

# Моделювання ударної взаємодії частинки бруду з фільтроелементом при ультразвуковому кавітаційному фільтруванні

А. І. Зілінський • О. Ф. Луговський • М. Г. Кришук • І. А. Гришко • А. В. Шульга

КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, Україна

Received: 09 January 2020 / Accepted: 24 February 2020

**Анотація.** В 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. Обґрунтовані та розписані складові джерел енергії, які діють на забруднювач при контакті з нерухомою поверхнею фільтру. Наведено результати порівняльного аналізу даних математичного моделювання в програмному середовищі ANSYS® Academic Research Mechanical, Release 2019R3 ударної взаємодії частинок бруду діаметром 10мкм та 100мкм з двома типами матеріалів фільтроелементів, виготовленим зі сталі 12X18H10T та фторопласту Ф4.

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

## Вступ

Ефективність багатьох технологічних процесів, а також якісна та надійна робота гідросистем забезпечується за допомогою фільтрування технічних рідин. Проблеми якісного фільтрування рідин вирішують за допомогою застосування різних способів фільтрування, наприклад, фільтрів з сітчастими або пористими перегородками [1–4], 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 [5].

Всі вище зазначені способи фільтрування мають декілька суттєвих недоліків. Перш за все, це необхідність в періодичному механічному очищенні фільтроелементу за допомогою протитиску або періодичного обертання ножів, які прочищають пази щілинних фільтроелементів, та за допомогою низькочастотних вібраційних електроприводів, які забезпечують періодичне або безперервне скидання осаду з фільтруючої перегородки. Ще один недолік полягає в малій сміттєємності фільтроелементів у фільтрах тонкого очищення, що призводить до швидкого засмічування фільтроелементу і, як наслідок, зростання перепаду тиску на ньому [6].

Однак існує ще один спосіб фільтрування рідини, який полягає в розміщенні фільтроелементу в ультразвуковому полі, інтенсивність якого перевищує поріг виникнення в рідині кавітації. Особливості фільтрування в даному випадку забезпечуються вторинними ефектами, що супроводжують явище ультразвукової кавітації, а саме, дегазацією, мікротечіями, ударними хвилями, акустичною турбулентністю, потужними кумулятивними мікроструменями і т. ін. [7–10]. 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.

Метою статті є дослідження процесу ударної взаємодії частинки забруднювача з фільтроелементом, виготовленим зі сталі 12X18H10T або фторопласту, при ультразвуковому кавітаційному фільтруванні забрудненої рідини.

✉ О. Ф. Луговський  
atoll-sonic@ukr.net

✉ А. І. Зілінський  
zilinski.andrew@gmail.com

✉ М. Г. Кришук  
krys@ukr.net

### Методи та матеріали

Для розрахунку силової взаємодії рухомих частинок забруднювача з нерухою поверхню 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 [11].

Насправді, 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 поверхню нерухою 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  $\varphi$  твердої стінки, що деформується, складає майже  $90^\circ$ . Частинка діє на нерухому поверхню з силою  $F$ , яку можна представити у вигляді нормальної сили  $F_n$  та сили тертя  $F_T$ .

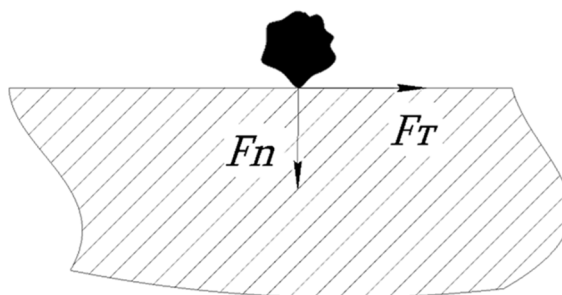


Рис. 1. Силовa схема ударної взаємодії частинки забруднювача з поверхню фільтроелементу

При збільшенні сили удару частинки забруднювача до поверхні фільтроелементу контактні напруження збільшуються і можуть досягати границі міцності. Згідно роботи [12], руйнування твердої стінки відбувається за умови, якщо напруження на контактуючій поверхні перевищує  $K_D \sigma_e$ , де  $\sigma_e$  – границя міцності матеріалу твердої стінки;  $K_D$  – коефіцієнт динамічності при ударному навантаженні.

