

Міністерство освіти і науки України  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Зілінський Андрій Іванович**



УДК 621.647.23

**Ультразвуковий кавітаційний фільтр з ефектом самоочищення для рідких  
середовищ**

Спеціальність 05.02.02 - Машинознавство

**АВТОРЕФЕРАТ**

дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Київ – 2021

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі прикладної гідроаеромеханіки і механотроніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» Міністерства освіти і науки України, м. Київ.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор

**Луговський Олександр Федорович,**

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», завідувач кафедри прикладної гідроаеромеханіки і механотроніки.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор

**Назаренко Іван Іванович,**

Київський національний університет будівництва і архітектури, м.Київ, завідувач кафедри машин та обладнання технологічних процесів ФАІТ;

кандидат технічних наук, доцент

**Тарасенко Тарас Валерійович,**

Національний авіаційний університет, м.Київ, доцент кафедри гідрогазових систем.

Захист відбудеться “20” квітня 2021 р. о 15-00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.002.11 у Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», за адресою: 03056, м. Київ, проспект Перемоги 37, корп. 1, ауд. № 214.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», за адресою: 03056, м. Київ, проспект Перемоги, 37.

Автореферат розісланий “16” березня 2021 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради Д 26.002.11  
канд. техн. наук, доцент



Ганпанцурова О.С.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Інтенсивний розвиток технологій із використанням рідин потребує постійного підвищення ефективності технологічного обладнання, яке забезпечує їх очищення від механічних та бактеріальних забруднень. На сьогоднішній день розроблено значну кількість способів та обладнання для очищення технологічних рідин, які відрізняються ефективністю та якістю очищення. Пристрої, що забезпечують фільтрування рідини, повинні відповідати певним вимогам, серед яких: ступінь фільтрації від механічного та бактеріального забруднення; продуктивність; можливість відновлення фільтруючої здатності; стійкість фільтроелементу до фізичного або хімічного руйнування; термін або ресурс працездатності.

Найпоширенішим методом фільтрування є очищення рідин за допомогою пористої перегородки. Однак такий тип фільтрів не відповідає всім, наведеним вище, вимогам. Під час використання пористих перегородок створюється значний перепад тиску, що призводить до зниження витрати. З часом у каналах пористої перегородки відбувається накопичення забруднювача, що призводить до вторинного забруднення рідини. Тому фільтри з пористою перегородкою потребують періодичної заміни. Проте існують фільтри, що для очищення використовують ультразвукові коливання, інтенсивність яких перевищує поріг виникнення кавітації. Фільтрування в умовах ультразвукового поля дозволяє збільшити час безперебійної роботи фільтрувального обладнання за рахунок використання ефектів, що супроводжують явище ультразвукової кавітації.

Однак відсутність методики розрахунку ультразвукових кавітаційних фільтрів та залежностей, які дозволять визначати їх раціональні експлуатаційні та конструктивні параметри та обирати матеріал, унеможлиблюють створення ефективних в експлуатації конструкцій на основі процесу ультразвукового впливу на рідину.

Таким чином, актуальною науково-технічною задачею є розроблення науково обґрунтованих технічних рішень кавітаційних фільтрів з ефектом самоочищення, які забезпечують необхідний ступінь фільтрування, високу продуктивність та регенерацію фільтрувальної перегородки, що дає можливість підвищити ефективність технологічних процесів з використанням рідини.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Окремі розділи дисертації є результатом виконання науково-дослідних робіт (НДР) у Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» на кафедрі прикладної гідроаеромеханіки і механотроніки. Зокрема д/б НДР № 0117U007179 «Система для ультразвукового кавітаційного очищення води» (№2047-р), № 0117U004337 «Створення високоефективних виконавчих пристроїв до адаптивних систем автоматизації з відкритою архітектурою» (№2038-п), № 2822 «Розробка гідравлічних мехатронних систем машинобудування з високим показником ефективності і надійності».

**Мета і задачі дослідження.** Метою дисертаційної роботи є збільшення ресурсу роботи фільтрувальної техніки, шляхом створення ультразвукового кавітаційного середовища в зоні фільтрувальної перегородки.

Для досягнення означеної мети в роботі заплановано вирішити наступні задачі:

- здійснити аналіз основних способів очищення рідин методом фільтрування;
- розробити математичну модель процесу взаємодії засміченої рідини з фільтроелементом в умовах ультразвукової кавітації;
- запропонувати та впровадити технічне рішення ультразвукового кавітаційного фільтра з ефектом самоочищення та розробити методику розрахунку ультразвукового кавітаційного фільтра з ефектом самоочищення;
- експериментально підібрати кавітаційно стійкі конструкційні матеріали для виготовлення елементів фільтра, здатного тривалий час працювати в умовах кавітаційного середовища;
- розробити рекомендації стосовно режимів збудження акустичної системи фільтра та раціонального розміщення фільтрувального елемента в кавітаційній камері.

**Об'єкт дослідження.** Процеси, що відбуваються під час фільтрування в умовах ультразвукового кавітаційного середовища.

**Предмет дослідження.** Параметри, режими та конструкції ультразвукового кавітаційного обладнання, яке призначене для фільтрування рідини.

**Методи дослідження.** Комплексний метод, що полягає в використанні математичного, фізичного та комп'ютерного моделювання процесів, що відбуваються в ультразвуковій кавітаційній камері та їх вплив на процес фільтрування з подальшим експериментальним підтвердженням адекватності. Експериментальні дослідження виконувалися в лабораторних і виробничих умовах із застосуванням розробленого ультразвукового устаткування, оптичних і електронних вимірювальних пристроїв. Використовувались основні положення теорії похибок та планування експерименту. Для обробки даних використовувались методи обробки експериментальних даних та математичної статистики.

#### **Наукова новизна отриманих результатів:**

У дисертації вперше одержані такі наукові результати:

- уточнена та доповнена фізична модель процесу фільтрування рідини в кавітаційному середовищі, яке утворене ультразвуковою хвилею пружної деформації. В моделі враховані ударні сферичні хвилі, кумулятивні мікрострумені, мікротечії тощо, притаманні явищу ультразвукової кавітації за наявності в рідині механічних забруднень;
- встановлені закономірності взаємодії частинки забруднювача з поверхнею фільтроелементу, що знаходиться в кавітаційному середовищі, для різних конструкційних матеріалів;
- отримані експериментальні залежності стійкості різних конструкційних матеріалів в умовах ультразвукового кавітаційного впливу.

#### **Практичне значення отриманих результатів:**

- розроблено, виготовлено та впроваджено конструкції фільтрів з ефектом самоочищення в ультразвуковому кавітаційному середовищі;
- отримано патент України на винахід «Ультразвукове кавітаційне обладнання» № 108589, опубл. 12.05.2015, Бюл. №9;
- визначено раціональні параметри розташування фільтрувальної перегородки відносно ультразвукової хвилі в кавітаційній камері;

- розроблена методика розрахунку резонансних елементів конструкції корпусу фільтра та приводів-випромінювачів, застосування якої передбачає врахування умов їх експлуатації, параметри конструкційних матеріалів та п'єзоелектричні перетворювачі, що застосовуються;

- надані рекомендації раціонального вибору конструкційних матеріалів для корпусних деталей та фільтрувального елемента кавітаційного фільтру.

**Особистий внесок здобувача.** В дисертаційній роботі наведені результати досліджень, виконані автором особисто. На основі аналізу наукових публікацій з теми дисертації та нормативної документації здобувачем виявлені завдання, які необхідно виконати для створення ультразвукового кавітаційного обладнання. Постановка задачі досліджень, розробка методології та підходів до її вирішення здійснювались спільно з науковим керівником.

За участі співавторів проведені експериментальні дослідження визначення впливу статичного тиску на інтенсивність ультразвукової кавітації, при цьому автором проведено обробку експериментальних даних та аналіз руйнування дослідних зразків з використанням програмного забезпечення Mathcad.

За участі співавторів запропоновано методику розрахунку геометричних розмірів акустичної резонансної системи модульної секції трубчастого ультразвукового кавітатора та складених п'єзоелектричними приводів-випромінювачів для її збудження, автором запропоновано методику розрахунку циліндричних кавітаційних камер.

Автором розраховано швидкість частинки забруднювача, який знаходиться поблизу кавітаційного пухирця, що колапсує. Використовуючи результати попередніх досліджень швидкості руйнування кавітаційної бульбашки поблизу частинки забруднювача, автор провів моделювання удару частинки по фільтрувальній перегородці..

Автору належить розробка конструкції установки для ультразвукового кавітаційного очищення рідин та спосіб очищення рідини оснований на цій конструкції.

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати роботи доповідалися і обговорювалися на таких науково-технічних конференціях: міжнародна науково-технічна конференція «Гідроаеромеханіка в інженерній практиці» (Київ, 2014-2020), XV міжнародна науково-технічна конференція «Промислова гідравліка і пневматика» (Мелітополь, 2014), міжнародна науково-технічна конференція «Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта» (Київ, 2014-2020), міжнародна науково-технічна конференція «NAPĘDY I STEROWANIA HYDRAULICZNE I PNEUMATYCZNE 2018» (Kliczkowie, 2018).

