

**ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
МІНІСТЕРСТВА ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

**ДУШЕНКО ОЛЕКСАНДР СЕРГІЙОВИЧ**

УДК 621.224.001

**ДИСЕРТАЦІЯ**

**ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ КАВІТАЦІЙНО-МАГНІТНОГО  
ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ВОДОПІДГОТОВКИ КОТЕЛЕНЬ**

Спеціальність 131 – Прикладна механіка

Галузь знань 13 – Механічна інженерія

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

\_\_\_\_\_ О. С. Душенко

Науковий керівник: Ткачук Віталій Павлович, кандидат технічних наук,  
доцент.

Хмельницький – 2026

## АНОТАЦІЯ

*Душенко О. С.* Обґрунтування параметрів кавітаційно-магнітного обладнання для водопідготовки котелень – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 131 – Прикладна механіка. – Хмельницький національний університет. – м. Хмельницький, 2026.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню науково-технічної задачі підвищення якості та складу води, яка поступає з муніципального водопостачання, артезіанських свердловин і водойм, шляхом створення обладнання та вібраційної машини для попереднього оброблення гідрокавітацією та магнітним полем.

**Об'єктом дослідження** є процес очищення та зміни властивостей води у кавітаційно-магнітному обладнанні та вібраційній машині.

**Предметом дослідження** є технологічні параметри та конструктивні залежності обладнання, динамічні режими роботи вібраційної машини, частотний діапазон режимів роботи вібраційного приводу, моделювання процесу кавітації у насадку гідрокавітатора.

**У вступі** наведена загальна характеристика роботи, обґрунтовано актуальність теми досліджень, розкрито зв'язок роботи з науковими програмами, планами та темами, сформульована мета, завдання, об'єкт та предмет дослідження, вказана наукова новизна та практичне значення одержаних результатів, визначено особистий внесок здобувача, наведені дані про апробацію, публікації, структуру та обсяг роботи.

Вирішення науково-технічної задачі, а саме підвищення якості та складу водного середовища, яке поступає з муніципального водопостачання, артезіанських свердловин і водойм, шляхом створення обладнання для попереднього оброблення гідрокавітацією та магнітним полем з метою

пом'якшення та зміни її властивостей є актуальним науково-технічним завданням.

*У першому розділі* здійснено системний аналіз будови сучасного обладнання водопідготовки для застосування у тепломережах та його технологічних параметрів. Визначено наслідки застосування недостатньо очищеного водного середовища.

Проведено аналіз літературних джерел застосування кавітаційних процесів у різних технологіях з водними середовищами. Проведено патентний пошук та проаналізовано конструкції кавітаційного обладнання впливу на водні середовища, а також особливості конструкцій обладнання впливу магнітного поля на водні середовища. Описано об'єкт дослідження.

Результати аналізу літературних джерел і патентного огляду дали можливість сформулювати мету та задачі для досягнення поставленої мети.

*У другому розділі* на основі аналізу сучасних досліджень будови молекули води та параметрів водневих зв'язків у рідині визначено основні фізичні фактори, що діють при кавітаційно-магнітному обробленні водного середовища.

Використання гідродинамічної кавітації в запропонованому обладнанні дозволяє інтенсифікувати і прискорювати технологічні процеси в рідких середовищах, при цьому значно зменшуючи витрати енергії. Утворені хімічно-активні радикали розщеплення води взаємодіють з іншими компонентами розчину, змінюючи його властивості. Швидкість та направленість хімічних реакцій значною мірою пов'язані із природою газоподібних речовин, що містяться в розчині або утворюються, як побічні продукти реакції.

У результаті аналізу встановлено, що кавітаційний вплив та зовнішнє магнітне поле впливає на кількість водневих зв'язків, структуру рідкої води та коефіцієнт самодифузії молекул води. Магнітне поле послаблює водневі зв'язки у воді. Також магнітне поле може додатково, впливаючи на атоми кисню, частково забезпечити відрив від ядра електронів та зміну спинів протонів кисню, тобто порушити дипольну структуру молекул води, що призводить до

того, що омагнічена вода являє собою мономолекулярну структуру з позитивно зарядженими молекулами.

*У третьому розділі* наведено план-програму проведення експериментальних досліджень, описано загальну методологію досліджень, проведених у роботі, що базується на системному підході для вирішення поставленого науково-технічного завдання.

Для процесу виконання дисертаційного дослідження розроблено та виготовлено експериментальні установки для моделювання фізичних процесів кавітаційно-магнітного оброблення водного середовища та конструкцію вібраційної машини для кавітаційного впливу. Приведено опис оригінальних приладів та датчиків для проведення експериментальних досліджень.

Грунтовно описано методику проведення досліджень параметрів статичних кавітаторів за допомогою SolidWorks.

Наведено методику проведення багатофакторного експерименту для визначення кінематичних та конструктивних характеристик обладнання кавітаційно-магнітного оброблення.

Описано методику та прилади для проведення досліджень структурного стану та визначення показників водного середовища до і після оброблення.

Наведено методику обробки експериментальних даних та оцінку точності отриманих результатів.