Для розрахунку глибини занурення частинок забруднювача в нерухому поверхню фільтроелементу необхідно розв'язати систему рівнянь з теорії механіки суцільного середовища про вдавлювання жорсткої сфери у деформівний напівпростір. Через складність розрахунку ударних хвиль деформації, задачу зводимо до розв'язання системи рівнянь для однієї з множини частинок ударної взаємодії частинки забруднювача та нерухою стінки [13].

В якості початкових умов приймалося, що в момент часу  $t = t_0$  швидкість руху частинки забруднювача сферичної форми масою  $m_q$  та радіусом  $r_q$  дорівнює  $V_0$ , швидкість переміщення нерухою поверхні тіла фільтроелементу масою  $m_m$ , яке обмежене напівпростором (рис.1) дорівнює нулю. Відомі пружні характеристики матеріалів частинки забруднювача та фільтроелементу – модулі пружності  $E_1, E_2$  та коефіцієнти Пуассона  $\nu_1, \nu_2$ . Границя міцності матеріалу поверхні фільтроелементу  $\sigma_e$  менше ніж границя міцності матеріалу частинки забруднювача. Взаємодія відбувається під кутом, близьким до нормалі нерухою поверхні.

Виходячи з початкових умов, розрахунок змінних параметрів сили удару проводився для моментів часу, які визначалися послідовною зміною часу взаємодії на величину приросту  $\Delta t$ . Усі розрахунки продовжувалися до початку зворотного руху частинки забруднювача  $t_1$ , а згодом до закінчення взаємодії  $t_2$ . Час взаємодії визначався залежністю

$$t = \sum_{i=1}^n \Delta t_i. \quad (1)$$

Припустимо, що ударна взаємодія частинки забруднювача та матеріалу нерухою поверхні фільтроелементу відбувається в момент часу  $t_0$ . Також в цей момент будь-які види напруженого стану в обох тілах відсутні. Через приріст часу  $\Delta t$ , тобто в момент часу  $t_1 = t_0 + \Delta t$  в контактуючих тілах утворюються просторово локалізовані зони напружено-деформованого стану обсягами  $\delta_1$  та  $\delta_2$ , обумовленими сферами з

радіусами  $r = v_{yg} \cdot t_1$ . Це дає змогу розрахувати маси деформованого об'єму матеріалу в частинці та в тілі фільтроелементу за формулами:

$$\begin{aligned} m_\delta &= \rho_m \cdot \pi (v_{yg} \cdot t)^3, \text{ при } m_\delta < m_m; \\ m_\delta &= m_m, \text{ при } m_\delta > m_m, \end{aligned} \quad (2)$$

де:  $\rho_m$  – щільність матеріалу фільтроелементу, кг/м<sup>3</sup>;  $v_{yg}$  – швидкість поширення ударної хвилі, м/с;  $m_\delta$  – маса деформованого тіла, кг.

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

$$E_{\kappa 1} = E_{y1} + E_{y2} + E_{mp} + E_{n2} + E_{e1} + E_{e2}, \quad (3)$$

де:  $E_{\kappa 1}$  – кінетична енергія частинки забруднювача;  $E_{y1}, E_{y2}$  – енергія пружних деформацій частинки забруднювача та нерухомих поверхні;  $E_{mp}, E_{n2}$  – втрати енергії на тертя, пластичні деформації та інші види втрат;  $E_{e1}, E_{e2}$  – хвильова енергія частинки забруднювача та фільтроелементу, яка визначається об'ємами, що охоплені ударною хвилею.

Співвідношення між енергією хвилі деформації та пружною деформацією раніше досліджувалось в роботі [14]. Результати показують, що в кожній окремій хвилі енергія пружних деформацій дорівнює кінетичній енергії хвилі, але при накладенні декількох хвиль стиснення і розтягування цей баланс порушується, оскільки по-різному підсумовується енергія. В той час, коли хвиля відбивається від вільної поверхні тіла, хвиля стиснення додається до відбитої хвилі і нерухома поверхня звільняється від енергії деформацій. Як результат, кінетична енергія частинок подвоюється. Однак, при відбитті хвилі деформації від жорсткої, локально zdeформованої стінки, все відбувається навпаки, тобто енергія деформацій подвоюється за рахунок розвантаження частинок тіла від кінетичної енергії. Такі процеси, а саме, повне розвантаження і подвоєння деформацій, можуть відбуватися тільки для тіл простої форми, наприклад, стрижня. Якщо тіла складної форми, то збільшення енергії пружної деформації за рахунок енергії хвилі відбувається лише частково. Підсумувавши все вище зазначене, слід підкреслити, що величина поверненої хвильової енергії пропорційна енергії пружної деформації.