Дисертаційна робота в повному обсязі доповідалась: на розширеному засіданні кафедри прикладної гідроаеромеханіки та механотроніки КПІ ім. Ігоря Сікорського.

**Публікації.** Основні положення дисертації, які в достатній мірі висвітлюють результати роботи, що виносяться на захист, опубліковано у 14 наукових працях, у тому числі 6 статтях у наукових фахових виданнях (з них 1 стаття у періодичних закордонних виданнях, що входять до WoS), 2 патенти України, 6 тез доповідей в збірниках матеріалів конференцій.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, додатків та списку використаних джерел із 148 найменувань на 14 сторінках. Загальний обсяг роботи становить 154 сторінок (із них основного тексту –

117), містить 63 рисунків і 10 таблиць. Документи про впровадження наведені у додатку на 6 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі викладено загальну характеристику роботи, обґрунтовано актуальність теми дисертації, визначено мету та задачі дослідження, наведено наукову новизну та практичне значення отриманих результатів.

У першому розділі наведено аналіз основних способів очищення рідин. Найбільш застосовуваним методом очищення рідини в даний час є її фільтрування. Основним недоліком фільтрування є постійне зниження продуктивності фільтрів через засмічення фільтрувальних перегородок. Наведено модель руху частинки забруднювача через фільтрувальну перегородку. Розглянуто способи регенерації фільтрувальних перегородок. Особливу увагу приділено ультразвуковому способу очищення фільтрувальних перегородок, оскільки при ультразвуковому очищенні фільтрувальних перегородок одночасно збільшується ступінь очищення рідини внаслідок ефекту «п'яркої» частинки та знижується гідравлічний опір фільтрувальної перегородки. Розглянуто способи введення в зону фільтрування ультразвукових коливань. Особливо відзначено можливість збільшення інтенсивності пружних коливань за рахунок фокусуючих властивостей стінок циліндричної кавітаційної камери за умови її збудження на радіальній або радіально-згинальній модах резонансних коливань. Визначено перелік основних питань, вирішення яких дозволить створити ультразвуковий кавітаційний фільтр з ефектом самоочищення для рідких середовищ.

У другому розділі представлено математичну модель процесу руху частинки забруднювача в умовах ультразвукової кавітації. Для випадку утворення кавітаційної бульбашки у в'язкій стисливій рідині при введенні в неї ультразвукової хвилі швидкість руху стінки бульбашки можна описати рівнянням Херрінга-Флінна (1). Рівняння Херрінга-Флінна обрано внаслідок врахування в ньому стисливості та в'язкості рідини.

$$\begin{aligned}
 & R \left( 1 - \frac{2U}{c_p} \right) \frac{d^2 R}{dt^2} + \frac{3}{2} \left( 1 - \frac{4U}{3c_p} \right) \left( \frac{dR}{dt} \right)^2 \\
 & + \frac{1}{\rho} \left[ p_0 - p_n - p_a \sin \omega t + \frac{2\sigma}{R} + \frac{4\mu U}{R} \right. \\
 & \left. + \left( p_0 + \frac{2\sigma}{R_0} \right) \left( \frac{R_0}{R} \right)^{3\gamma} \right] + \frac{RU}{\rho c_p} \left( 1 - \frac{U}{c_p} \right) \frac{dp(R)}{dR} = 0,
 \end{aligned} \tag{1}$$

де  $p_0$  - гідростатичний тиск;  $p_a$  - звуковий тиск, що створюється звуковим полем;  $p_n$  - тиск насиченої пари;  $\mu$  - коефіцієнт в'язкості рідини;  $\sigma$  - коефіцієнт поверхневого натягу;  $R_0$  - початковий радіус бульбашки;  $R$  - радіус бульбашки;  $U = \frac{dR}{dt}$  - швидкість схлопування бульбашки;  $c_p$  - швидкість звуку в незбуреній рідині;  $\omega = 2\pi f$  - кругова частота коливань;  $\gamma$  - показник політропи.

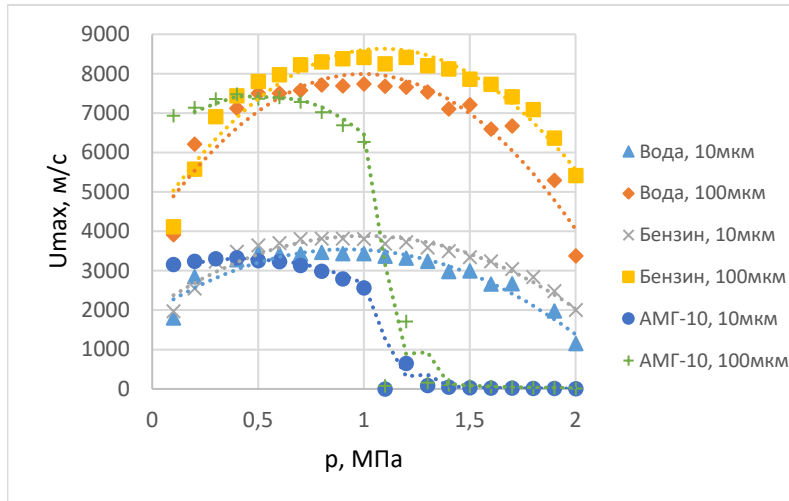


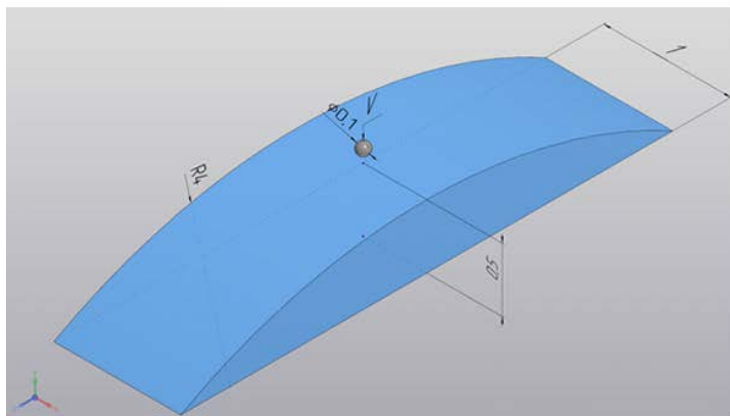
Рис. 1. Залежність швидкості руху частинок забруднювача різної маси і розмірів, що знаходяться біля стінки пульсуючої кавітаційної бульбашки від статичного тиску

На основі даних, отриманих з (1), було розраховано швидкість руху частинки забруднювача, що знаходиться біля стінки пульсуючої кавітаційної бульбашки. Результати представлені у вигляді графіків на рис. 1. Отримані результати свідчать про можливість досягнення частинками забруднювача надзвукової швидкості переміщення в рідині.

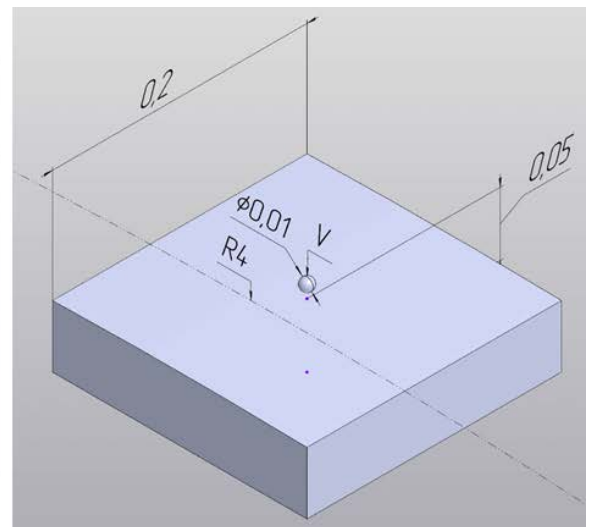
Аналіз отриманих розрахункових значень величини переміщення частинки забруднювача в кавітаційній області ультразвукового поля значно перевищує розміри пір фільтрувальної перегородки, які в фільтрах тонкого очищення складають 1 ... 10 мкм.

Коливальні рухи цих частинок не дозволяють їм проникнути через пори фільтрувальної перегородки. Цей ефект іноді називають ефектом «п'яної» частинки. Зіштовхуючись між собою, частинки, що коливаються, коагулюють і осідають в шламовірнику фільтра.

У даному розділі проведено моделювання ударної взаємодії частинки бруду з фільтрувальною перегородкою при ультразвуковому кавітаційному фільтруванні. Моделювання проведено з використанням проєкційно-сіткових методів скінченних елементів та скінченних різниць, які реалізовані в програмному забезпеченні ANSYS® Academic Research Mechanical, Release 2019R3.



а)



б)

Рис. 2. Початкова структура для імітаційного дослідження ударної взаємодії частинки забруднювача з поверхнею фільтрувальної перегородки (а - для частинки забруднювача діаметром 100 мкм; б - для частинки забруднювача діаметром 10 мкм.)

