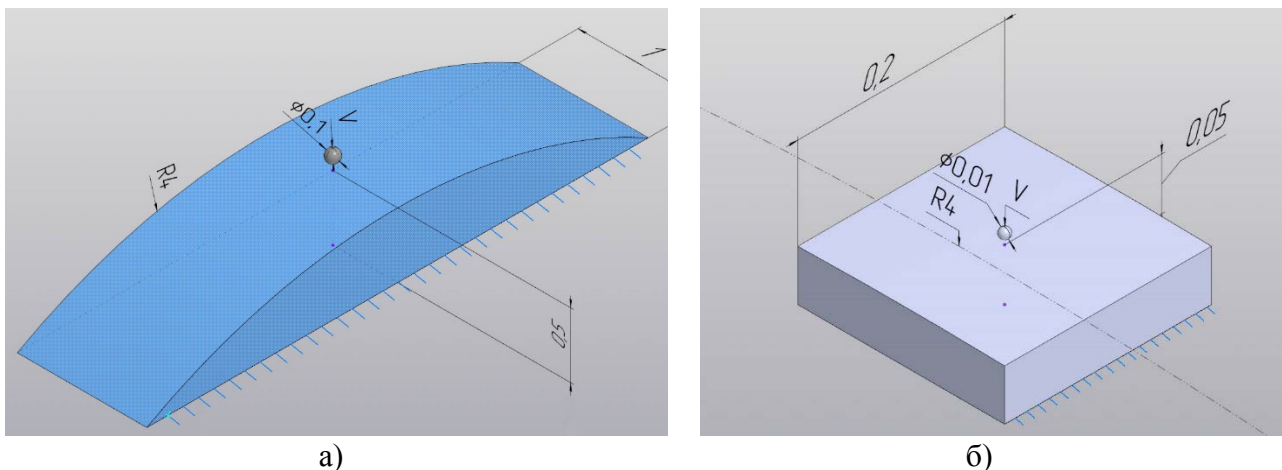


Рис. 2. Імітаційні моделі для дослідження ударної взаємодії частинки забруднювача з поверхнею фільтроелемента. Розміри наведені в міліметрах. (а - для забруднювача діаметром 100 мкм; б - для забруднювача діаметром 10 мкм.)

Аналіз отриманих результатів моделювання показує, що напруження, які виникають під час зіткнення частинки невеликих розмірів при надзвукових швидкостях з нерухомою поверхнею, перевищують межі міцності досліджених конструкційних матеріалів. Зіткнення таких частинок з фільтрувальною перегородкою викликає ерозійне руйнування фільтрувального матеріалу, що потребує ретельного підбору конструкційних матеріалів для виготовлення фільтрів, які працюють в ультразвуковому кавітаційному середовищі. В результаті моделювання отримано, що сталь 12X18H10T в два рази менше задіяна в процесах кавітаційної ерозії у порівнянні з фторопластом Ф4. Для підбору кавітаційно стійкого матеріалу для виготовлення фільтроелементів потрібно збільшити кількість досліджуваних модельних матеріалів та підтвердити результати моделювання натурним експериментом.

Список використаних джерел

1. Белянин П.Н., Черненко Ж.С. Авиационные фильтры и очистители гидравлических систем.- М: Машиностроение, 1964.- 293 с.
2. Абрамов Е.И., Колесниченко К.А., Маслов В.Т. Элементы гидропривода. - К. : "Техніка", 1977
3. Патент Японии №61129012, МПК В01D 24/26, опубл. 17.06.86 г.
4. Финкельштейн З.Л. Применение и очистка рабочих жидкостей для горных машин.- М.: Недра, 1986. -232 с.
5. Новицкий Б.Г. Применение акустических колебаний в Химико-технологических процессах (Процессы и аппараты химической и нефтяной технологии). - М.: Химия, 1983. - 192 с.

6. Агранат Б.А., Башкиров В.И., Китайгородский Ю.И., Хавский Н.Н. Ультразвуковая технология / Под ред. Б.А. Аграната. - М.: Металлургия, 1974. - 503 с.
7. Патент № UA 55323; 17.03.03. Бюл. № 3; Чорний В.І., Луговський О.Ф., Мовчанюк А.В. Спосіб обробки і очистки рідини та пристрій для його використання.
8. Луговской А.Ф. Ультразвуковая кавитация в современных технологиях / А.Ф. Луговской, Н.В. Чухраев. - К.: Видавничо-поліграфічний центр «Київський університет», 2007. - 244 с.
9. Ландау, Л. Д., Лившиц, Е. М. Теория упругости: Москва: Наука, 1987. 246с.
10. Глушак, Б. Л., Куропатенко, В. Ф., Новиков, С. А. Исследование прочности материалов при динамических нагрузках: Новосибирск: Наука, 1992. 295с.
11. ANSYS® Academic Research Mechanical, Release 2019R3 [Електронний ресурс] / Режим доступу до ресурсу: <https://www.ansys.com/en-in/academic/free-student-products>.