Для подальших розрахунків даної моделі будемо враховувати тільки часткове повернення первинної хвилі деформації стиснення і розтягування. Всі інші хвилі, які формуються в тілах в результаті проходження первинних хвиль, враховувати не будемо. Рівняння передачі енергії в цьому випадку можемо записати у вигляді [12]:

$$E_{\kappa 1} (1 - k_g \eta) = E_{mp} + E_{n2}, \quad (4)$$

де:  $k_g$  – коефіцієнт збільшення пружної деформації за рахунок енергії хвилі, який змінюється у межах від 1,5 до 2,0;  $\eta$  – коефіцієнт передачі кінетичної енергії

$$\eta = \frac{E_{ymp}}{E_{\kappa 1}}, \quad (5)$$

де  $E_{ymp}$  – енергія пружної деформації частинки забруднювача та фільтроелементу, Дж.

Щоб визначити поле напружень ударно взаємодіючих тіл, потрібно записати закон розподілу енергії в процесі удару. Для визначення співвідношення між кількістю енергії, що витрачається на формування пружних (оборотних) деформацій у взаємодіючих тілах, та кількістю енергії, яка необхідна для формування пластичних (необоротних) деформацій, використовувались закони збереження енергії імпульсу. Тому ударну взаємодію можемо описати наступною системою рівнянь:

$$\begin{aligned} \frac{m_q v^2}{2} &= \frac{2}{\eta} \left( \frac{m_q u_1^2}{2} + \frac{m_\delta u_1^2}{2} \right), \\ m_q (\vec{v} - \vec{u}_1) &= \vec{F}_{cp} \cdot \Delta t, \\ -m_\delta \vec{u}_2 &= \vec{F}_{cp} \cdot \Delta t, \end{aligned} \quad (6)$$

де:  $m_q, m_\delta$  – маса частинки забруднювача та деформованого тіла, охоплених хвилями деформації, в момент часу  $t$ ,

кг;  $v$  – швидкість частинки забруднювача до удару, м/с;  $u_1, u_2$  – швидкості мас  $m_q$  і  $m_d$  після удару, м/с;  $F_{cp}$  – середнє зусилля, яке діє в інтервалі часу  $\Delta t$ , Н.

Дана система рівнянь має такі невідомі параметри, як:  $\eta$ ,  $u_1, u_2$ ,  $F_{cp}$ . Для визначення коефіцієнта передачі кінетичної енергії можна скористатися наступним виразом:

$$\eta = \frac{2F_{y_{cp}} \cdot \Delta h_y}{m_q v^2}, \quad (7)$$

де:  $F_{y_{cp}}$  – середнє зусилля пружних деформацій в інтервалі часу  $\Delta t$ , Н;  $\Delta h_y$  – приріст пружної деформації за час  $\Delta t$ , м.

Середнє зусилля за час  $\Delta t$  деформації фільтроелементу визначається залежністю:

$$F_{y_{cp}} = \frac{F_y(h_y - \Delta h_y) + F_y(h_y)}{2}, \quad (8)$$

де  $h_y$  – пружна деформація.

В рамках одного кроку за час  $\Delta t$  визначаються всі параметри, що входять в систему рівнянь (6) в наступному порядку.

Визначаються значення сили пружної взаємодії в контактї. Значення  $F_y$  розраховується при кожному значенні  $t_i$ . Кожен раз уточнюється значення коефіцієнта відновлення –  $\eta$ . У формулу підставляється значення, отримане на попередньому кроці по часу. В якості початкового значення при розрахунку можна прийняти  $\eta_1 = 1$ .