У якості матеріалу для виготовлення фільтрувальної перегородки обрано зразки зі сталі 12X18H10T та фторопласту Ф4 з ізотропними фізико-механічними характеристиками, які отримані за даними, взятими з літератури. 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 твердих частинок забруднювача вибрана як мінімальна швидкість, величини якої отримані в попередньому моделюванні. Для розглянутих в дослідженні чотирьох розрахункових схем з різними типами матеріалів фільтрувальної перегородки швидкість двох видів частинок іржі дорівнювала 2000 м/с.

Дискретизація об'ємів контактуючих тіл для проведення обчислень деформацій та напружень фільтрувальної перегородки 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).

Аналіз отриманих результатів (рис. 3) моделювання показує, що напруження, які виникають під час зіткнення частинки невеликих розмірів при надзвукових швидкостях з нерухоною поверхнею, перевищують межі міцності досліджуваних конструкційних матеріалів. Зіткнення таких частинок з фільтрувальною перегородкою викликає ерозійне руйнування фільтрувального матеріалу, що потребує ретельного добору конструкційних матеріалів для виготовлення фільтрів, які працюють в ультразвуковому кавітаційному середовищі. В результаті моделювання з'ясовано, що сталь 12X18H10T у два рази менше піддається впливу кавітаційної ерозії, ніж фторопласт Ф4.

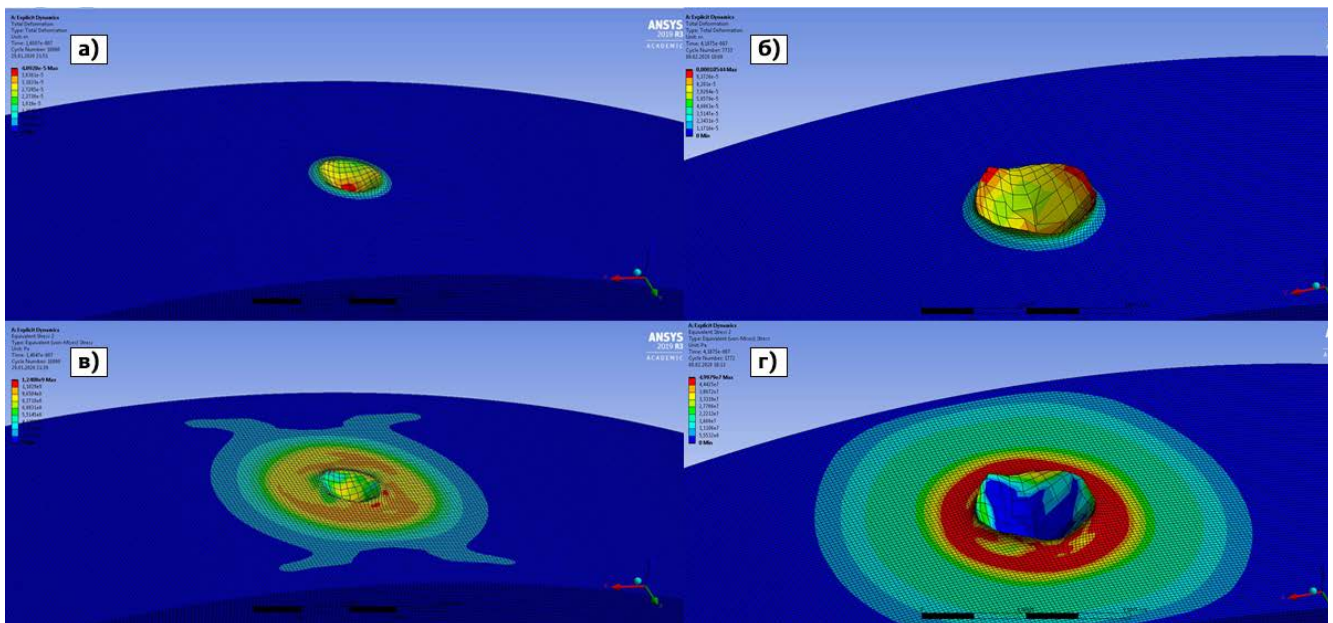


Рис. 3. Результати моделювання для частинки забруднювача 100 мкм (а – повна деформація для сталі 12X18H10T; б – повна деформація для фторопласту Ф4; в – еквівалентне за Мізесом напруження, що виникає в зоні контакту для сталі 12X18H10T; г – еквівалентне за Мізесом напруження, що виникає в зоні контакту для фторопласту Ф4)



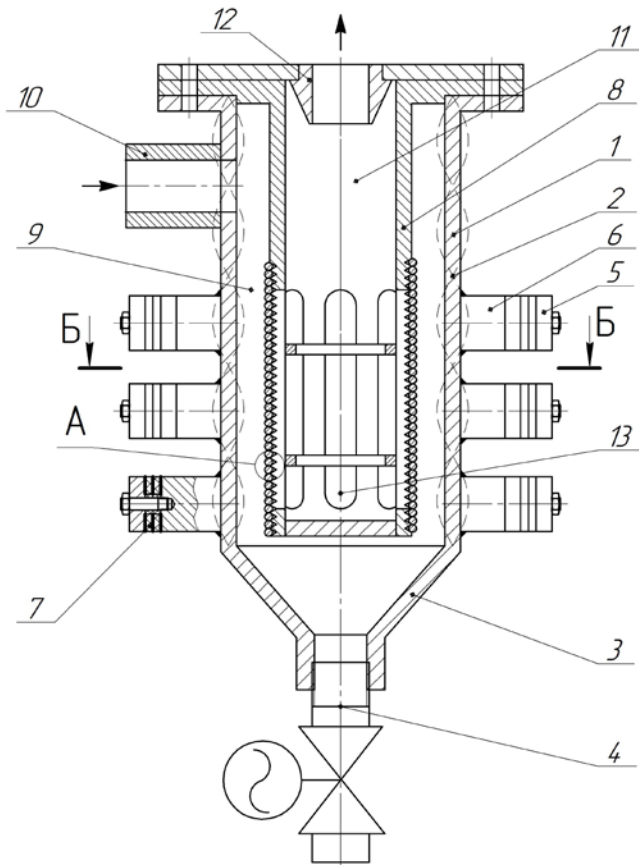


Рис. 4. Схема УЗФ з резонансним корпусом

дібними трансформаторами коливальної швидкості 6 (рис. 4) та п'єзокерамічними кільцями 7, що електрично підключені до генератора електричних коливань системи автоматичного керування (на схемі умовно не показана) таким чином, що в трубі збуджуються резонансні радіальні або радіально-згинальні та поздовжньо-згинальні коливання, а місце розміщення ультразвукових перетворювачів 5 у межах секцій та відстань між секціями уздовж труби регламентовані параметрами резонансних коливань труби 1, тобто вони розміщені в пучностях поздовжньо-згинальної хвилі деформації 2, що встановлюється по довжині труби 1. Резонансні коливання кавітаційної камери призводять до збудження в рідині ультразвукової кавітації.

У розділі наведено розрахунок циліндричної камери, збудженої на радіально-згинальній моді коливань. Поздовжній розмір циліндричної кавітаційної камери повинен вміщувати парну кількість чвертей довжини хвилі деформації, що встановлюється по довжині камери. Причому на торцях циліндричної камери, де будуть розміщені торцеві кришки, повинні бути вузли хвилі деформації, що встановилася.

Розв'язок рівнянь графічним методом дозволяє отримати відстань між ультразвуковими приводами-випромінювачами на зовнішній поверхні циліндричної кавітаційної камери вздовж осі:

У третьому розділі виконані аналітичні дослідження у відповідності до запропонованого технічного рішення ультразвукового кавітаційного фільтра з ефектом самоочищення. Запропонована конструкція складається з резонансної трубчастої кавітаційної камери, виконаної у вигляді суцільної труби 1 (рис. 4), акустично розв'язаної з місцями кріплення та під'єднання. Акустичне розв'язування реалізовано за рахунок кріплення суцільної труби 1 у вузлових точках поздовжньо-згинальної хвилі деформації 2, що встановлюється по довжині труби. В нижній частині труба 1 з'єднана з конусоподібним шламозбірником 3, що має патрубок 4 для відведення шламу. На зовнішній твірній поверхні труби 1 уздовж твірних ліній по секційно встановлені складені ультразвукові перетворювачі 5 з ножепо-

$$l_x = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{\omega^2}{c_T^2} - \alpha^2}}. \quad (2)$$

У випадку виконання циліндричної камери у вигляді окремих секцій, розмір секції обирається значно меншим ніж  $1/4$  довжини хвилі.

Для випадку радіально - згинальних коливань циліндричної поверхні кавітаційної камери резонансна частота визначається залежністю:

$$f_{рез} = \frac{1}{2r^2\pi} c_T \frac{h_k}{\sqrt{12}} K_\lambda, \quad (3)$$

де  $h_k$  - товщина стінки камери;  $K_\lambda = \sqrt{\frac{i^2(1-i^2)^2}{1+i^2}}$ ;  $i$  - число хвиль, розміщених по окружності кільця.

Для збудження резонансних коливань циліндричної кавітаційної камери можуть бути застосовані п'єзoeлектричні приводи - випромінювачі поздовжніх переміщень, побудовані у відповідності до 1,  $1/2$  або  $3/4$  хвильових акустичних схем. Доцільно застосовувати в даному випадку ультразвукові приводи-випромінювачі з напівхвильовою акустичною схемою, які забезпечують суттєве зменшення масо-габаритних характеристик фільтра з ефектом самоочищення. Напівхвильовий складений п'єзoeлектричний привід-випромінювач згідно розрахункової схеми (рис. 5) буде за принципом ультразвукового перетворювача Ланжевена, в якому одна з накладок, що знижують частоту (демпфуючі накладки), виконана у вигляді трансформатора коливальної швидкості, застосування якого дозволяє отримати необхідну величину амплітуди коливань вихідного торця випромінювача. Зазвичай у якості трансформатора коливальної швидкості застосовують ступінчасті, конічні, експоненціальні, катеноїдальні та інші акустичні концентратори, які за рахунок різниці площ вхідного та вихідного торців забезпечують збільшення амплітуди поздовжніх коливань.

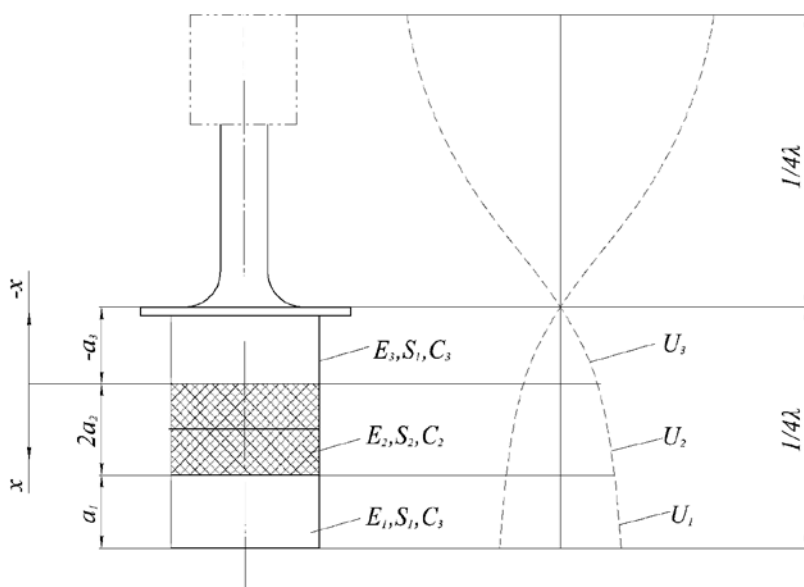


Рис. 5. Розрахункова схема напівхвильового привода-випромінювача

У загальному вигляді рівняння поздовжніх коливань складеного ультразвукового привода-випромінювача можна записати як:

$$S \frac{\partial^2 \xi}{dt^2} = c^2 \frac{\partial}{\partial x} \left( S \frac{\partial \xi}{\partial x} \right), \quad (4)$$

де  $\xi$  - поздовжнє переміщення;  $c$  - швидкість звуку;  $S$  - площа поперечного перерізу;  $x$  - напрямок розповсюдження хвиль.

Для акустичної системи, що розглядається, в разі збудження гармонійних коливань рішення загального рівняння (4) можна записати як:

$$\begin{aligned}\xi_1(x,t) &= \left( A \cos \frac{\omega}{c_1} x + B \sin \frac{\omega}{c_1} x \right) \sin(\omega t + \varphi); \\ \xi_2(x,t) &= \left( C \cos \frac{\omega}{c_2} x + D \sin \frac{\omega}{c_2} x \right) \sin(\omega t + \varphi); \\ \xi_3(x,t) &= \left( Q \cos \frac{\omega}{c_3} x + G \sin \frac{\omega}{c_3} x \right) \sin(\omega t + \varphi),\end{aligned}\tag{5}$$

де  $A, B, C, D, Q, G$  – константи.

Згідно розрахункової схеми граничні умови можна записати у вигляді:

$$\begin{aligned}\xi_3 &= 0 \text{ при } x = -a_3; \\ \left. \begin{aligned}\xi_2 &= \xi_3 \\ E_2 S_2 \frac{\partial \xi_2}{\partial x} &= E_3 S_1 \frac{\partial \xi_3}{\partial x}\end{aligned} \right\} \text{ при } x = 0; \\ \left. \begin{aligned}\xi_2 &= \xi_1 \\ E_2 S_2 \frac{\partial \xi_2}{\partial x} &= E_1 S_1 \frac{\partial \xi_1}{\partial x}\end{aligned} \right\} \text{ при } x = 2a_2; \\ \frac{\partial \xi_1}{\partial x} &= 0 \text{ при } x = a_1 + 2a_2.\end{aligned}\tag{6}$$

Виконавши розв'язок рівнянь (5), з урахуванням граничних умов (6) можна отримати аналітичні залежності для розрахунку подібних кавітаторів:

$$a_3 = \frac{c_3}{\omega} \operatorname{arctg} \frac{E_3 S_1 c_2 \left( N \cos \frac{\omega}{c_2} 2a_2 - \sin \frac{\omega}{c_2} 2a_2 \right)}{E_2 S_2 c_3 \left( N \sin \frac{\omega}{c_2} 2a_2 + \cos \frac{\omega}{c_2} 2a_2 \right)},\tag{7}$$

де 
$$N = \frac{E_2 S_2 c_1 \left[ \cos \frac{\omega}{c_1} 2a_2 + \operatorname{tg} \frac{\omega}{c_1} (a_1 + 2a_2) \sin \frac{\omega}{c_1} 2a_2 \right]}{E_1 S_1 c_2 \left[ \operatorname{tg} \frac{\omega}{c_1} (a_1 + 2a_2) \cos \frac{\omega}{c_1} 2a_2 - \sin \frac{\omega}{c_1} 2a_2 \right]}.$$

Для розрахунку поздовжнього розміру  $a_3$  акустичної розрахункової схеми (рис. 5) за допомогою формули (7) необхідно задати бажані величини товщини накладки, що понижує частоту, та маркою конструкційного матеріалу, з якого вона буде виготовлена, а також обрати марку п'єзокераміки з її параметрами.

Поздовжній розмір  $a_4$  (рис. 5), ступеню малої площі трансформатора коливальної швидкості можна отримати із залежності

$$a_4 = \frac{c_3}{4f}. \quad (8)$$

Розмір, розрахований згідно формули (8), необхідно скорегувати (зменшити) в залежності від приєднаної маси на робочому торці трансформатора коливальної швидкості. Приєднана маса залежить від моди збуджуваних коливань та способу кріплення акустичної резонансної системи.

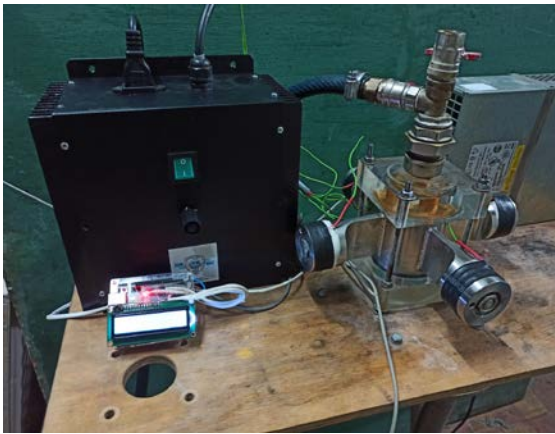


Рис. 6. Зовнішній вигляд станду для проведення експериментальних досліджень кавітаційної ерозії конструкційних матеріалів

У четвертому розділі проведено експериментальне дослідження роботи ультразвукового кавітаційного фільтра з ефектом самоочищення, а саме: досліджено вплив параметрів процесу ультразвукової кавітації на відносну втрату об'єму конструкційних матеріалів. Для експериментального дослідження було спроектовано та виготовлено спеціальний стенд (рис. 6), кавітаційну камеру якого було виготовлено за методикою, представленою в попередньому розділі. В центрі камери розташовано циліндричний випробуваний зразок, виконаний у вигляді стрижня діаметром 8мм.

В експериментальній установці інтенсивність ультразвуку можна було регулювати в межах 2...100 Вт/см<sup>2</sup> напругою живлення ультразвукових перетворювачів.

Для підвищення достовірності результатів за рахунок стабілізації режиму кавітації в камері була створена замкнута система циркуляції робочої рідини, що забезпечило підтримку постійної кількості зародків кавітації (рис. 7). Щоб дослідити вплив ультразвукової кавітації на конструкційні матеріали було обрано декілька різних матеріалів і сплавів, що використовуються у машинобудуванні. Під час проведення випробувань було обрано такі умови: рідина – вода (H<sub>2</sub>O); температура робочої рідини 293 К; тиск у випробувальній камері становив – 0,2 МПа; час випробування – 0-240 хв; витрата рідини через випробувальну камеру 2 л/хв. У якості параметру оцінки ерозійної стійкості матеріалу, що досліджувався, було обрано кількість винесеного матеріалу в період розвиненої кавітації.