Із системи рівнянь (6) далі при кожному значенні часу  $t_i$  знаходяться швидкості частинки забруднювача та нерухомої поверхні після удару:

$$\begin{aligned} u_{2i} &= \frac{F_{y_{cp}} \cdot \Delta t}{m_{di}}; \\ u_{1i} &= \frac{F_{y_{cp}} \cdot \Delta t}{m_{qi}}. \end{aligned} \quad (9)$$

Для визначення сили за період часу  $\Delta t$  удару сполучених тіл використовувалася теорія контактної взаємодії Герца. При розрахунках поля напружень, що змінюються з плином часу, необхідно використовувати рівняння, яке встановлює зв'язок між силою  $F_{y_{cp}}(\Delta t)$ , що діє на поверхнях контакту двох тіл, які піддаються взаємному стисненню та загальною деформацією  $\Delta h(\Delta t)$ .

Розрахунок пружних деформацій в процесі ударної взаємодії тіл крім рівнянь Герца враховує закони передачі кінетичної енергії та імпульсу. При цьому, при розв'язанні система рівнянь (6), (8) доповнена умовою

$$F_{cp} = F_{y_{cp}}(\Delta h). \quad (10)$$

Розв'язок системи рівнянь відносно невідомих параметрів дозволяє визначити величину приросту пружної деформації  $\Delta h_y$  за період часу  $\Delta t$ . Виходячи з формули Герца, значення пружної деформації обчислювалося за формулою:

$$h_y = 1/1,5 \sqrt{\frac{F_{y_{cp}}}{k_n}}, \quad (11)$$

$$\text{де } k_n = 1,33\sqrt{r} \frac{E_1 E_2}{(1-\nu_1^2)E_2 + (1-\nu_2^2)E_1}.$$

Загальна пружна деформація за час удару  $t$  визначалася підсумовуванням приростів.

$$h_y = \sum_{i=1}^n \Delta h_{yi}. \quad (12)$$

## Результати дослідження

Опираючись на теоретичну модель, 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 [15]. У якості матеріалу для виготовлення фільтроелементу обрано зразки з сталі 12X18H10T та фторопласту Ф4 з ізотропними фізико-механічними характеристиками, які отримані за літературними даними [16–17]. Границя статичної міцності матеріалу заготовки зі сталі 12X18H10T дорівнює 490 МПа, а для фторопласту Ф4 – 32 МПа. Для моделі забруднювача використовувались частинки іржі ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) сферичної форми діаметром 10 мкм та 100 мкм. Початкова швидкість жорстких частинок забруднювача вибрана як мінімальна швидкість, величини якої отримані в роботі [18] при моделюванні даних процесів. 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 фільтроелемента обрали обмежену частину циліндру діаметром 8 мм. Така форма вибрана з огляду на проведення подальшого натурального 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 гексагональними скінченними елементами в кількості 431 089 для моделей з частинками забруднювача 100 мкм (рис. 2, а) та відповідно – 396 863 для моделей з частинками забруднювача 10 мкм (рис. 2, б).

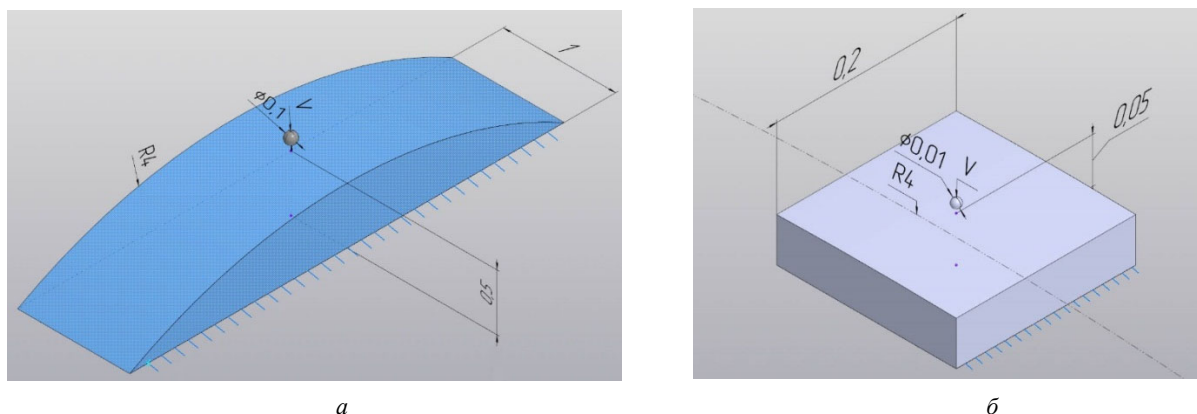


Рис. 2. Імітаційні моделі для дослідження ударної взаємодії частинки забруднювача з поверхнею фільтроелемента. Розміри наведені в міліметрах. (а – для забруднювача діаметром 100 мкм; б – для забруднювача діаметром 10 мкм)