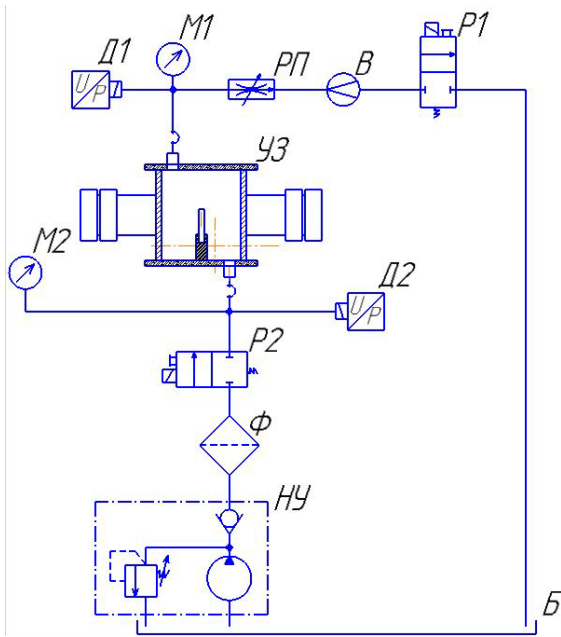


Рис. 7. Принципова електрогідролічна схема експериментального стенду

(УЗ – ультразвукова камера, М1, М2 – манометри, Д1, Д2 – датчики, РП – розподільник потоку, В – витратомір, Р1, Р2 – розподільники, Ф – фільтр, НУ – насосна установка, Б – бак)

передбачає встановлення взаємозв'язку між параметрами процесу ( $W$  – потужність,  $t$  – час,  $E$  – модуль Юнга). Моделювання методом МГВА проводилося за допомогою програмного забезпечення GDMH Shell DS 3.8.9.

У результаті обробки експериментальних даних при досягненні мінімального значення похибки апроксимації на п'ятому ряду селекції була отримана модель процесу ультразвукової кавітаційної ерозії у вигляді:

$$\begin{aligned}
 y &= -0.00665342 + 1.43019 * n_{47} + 6.46994 * n_{47} * n_{15} \\
 &\quad - 6.66151 * n_{47}^2 - 0.345979 * n_{15} \\
 n_{15} &= 0.169846 - 0.00166224 * W + 0.00419129 * W * n_{47} \\
 &\quad + 3.50203e^{-6} * W^2 \\
 n_{47} &= 0.0241886 + 15.5951 * n_{92} - 2986.3 * n_{92} * n_{96} \\
 &\quad + 1524.51 * n_{92}^2 - 15.4387 * n_{96} + 1461.9 * n_{96}^2 \\
 n_{96} &= -0.00206682 - 0.743211 * \sqrt[3]{E} * n_{117} + 4.60507 * n_{117} \\
 n_{92} &= -0.00406738 + 6.27789 * n_{116} * n_{117} \\
 n_{116} &= 0.345412 - 0.00154868 * E \\
 n_{117} &= -0.0460626 + 0.00894853 * \sqrt[3]{t^2}.
 \end{aligned} \tag{9}$$

Усі експериментальні зразки конструкційних матеріалів, які виготовлені у вигляді стрижнів, встановлювалися у центрі циліндричної ультразвукової камери, де спостерігається максимальна інтенсивність кавітації. Перед кожним випробуванням дослідні зразки ретельно промивалися спиртом та висушувалися в сушильній шафі протягом 30 хв за температури 373 К. Зважування зразків проводилося до і після випробування за допомогою високоточних аналітичних ваг серії AXIS AD50. Ваги 4 класу точності дозволяють визначити вагу випробувального зразка з точністю до 0,001г. Зважування проводилось 5 разів для підвищення точності.

Результати попередніх досліджень показали, що подальше вивчення зміни об'єму матеріалів при кавітаційних процесах може здійснюватися одним з методів моделювання. Моделювання було виконано двома методами: методом групового врахування аргументів (МГВА з активними нейронами) та методом Бокса-Вілсона. Побудова математичної моделі впливу параметрів ультразвукової кавітації на втрату об'єму  $\Delta V$  конструкційних матеріалів

Після перевірки адекватності дана модель була прийнята для подальшого аналізу впливу параметрів процесу на відносну втрату об'єму матеріалу ( $\Delta V$ ) при ультразвуковій кавітації. Коефіцієнт кореляції склав  $R=0,997$ , що свідчить про високу точність одержаних результатів. Аналіз впливу факторів (рис. 8) показав, що модуль Юнга матеріалу має суттєво більший вплив на відносну втрату об'єму конструкційних матеріалів ніж тривалість кавітаційного впливу

№	Если заместить средним значением	Влияние на СКО	Графически	СКО
1	X3	6,92E05%		1319,04
2	X3, cubert	4,402E05%		838,972
3	X2, cubert	58,49%		0,122424
4	X1	31,56%		0,0711011
	[Ничего не замещено]	0%		0,010939
	[Замещено всё]	100%		0,201543

Рис. 8. Вплив факторів моделі на відносну втрату об'єму матеріалу ( $\Delta V$ ) (X1 – Потужність, X2 – час обробки, X3 – модуль Юнга)

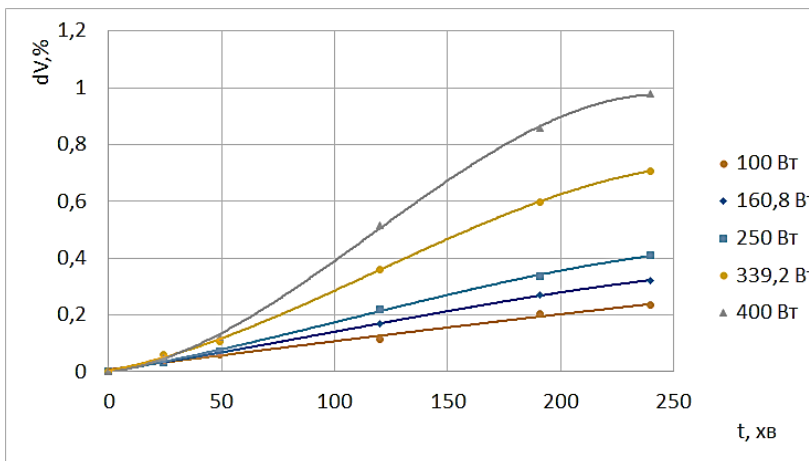


Рис. 9. Залежність втрати маси зразка з чавуну СЧ20 від часу обробки при різних потужностях

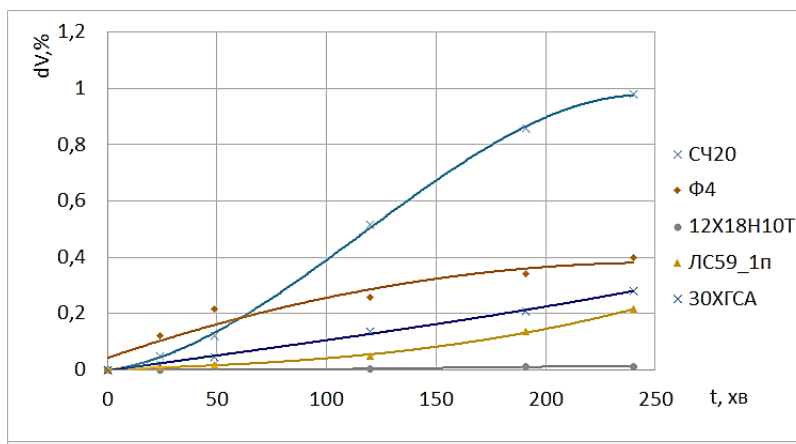


Рис. 10. Залежність втрати маси досліджуваного зразка від часу обробки при споживаній потужності ультразвукового кавітатора 400 Вт

У результаті обробки результатів було побудовано ряд графічних залежностей, які демонструють картину стійкості конструкційних матеріалів в умовах ультразвукової кавітації при різних потужностях (рис. 9 і рис. 10).

Отримані результати дозволяють оцінити кавітаційну стійкість конструкційних матеріалів і забезпечити обґрунтований вибір матеріалів для застосування в ультразвуковому технологічному обладнанні. В результаті найбільш доцільним матеріалом для використання в ультразвукових кавітаційних фільтрах є сталь 12Х18Н10Т. Фторопласт Ф4, який спочатку планувалося використовувати, показав найгірший результат, що знизило доцільність його використання.

Було проведено дослідження впливу статичного тиску на інтенсивність ультразвукової кавітації. Для уточнення даних щодо впливу підвищеного і пониженого тиску на процес протікання ультразвукової кавітації була розроблена експериментальна установка, схема якої представлена на рис. 11.

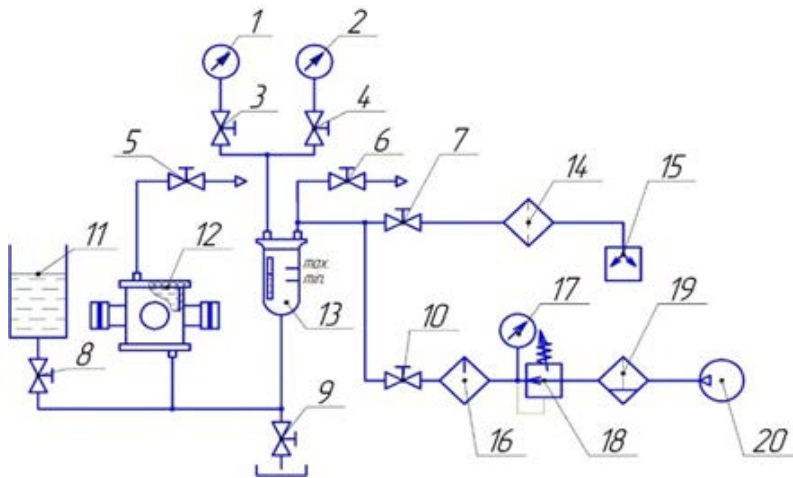


Рис. 11. Схема експериментального стенду для дослідження впливу статичного тиску на особливості ультразвукової кавітації (1-манометр, 2-вакуумметр; 3-10-крани, 11-резервуар для робочої рідини, 12-ультразвуковий трубчастий вібратор, 13 - ємність контролю рівня заповнення; 14-фільтр, 15-вакуумний насос, 16-19-блок підготовки стисненого повітря, 20-компресор)

Установка дозволяє проводити дослідження як при підвищенні робочого тиску за допомогою компресора 20, так і при зниженні його нижче атмосферного завдяки вакуумному насосу 15. Всі елементи з'єднані між собою мідними трубками, що запобігає їх деформації при зміні статичного тиску. Додаткова ємність 13 розташована на одному рівні з резервуаром 11 й одночасно знаходиться вище ультразвукового трубчастого вібратора 12. Це дозволяє повністю заповнити робочу камеру рідиною і запобігти потраплянню бульбашок повітря всередину. При такому

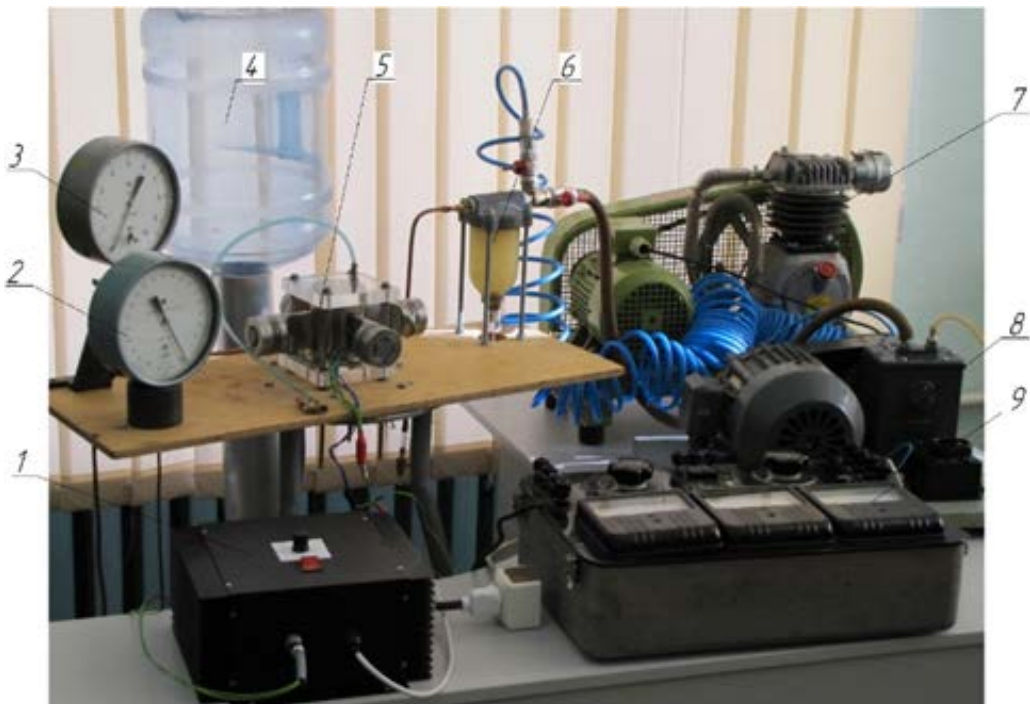


Рис. 12. Загальний вигляд експериментального стенду (1 - блок електроніки, 2 - вакуумметр, 3 - манометр, 4 - бак, 5 - кавітатор, 6 - ємність контролю рівня заповнення, 7-компресор, 8-вакуумнасос, 9 - вимірювальна станція)

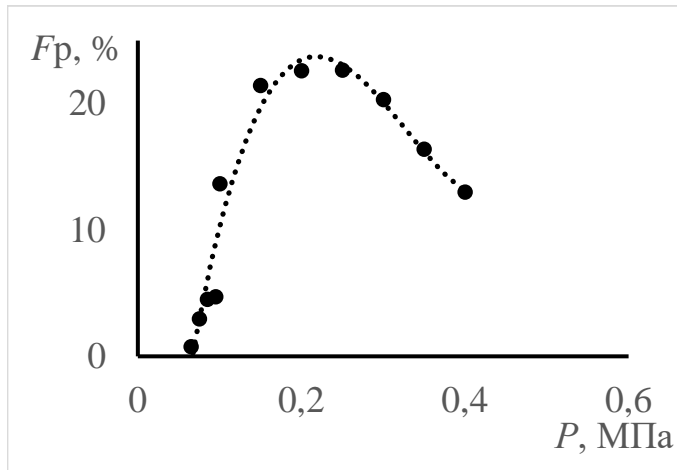


Рис. 13 Залежність площі ерозійного руйнування алюмінієвої фольги від зміни статичного тиску

вигляді графічної залежності площі ерозійного руйнування алюмінієвої тестової фольги від зміни статичного тиску на рис. 13.

Експериментальним шляхом доведено вплив статичного тиску на інтенсивність ультразвукової кавітації. Показано зміну ерозійної активності кавітації у разі зміни статичного тиску в межах 0,065 ... 0 МПа і 0 ... 0,3 МПа щодо атмосферного.

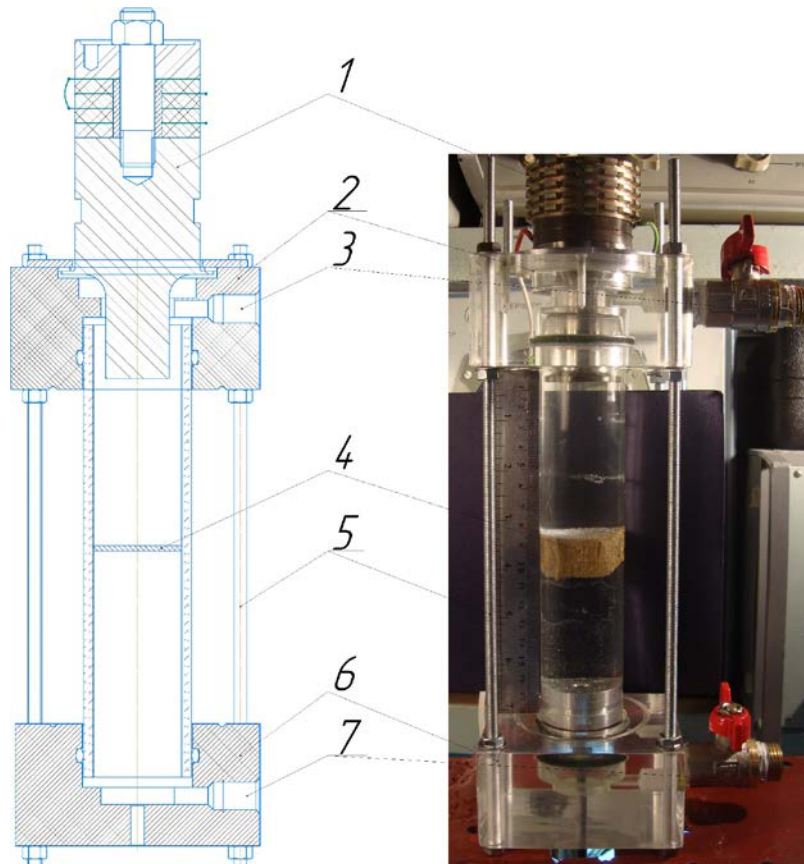


Рис. 14 Схема та загальний вигляд стенду для визначення оптимального місцезнаходження фільтрувальної перегородки. (1 – ультразвуковий кавітаційний випромінювач; 2 – кришка верхня; 3 – відвід рідини; 4 – випробувана перегородка; 5 – шпилька кріплення; 6 – кришка нижня; 7 – підвід рідини.)

розташуванні всередині ємності 13 утворюється замкнута повітряна порожнина, яка дозволяє контролювати рівень заповнення установки робочою рідиною і запобігає її потраплянню в вимірювальні прилади 1,2 і пневматичну апаратуру 15-20. До схеми включений додатковий фільтр 14, який захищає вакуумний насос від випадкового крапельного попадання рідини.

Загальний вигляд випробувального стенду представлений на рис. 12.

Оброблені і усереднені результати проведеного експериментального дослідження були представлені у вигляді графічної залежності площі ерозійного руйнування алюмінієвої тестової фольги від зміни статичного тиску на рис. 13.