Перший варіант моделювання проведено для ударної взаємодії забруднювача діаметром 10 мкм з фільтроелементом зі сталі 12X18H10T при ультразвуковому кавітаційному фільтруванні. В результаті чисельних розрахунків отримано величини максимальної повної деформації поверхні фільтроелемента, яка дорівнює  $4.40\text{e-}6$  м (рис. 3, а) та максимального еквівалентного за Мізесом напруження – 1310 МПа. Зона імовірного руйнування даного матеріалу складає 5,6 діаметрів частинки забруднювача (рис. 3, б).

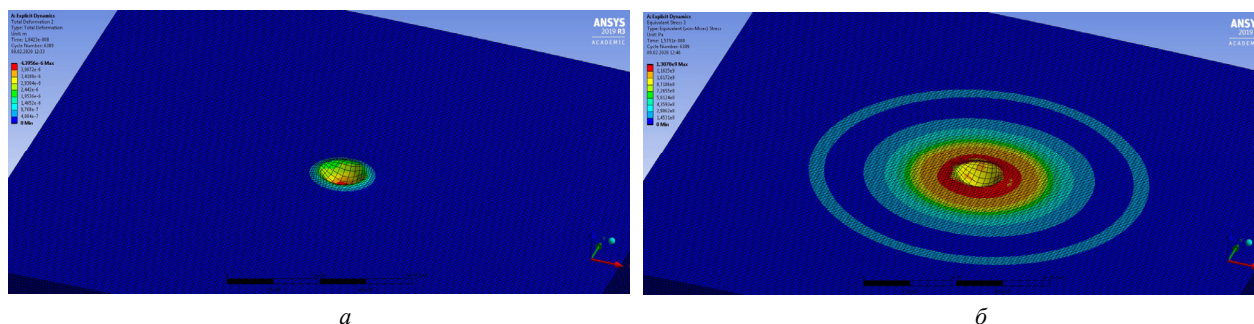


Рис. 3. Результати моделювання (а – повна деформація; б – еквівалентне за Мізесом напруження, що виникає в зоні контакту)

Наступним моделювалась взаємодія частинки забруднювача діаметром 100 мкм з фільтроелементом зі сталі 12Х18Н10Т. В цьому випадку максимальна повна деформація дорівнює  $4.09\text{e-}5$  м (рис. 4, *a*), а максимальне еквівалентне за Мізесом напруження досягає 1100 МПа. Зона імовірного руйнування 5,2 діаметрів частинки забруднювача. (рис. 4, *б*).

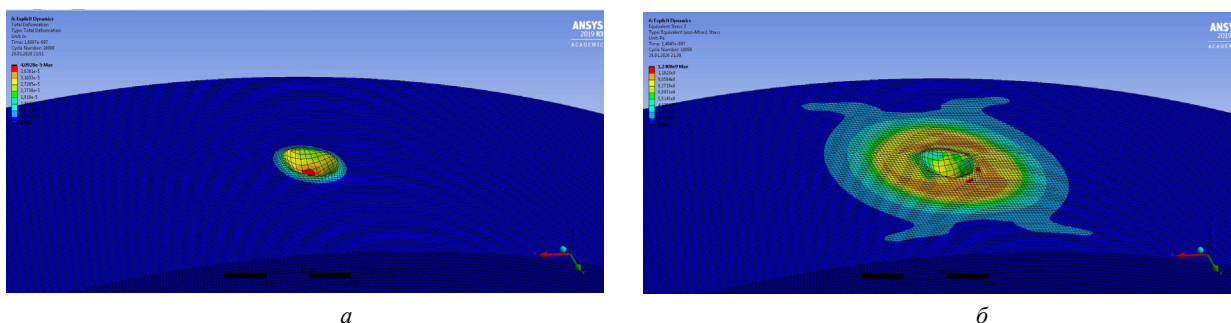


Рис. 4. Результати моделювання (*a* – повна деформація; *б* – еквівалентне за Мізесом напруження, що виникає в зоні контакту)

Після цього проводилось моделювання взаємодії іншого матеріалу поверхні фільтроелементу, а саме фторопласту Ф4 з частинкою забруднювача діаметром 10 мкм. Як результат, отримано величини максимальної деформації –  $8.83\text{e-}6$  м (рис. 5, *a*) та максимальне за Мізесом еквівалентне напруження – 50 МПа. Зона імовірного руйнування становить 6,5 діаметрів частинки забруднювача (рис. 5, *б*).

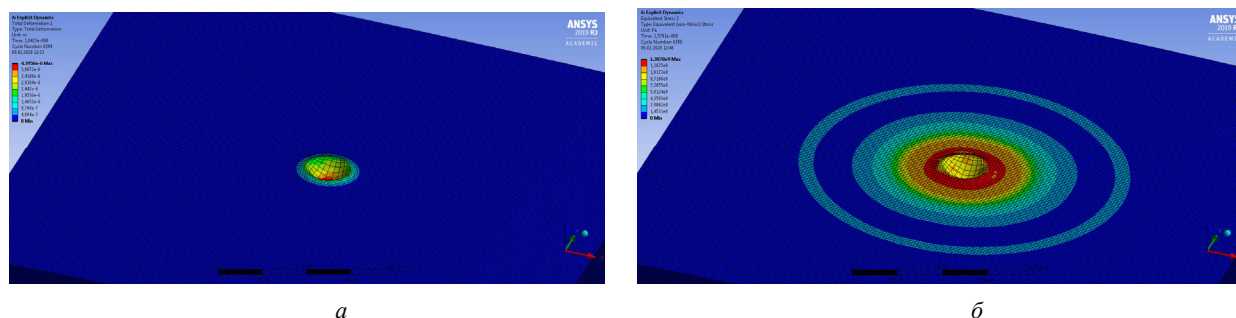


Рис. 5. Результати моделювання (*a* – повна деформація; *б* – еквівалентне за Мізесом напруження, що виникає в зоні контакту)

І для порівняння було виконано моделювання взаємодії частинки забруднювача діаметром 100 мкм з фторопласту Ф4. В такому варіанті отримали максимальну повну деформацію  $9.37\text{e-}5$  м (рис. 6, *a*) та максимальне еквівалентне за Мізесом напруження, яке досягає 50 МПа. Зона імовірного руйнування складає 6,2 діаметрів частинки забруднювача (рис. 6, *б*).

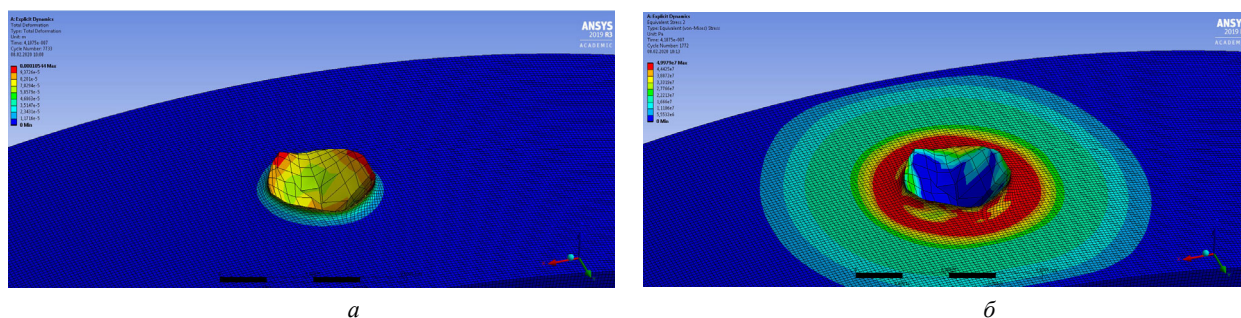


Рис. 6. Результати моделювання (*a* – повна деформація; *б* – еквівалентне за Мізесом напруження, що виникає в зоні контакту)

## Висновки

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.