Фільтрувальну перегородку в ультразвуковому полі можна розташувати в двох місцях - в пучності або в вузлі. Для визначення оптимального положення було виготовлено стенд, показаний на рис. 14. Установка являє собою скляну трубу, обмежену кришками з поліметилакрилату.

На верхній кришці труби розміщено ультразвуковий випромінювач 2 потужністю 50 Вт. У скляній трубі розміщено фільтрувальну перегородку 4, яка виконана з поглинаючого пружні коливання, матеріалу – фторопласту або з відбиваючого пружні коливання, матеріалу – металевої сітки.

В результаті було встановлено, що розташовувати фільтрувальну перегородку доцільно не далі ніж 1,5 довжини хвилі від поверхні випромінювання. При цьому спостерігалась максимальна ефективність кавітаційної ерозії тестової фольги. Фторопласт Ф4 має поглинаючу поверхню і на його поверхні у будь-якому випадку буде мінімум швидкості та максимум тиску тобто вузол стоячої хвилі. Відлік вузлів та пучностей стоячої хвилі завжди починався з поверхні фторопластової перегородки.

Теоретичні та експериментальні результати роботи також впроваджено у навчальний процес кафедри Прикладної гідроаеромеханіки і механотроніки КПІ ім. Ігоря Сікорського в курсах «Основи теорії гідроавтоматики», «Гідроавтоматика та керування», «Гідроавтоматика в мехатронних системах» та при написанні студентських дипломних та магістерських робіт.



а)



б)

Рис. 15 Ультразвуковий кавітаційний фільтр з ефектом саморегенерації: а- зовнішній вигляд; б – встановлений на виробництві соняшникової олії.

Конструкторську документацію з рекомендаціями, отриманими на основі проведеної роботи, було впроваджено у виробництво на підприємстві ПрАТ «Цикорій» в технологічному процесі виготовлення згущеного цикорію, що дозволило збільшити час використання фільтроелементу на 50%.

За результатами дисертаційної роботи було виготовлено та впроваджено ультразвуковий кавітаційний фільтр (рис. 15) на підприємстві ТОВ «Ашер8». Ультразвукове технологічне обладнання розроблено та виготовлено з метою підвищення ступеню очищення соняшникової олії та забезпечення постійної регенерації фільтрувального елементу за рахунок ефектів, що супроводжують явище ультразвукової кавітації. Створений експериментальний зразок обладнання було встановлено та випробувано в технологічній лінії з виробництва соняшникової олії. Експериментальна перевірка підтвердила ефективність запропонованого

авторами обладнання. Впровадження ультразвукового кавітаційного технологічного обладнання дозволило покращити конкурентоздатність продукції підприємства. Термін беззмінної роботи фільтрувального елемента вдалося збільшити на 41%.

## ЗАГАЛЬНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

1. За результатами аналізу основних способів очищення рідин методом фільтрування, встановлено, що актуальною задачею є збільшення інтервалу між обслуговуванням фільтрів, яка може бути вирішена шляхом очищення фільтрувальної перегородки за рахунок введення ультразвукової енергії в зону фільтрування, що потребує уточнення фізичної і математичної моделі взаємодії частинки забруднювача з фільтроелементом при ультразвуковому кавітаційному фільтруванні, в яких має бути враховано надзвукові швидкості руху частинок забруднювача.

2. За результатами комп'ютерного дослідження росту парогазової бульбашки в ультразвуковому середовищі отримано показники швидкості руху частинки забруднювача, що знаходиться біля стінки колапсуючої кавітаційної бульбашки, отримані результати засвідчують можливість досягнення частинками забруднювача надзвукової швидкості переміщення в рідині.

3. Визначено, шляхом математичного моделювання ударної взаємодії частинки бруду з фільтрувальною перегородкою, залежності зношення конструкційних матеріалів у часі під впливом ультразвукової кавітації поверхонь з фторопласту Ф4 та сталі 12Х18Н10Т. Встановлено, що сталь 12Х18Н10Т вдвічі менше піддається впливу кавітаційної ерозії у порівнянні з фторопластом Ф4, та, за результатами експериментального дослідження впливу параметрів процесу ультразвукової кавітації на відносну втрату об'єму конструкційних матеріалів, встановлено, що модуль Юнга матеріалу має суттєво більший вплив на відносну втрату об'єму конструкційних матеріалів ніж тривалість кавітаційного впливу, тобто 12Х18Н10Т є доцільним матеріалом для використання в ультразвукових кавітаційних фільтрах.

4. За результатами експериментального дослідження встановлено залежність надлишкового та вакууметричного тиску в кавітаційній камері від інтенсивності ультразвукової кавітації та визначено, що максимальна інтенсивність кавітаційного впливу припадає на інтервал тиску 0,2...0,3 МПа. Експериментально визначено раціональні параметри розташування фільтрувальної перегородки відносно ультразвукової хвилі в кавітаційній камері.

5. Запропонована інженерна методика розрахунку резонансних елементів конструкції корпусу фільтра та приводів-випромінювачів, застосування якої передбачає врахування умов експлуатації, характеристик конструкційних матеріалів та марки п'єзоелектричних перетворювачів, що в сукупності забезпечує збільшення безперервної роботи фільтроелементу. На основі методики розроблені та впровадженні конструкції ультразвукових фільтрів для технологічних процесів згущення цикорію та очищення соняшникової олії, які забезпечили досягнення в середньому 45% збільшення часу безперервної роботи фільтрувального обладнання на виробництві.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

### Статті у фахових виданнях:

1. The Impact of Static Pressure on the Intensity of Ultrasonic Cavitation in Aqueous Media / O. F. Luhovskyi, I. A. Gryshko, **A. I. Zilinskiy**, A. I. Patsola. // Journal of Water Chemistry and Technology. – 2018. – №40. Issue3. С. 143–150. (Закордонне видання, що входить до Web of Science, США) *Здобувачем проведено обробку експериментальних даних та аналіз руйнування дослідних зразків з використанням програмного забезпечення Mathcad.*

2. Луговський О. Ф., **Зілінський А. І.**, Шульга А. В., Гришко . І. А., Лавріненков А. Д., Галецький О. С., Завалій О. П. (2020) “Method for calculating a cylindrical ultrasonic cavitation filter chamber with a regeneration effect”, Visnyk NTUU KPI Serii A - Radiotekhnika Radioaparatabuduvannia, (82), pp. 52-60. doi: 10.20535/RADAR.2020.82.52-60. (Входить до НМБ Web of Science) *Здобувачем запропоновано методику розрахунку циліндричних кавітаційних камер.*

3. Можливості регенерації фільтруючих перегородок / О. Ф.Луговський, **А. І. Зілінський**, А. В. Шульга, І. А. Гришко. // Mechanics and Advanced Technologies. – 2020. – №89. (Входить в НМБ РІНЦ, Index Copernicus. Google Scholar) *Здобувачем проведено аналіз існуючих способів регенерації фільтрувальних перегородок.*

4. Луговська К. О. Особливості застосування ультразвукових коливань в технології фільтрування рідини / К. О. Луговська, **А. І. Зілінський**, О. О. Коваленко. // Mechanics and Advanced Technologies. – 2018. – №83. – С. 11–17. (Входить в НМБ РІНЦ, Index Copernicus. Google Scholar) *Здобувачем проаналізовано способи надання ультразвукових коливань рідині та фільтрувальному елементу.*

5. Зилинский А. И. Математическая модель процесса фильтрации в ультразвуковом поле повышенной интенсивности / **Зилинский А. И.**, Луговской А. Ф., Гришко И. А. // Вісник НТУУ «КПІ». Машинобудування : збірник наукових праць. – 2015. – № 2(74). – С. 11–17. (Входить в НМБ РІНЦ, Index Copernicus. Google Scholar) *Здобувачем розраховано швидкість забруднювача, який знаходиться поблизу кавітаційного пухирця, що колапсує.*

6. Моделювання ударної взаємодії частинки бруду з фільтроелементом при ультразвуковому кавітаційному фільтруванні / [**А. І. Зілінський**, О. Ф. Луговський, М. Г. Кришук та ін.]. // Mechanics and Advanced Technologies. – 2020. – №88. – С. 58–65. (Входить в НМБ РІНЦ, Index Copernicus. Google Scholar) *Здобувачем проведено моделювання удару частинки забруднювача по фільтрувальній перегородці.*

### Патенти:

7. Патент на винахід № 108589 МПК (2006,01) C02F1/36 C02F1/48 B01D33/03 B01D39/12 від 12.05.2015, Бюл. №3 / Ультразвукове кавітаційне обладнання / Луговський О.Ф., Мовчанюк А.В., Гришко І.А., **Зілінський А.І.**, Луговський О.О. *Здобувачем запропоновано конструкцію установки для ультразвукового кавітаційного очищення рідин.*

8. Патент на корисну модель № 132117 МПК (2006.01) C02F1/36 від 11.02.2019, Бюл. №3 / Спосіб підготовки води в басейнах для плавання із застосуванням ультразвуку / Луговський О.Ф., Бернік І.М., **Зілінський А.І.**, Луговська К.О., Храменков О.В. *Спосіб оснований на конструкції фільтрувальної установки запропонованої здобувачем.*