## References

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, 1977. – К.: “Техніка”.
3. Патент Японии №61129012, МПК В01D 24/26, опубл. 17.06.86 г.
4. Касьян М.И., Кузьмин В.И., Предприятие ПЯ Г-4372. 1976. Щелевой фильтр, СССР, Pat.504542.
5. Финкельштейн З.Л. Применение и очистка рабочих жидкостей для горных машин.- М.: Недра, 1986. – 232 с.
6. Новицкий Б.Г. Применение акустических колебаний в Химико-технологических процессах (Процессы и аппараты химической и нефтяной технологии). - М.: Химия, 1983. – 192 с.
7. Агранат Б.А., Башкиров В.И., Китайгородский Ю.И., Хавский Н.Н. Ультразвуковая технология / Под ред. Б.А. Аграната. - М.: Металлургия, 1974. – 503 с.
8. 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.
9. 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.
10. Луговской А.Ф. Ультразвуковая кавитация в современных технологиях / А.Ф. Луговской, Н.В. Чухраев. - К.: Видавничо-поліграфічний центр “Київський університет”, 2007. – 244 с.
11. Ландау, Л. Д., Лившиц, Е. М. Теория упругости: Москва: Наука, 1987. – 246 с.
12. Глушак, Б. Л., Куропатенко, В. Ф., Новиков, С. А. Исследование прочности материалов при динамических нагрузках: Новосибирск: Наука, 1992. – 295 с.
13. Морозов Н. Петров, Ю. В. Проблемы динамики разрушения твердых тел: Санкт-Петербург: С.-Петербургского университета, 1997. – 132 с.
14. Кильчевский, Н. А. Теория соударений твердых тел: Киев: Наукова думка, 1969. – 246 с.
15. ANSYS® Academic Research Mechanical, Release 2019R3 [Електронний ресурс] / Режим доступу до ресурсу: <https://www.ansys.com/en-in/academic/free-student-products>.
16. Johnson, G. R., Cook, W. H. Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures. Engineering Fracture Mechanics. 1985.
17. Hunt, E. M., Malcolm, S., Pantoya, M. L., та ін. Impact ignition of nano and micron composite energetic materials. International Journal of Impact Engineering. 2009.
18. Луговський О.Ф. Математична модель процесу фільтрації в ультразвуковому полі підвищеної інтенсивності / О.Ф. Луговський, А.І. Зілінський, І.А. Гришко. – Вісник НТУУ “КПІ”. Серія машинобудування. Київ. – 2015. Вип. 74, №2. – С. 11–17. DOI: <https://doi.org/10.20535/2305-9001.2015.74.50413>.

## Моделирование ударного взаимодействия частицы грязи с фильтроэлементом при ультразвуковом кавитационном фильтровании

А. И. Зилинский, О. Ф. Луговской, Н. Г. Кришук, И. А. Гришко, А. В. Шульга

**Анотация.** В работе проведен имитационное моделирование ударного взаимодействия частицы загрязнителя с твердой поверхностью фильтроэлемента, который расположен в кавитационном среде при ультразвуковом фильтровании загрязненных жидкостей. Представлены выражение закона сохранения энергии, который учитывает доминирующие факторы, действующие в процессе взаимодействия загрязнителя с поверхностью фильтроэлемента. Обоснованные и расписаны составляющие источников энергии, которые действуют на загрязнитель при контакте с неподвижной поверхностью фильтра. Приведены результаты сравнительного анализа данных математического моделирования в программной среде ANSYS® Academic Research Mechanical, Release 2019R3 ударного взаимодействия частиц грязи диаметром 10 мкм и 100 мкм с двумя типами фильтроэлементов, изготовленным из стали 12X18H10T и фторопласта Ф4. **Ключевые слова:** фильтрование; ультразвуковая кавитационная обработка; ультразвуковое поле; ультразвуковая кавитация, удар, имитационное моделирование, деформации, напряжение

## Modeling the shock interaction of a mud particle with a filter element at ultrasonic cavitation filtering

A. Zilinskyi, A. Luhovskyi, M. Kryshchuk, I. Gryshko, A. Shulha

**Abstract.** The simulation of impact interaction of the contaminant particle with the solid surface of the filter element, which is placed in the cavitation medium by ultrasonic filtration of contaminated liquids, is carried out in the work. An expression of the law of energy conservation is presented, which takes into account the dominant factors acting in the process of interaction of the pollutant with the surface of the filter element. The constituent sources of energy sources that act on the pollutant in contact with the stationary surface of the filter are justified and described. The results of the comparative analysis of mathematical modeling data in ANSYS® Academic Research Mechanical, Release 2019R3 shock interaction of dirt particles with a diameter of 10  $\mu\text{m}$  and 100  $\mu\text{m}$  with two types of filter elements made of AISI321 steel and TEFLON 7 are presented.