#### **Тези доповідей:**

9. Луговський О.Ф. Технологія ультразвукового кавітаційного фільтрування рідин Луговський О.Ф., **Зілінський А.І.** // Тези ХІХ Міжнародної науково-технічної конференції "Гідроаеромеханіка в інженерній практиці", 2014 р., м. Кіровоград. *Здобувачем проаналізовано процес фільтрування рідин в ультразвуковому середовищі.*

10. Луговський О.Ф. Моделювання динаміки парогазової бульбашки в ультразвуковому полі підвищеної інтенсивності/ Луговський О.Ф., **Зілінський А.І.** // Тези ХVІ Міжнародної науково-технічної конференції «Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта», 2015р., м. Суми. *Здобувачем визначено закон росту парогазової бульбашки в ультразвуковому кавітаційному середовищі.*

11. Луговський О.Ф. Моделювання процесу фільтрування рідини в ультразвуковому полі підвищеної інтенсивності/ Луговський О.Ф., **Зілінський А.І.** // Тези ІV Міжнародної науково-технічної конференції «Промислова гідраліка і пневматика», 2015., м. Суми. *Здобувачем розраховано швидкості частинки забруднювача, що знаходилась поруч з колапсуючою бульбашкою.*

12. Луговський О.Ф. Poprawa procesow technologicznych z wykorzystaniem zjawiska kawitacji / Луговський О.Ф., **Зілінський А.І.**, Гришко І.А., Ночніченко І.В. // Матеріали міжнародної науково-технічної конференції «NAPĘDY I STEROWANIA HYDRAULICZNE I PNEUMATYCZNE 2018», 2018 р., м. Kliczkowie. *Здобувачем представлено технологію фільтрування рідини в ультразвуковому середовищі.*

13. Луговський О.Ф. Дослідження впливу ультразвукової кавітації на конструкційні матеріали / Луговський О.Ф., Гришко І.А., **Зілінський А.І.** // Матеріали ХХІV Міжнародної науково-технічної конференції "Гідроаеромеханіка в інженерній практиці", 2019 р., м. Київ. С.85-87. *Здобувачем представлено результати експериментального дослідження втрати маси конструкційних матеріалів в ультразвуковому середовищі.*

14. Луговський О.Ф. Стенд для ультразвукового кавітаційного фільтрування рідин / Луговський О.Ф., **Зілінський А.І.** // Тези ХІV Міжнародної науково-технічної конференції «Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта», 2014., м. Севастополь. *Здобувачем розроблено експериментальний стенд для дослідження процесу фільтрування в ультразвуковому середовищі.*

## АНОТАЦІЯ

**Зілінський А.І. Ультразвуковий кавітаційний фільтр з ефектом самоочищення для рідких середовищ.** – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.02.02 – Машинознавство. – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, 2021 р.

Дисертація присвячена вирішенню проблем під час створення ультразвукових кавітаційних фільтрів з ефектом самоочищення для рідких середовищ, містить теоретичні та практичні результати дослідження процесу фільтрування в умовах ультразвукової кавітації.

У роботі представлений аналіз відомих способів регенерації фільтрувальних перегородок та засоби їх реалізації в технологічних процесах машинобудування, хімічної промисловості, медицини та сільського господарства. На основі якої наведена уточнена фізична і математична моделі взаємодії частинки забруднювача з фільтроелементом при ультразвуковому кавітаційному фільтруванні, в яких враховано надзвукові швидкості руху частинок забруднювача.

Результати досліджень, представлених в роботі, дозволили розробити інженерну методику розрахунку камери збудженої на радіально-згинальній моді коливань для використання в ультразвуковому кавітаційному фільтрі з ефектом самоочищення, та використати її у технологічних процесах згущення цикорію та очищення соняшникової олії.

**Ключові слова:** ультразвукова кавітація, ультразвукове кавітаційне фільтрування, очищення рідин, фільтрування, стояча хвиля, кавітаційний реактор, ультразвуковий випромінювач.

## АННОТАЦИЯ

**Зилинский А.И. Ультразвуковой кавитационный фильтр с эффектом самоочистки для жидких сред.** – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.02.02 – Машиноведение. – Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», Киев, 2021.

Диссертация посвящена решению проблем при создании ультразвуковых кавитационных фильтров с эффектом самоочищения для жидких сред, содержит теоретические и практические результаты исследования процесса фильтрации в условиях ультразвуковой кавитации.

В работе представлен анализ известных способов регенерации фильтровальных перегородок и средства их реализации в технологических процессах машиностроения, химической промышленности, медицины и сельского хозяйства. На основе которой приведена уточненная физическая и математическая модели взаимодействия частицы загрязнителя с фильтроэлементом при ультразвуковом кавитационном фильтровании, в которых учтены сверхзвуковые скорости движения частиц загрязнителя.

Результаты исследований, представленных в работе, позволили разработать инженерную методику расчета камеры возбужденного на радиально-сгибательной моде колебаний для использования в ультразвуковом кавитационном фильтре с эффектом

самоочищения, и использовать ее в технологических процессах сгущения цикория и очистки подсолнечного масла.

**Ключевые слова:** ультразвуковая кавитация, ультразвуковое кавитационное фильтрование, очистка жидкостей, фильтрация, стоячая волна, кавитационный реактор, ультразвуковой излучатель.

### SUMMARY

**Zilinskiy A.I. Ultrasonic cavitation filter with self-cleaning effect for liquid media.**

The candidate's thesis nominated for a scientific degree of candidate of technical sciences on specialty 05.02.02 – Machine Science – National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, 2021.

The thesis is devoted to solving problems at creation of ultrasonic cavitation filters with self-cleaning effect for liquid environments, contains theoretical and practical results of filtration process under conditions of ultrasonic cavitation.

Intensive development of technologies with the use of liquids requires constant improvement of the efficiency of technological equipment, which ensures their purification from mechanical and bacterial contamination. To date, a significant number of methods and equipment for cleaning process fluids have been developed, which differ in efficiency and quality of cleaning. Devices that provide liquid filtration must meet certain requirements, including the degree of filtration from mechanical and bacterial contamination; productivity; possibility of restoration of filtering ability; resistance of the filter element to physical or chemical destruction; term or resource of working capacity.

The most common method of filtration is the purification of liquids using a porous partition. However, this type of filter does not meet all of the above requirements. When using porous partitions, a significant pressure drop is created, which leads to a reduction in flow. Over time, contaminants accumulate in the channels of the porous septum, which leads to secondary contamination of the liquid. Therefore, filters with a porous partition need periodic replacement. However, there are filters that use ultrasonic vibrations for cleaning, the intensity of which exceeds the threshold of cavitation. Filtration in the conditions of an ultrasonic field allows to increase time of uninterrupted work of the filtering equipment due to use of the effects accompanying the phenomenon of ultrasonic cavitation.

However, the lack of methods for calculating ultrasonic cavitation filters and dependencies that will determine their rational operational and design parameters and choose the material, make it impossible to create efficient structures based on the process of ultrasonic exposure to the liquid.

The paper presents an analysis of known methods of regeneration of filter element and means of their implementation in the technological processes of mechanical engineering, chemical industry, medicine and agriculture. On the basis of which the specified physical and mathematical models of interaction of particles of pollutant with a filter element at

ultrasonic cavitation filtration in which supersonic speeds of movement of particles of pollutants are considered are resulted.

According to the results of a computer study of the growth of a vapor gas bubble in an ultrasonic medium, the velocity of a contaminant particle near the wall of a collapsing cavitation bubble is obtained.

It is determined by mathematical modeling of the impact interaction of dirt particles with the filter partition, the dependence of wear of structural materials over time under the influence of ultrasonic cavitation of surfaces made of fluoroplastic F4 and steel 12X18H10T. It was found that 12X18H10T steel is twice less exposed to cavitation erosion compared to fluoroplastic F4, and, according to the results of an experimental study of the influence of ultrasonic cavitation process parameters on the relative volume loss of structural materials, it was found that the Young's modulus is significantly larger. The effect on the relative loss of volume of structural materials than the duration of the cavitation effect, ie 12X18H10T is a suitable material for use in ultrasonic cavitation filters.

An engineering method for calculating the resonant elements of the filter housing structure and radiator drives is proposed, the application of which takes into account the operating conditions, characteristics of structural materials and the brand of piezoelectric transducers, which together increases the continuous operation of the filter element. Based on the methodology, the design of ultrasonic filters for technological processes of chicory thickening and sunflower oil purification was developed and implemented, which ensured the achievement of an average of 45% increase in the continuous operation time of filter equipment in production.

According to the results of the experimental study, the dependence of excess and vacuum pressure in the cavitation chamber on the intensity of ultrasonic cavitation was determined and it was determined that the maximum intensity of cavitation exposure falls on the pressure range 0.2...0.3 MPa. Rational parameters of the location of the filter partition relative to the ultrasonic wave in the cavitation chamber are experimentally determined.

**Keywords:** ultrasonic cavitation, ultrasonic cavitation filtration, liquid purification, filtration, standing wave, cavitation reactor, ultrasonic emitter.