**Keywords:** filtering; ultrasonic cavitation processing; ultrasonic field; ultrasonic cavitation, shock, simulation, deformation, stress

### References

1. Beljanin, P.N. and Chernenko, Zh.S. (1964), *Aviacionnye fil'try i ochistiteli gidravlicheskih system* [Aviation filters and purifiers of hydraulic systems], Mashinostroenie, Moscow, Russia.
2. Abramov, E.I., Kolesnichenko, K.A., Maslov, V.T. (1977), *Jelementy gidroprivoda* [Elements of the hydraulic drive], Tehnika, Kyiv, Ukraine.
3. *Filtr shchelevoi nozhevoi* [Filter slotted knife], Japan, Pat. 61129012, pub. 17.06.86.
4. Kasian, M.I., Kuzmin, V.I. (1976), Shchelevoi filtr [Slot filter], USSR, Pat.504542.
5. Finkel'shtejn, Z.L. (1986), *Primenenie i ochistka rabochih zhidkостей dlja gornyh mashin* [Use and cleaning of hydraulic fluids for mining machines], Nedra, Moscow, Ukraine.
6. Novickij, B.G. (1983), *Primenenie akusticheskikh kolebanij v Himiko-tehnologicheskikh processah* (Processes and devices of chemical and petroleum technology), Himija, Moscow, Russia.
7. Agranat, B.A., Bashkirov, V.I., Kitajgorodskij, Ju.I. and Havskij, N.N. (1974), *Ul'trazvukovaja tehnologija* [Ultrasonic technology], Metallurgija, Moscow, Russia.
8. Lugovs'kij, O.F. and Chornij, V.I. (1999), *Journal of Mechanical Engineering the National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute"*, no. 35, pp. 111–119.
9. Chornij, V.I., Lugovs'kij, O.F. and Movchanjuk A.V. (2003), *Sposib obrobki i ochistki ridini ta pristrrij dlja jogo vikoristannja* [Method of processing and cleaning fluid and a device for its use], Ukraine, Pat. 55323.
10. Lugovskyi, A.F. and Chuhraev, N.V. (2007), *Ul'trazvukovaja kavitacija v sovremennyh tehnologijah* [Ultrasonic cavitation in modern technologies], Vidavnično-poligrafichnij centr "Kiivs'kij universitet", Kyiv, Ukraine.
11. Landau, L.D. and Lifshic, E.M. (1986), *Teoryia upruhosty*, Nauka, Moscow, Russia.
12. Hlushak, B.L., Kuropatenko, V.F. and Novykov, S.A. (1992), *Yssledovanye prochnosty materyalov pry dynamycheskykh nahruzakakh* [The study of the strength of materials under dynamic loads] "Nauka", Novosibirsk, Russia.
13. Morozov, N. and Petrov, Yu.V. (1997), *Problem dynamyky razrushenya tverdikh tel* [Problems of the dynamics of the destruction of solids], St. Petersburg University, St. Petersburg, Russia.
14. Kylchevskiy, N.A. (1969), *Teoryia soudarenyy tverdikh tel* [Theory of collisions of solids], Naukova Dumka, Kyiv, Ukraine.
15. ANSYS® Academic Research Mechanical, Release 2019R3. Available: <https://www.ansys.com/en-in/academic/free-student-products>. Last accessed 11 May 2020.
16. Johnson, G.R. and Cook, W.H. (1985), Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures, *Engineering Fracture Mechanics*.
17. Hunt, E.M., Malcolm, S. and Pantoya, M.L., (2009), Impact ignition of nano and micron composite energetic materials, *International Journal of Impact Engineering*.
18. Luhovskyi, O.F., Zilinskyi, A.I. and Hryshko, I.A. (2015), "Math model of filtration in an ultrasonic field of increased intensity", *Journal of Mechanical Engineering NTUU "Kyiv Polytechnic Institute"*, vol. 74, pp. 11–17. DOI: <https://doi.org/10.20535/2305-9001.2015.74.50413>