*У четвертому розділі* наведено побудову аналітичної моделі роботи вібраційної машини для зміни складу та властивостей водного середовища, з якої встановлено вплив конструктивних параметрів та режимів роботи приводу обладнання на отримання максимальної продуктивності. У результаті проведених досліджень із застосуванням швидкісної відеоз'ємки встановлено реальні частотні границі режимів роботи вібраційної машини та амплітуди коливань поршня. Також у результаті проведення експериментальних досліджень встановлено, що оптимальна продуктивність вібраційної машини зміни властивостей водного середовища знаходиться при наступних параметрах роботи приводу та конструктивних співвідношеннях: частота коливань приводу

19-21 Гц при амплітуді  $A = 2$  мм; діаметрі поршня  $D_p = 100$  мм та діаметрі насадка 10 мм.

Було застосовано моделювання у SolidWorks Flow Simulation для вивчення картини проходження потоку рідини крізь насадки різної конфігурації з визначенням основних їх характеристик та числа кавітації. На основі аналізу результатів моделювання процесу гідродинамічної кавітації були виготовлені і досліджувались кавітаційні насадки: ступеневий на вході та виході, конфузорний на вході та ступеневий на виході, конфузорно-дифузорний з такими геометричними параметрами: довжина горловини сопла 20 мм, діаметр горловини насадка в кавітаційних реакторах 6 мм. Встановлено, що найбільш раціональним є використання кавітаційного насадка ступеневого на вході та виході з діаметром горловини сопла 6 мм, який показав найбільшу здатність перемішування потоку рідини на виході з нього при вхідному тиску 0,12 МПа при числі кавітації менше одиниці, що відповідає процесу розвинутої кавітації.

Проведено експериментальні дослідження зміни рН водного середовища при кавітаційному та комплексному кавітаційно-магнітному впливі. За результатами проведеного багатофакторного експериментального дослідження визначення зміни показника рН водного середовища при кавітаційно-магнітній обробці встановлено, що при збільшенні рівня магнітної індукції показчик рН зменшується до 8,1 од., при збільшенні швидкості проходження потоку рідини від 3 до 4 м/с показчик рН не змінюється та зі зміною відстані між магнітами від 15 до 35 мм спостерігається максимум збільшення рН при відстані 25 мм. Рекомендовані параметри кавітаційного та магнітного блоків наступні: рівень магнітної індукції 900 мТ; швидкість потоку рідини 3 м/с; оптимальна відстань становить 25 мм.

Проведено експериментальні дослідження зміни структури води кристало-оптичним методом та визначення показників водного середовища при магнітно-кавітаційному обробленні. У результаті застосування комплексної дії гідрокавітації у статичному кавітаторі та вібраційному кавітаторі з омагнічуванням потоку статичним магнітним полем з градієнтом напруженості

вздовж потоку рідини отримано створення інтенсивних умов проведення окислювальних та водневих реакцій у реальних режимах роботи обладнання водопідготовки, які показали зміни параметрів окислювального відновлювального потенціалу водного середовища за часом оброблення та зміною показника вмісту загальної мінералізації за часом, а також показника рН водопровідної води за часом оброблення, що говорить про покращення якості водного середовища.

Проведено техніко-функціональний аналіз будови запропонованого обладнання та запропоновано методологію проектування основних вузлів конструкції вібраційної машини і обладнання для зміни складу та властивостей водного середовища для котелень.

Одержані результати були використані у розробленні рекомендацій для проектування ефективного обладнання водопідготовки для тепломереж на першому етапі, що дасть можливість зменшити навантаження на обладнання при застосуванні мембранних технологій – зворотного осмосу та ультрафільтрації на другому етапі, зменшення накипоутворення. Визначено енергетичні витрати запропонованого обладнання для зміни складу та властивостей водного середовища для котелень.

При цьому отримані такі наукові результати:

- вперше побудовано аналітичну модель для визначення максимального тиску у камері пульсації, що дало можливість визначати продуктивність вібраційної машини очищення та зміни властивостей водного середовища залежно від конструктивних параметрів та режимів роботи приводу;

- результати проведених досліджень із застосуванням швидкісної відеозйомки дозволили визначити реальні режими роботи вібраційної машини, що дозволило встановити оптимальну продуктивність вібраційної машини очищення та зміни властивостей водного середовища, яке знаходиться при таких параметрах роботи приводу та конструктивних співвідношеннях: частота коливань приводу 19-21 Гц при амплітуді  $A = 2$  мм; діаметрі поршня  $D_p = 100$  мм та діаметрі насадка 10 мм.;

- у результаті проведених досліджень моделювання кавітаційних процесів у SolidWorks Flow Simulation в різних, за конструктивними особливостями, статичних кавітаторів було отримано траєкторії руху шарів рідини при проходженні крізь кавітатори та картину розподілу величини тиску у різних точках кавітаторів, що дало можливість визначити оптимальну конструкцію статичного кавітатора – ступінчастого на вході та виході;

- одержав подальший розвиток метод оцінки зміни основних властивостей водного середовища та експериментально підтверджено, що магнітні і кавітаційні процеси у статичному кавітаторі та вібраційній машині покращують основні характеристики водного середовища, а саме: зростає рН, зменшується коефіцієнт поверхневого натягу, зменшується вміст розчинених солей.

***Практичне значення отриманих результатів*** для машинобудування полягає: у створенні технологічного обладнання для підвищення якості та складу водного середовища, яке поступає з муніципального водопостачання, артезіанських свердловин і водойм, шляхом створення обладнання для попереднього оброблення гідрокавітацією у вібраційній машині із застосуванням додаткового статичного кавітатора та магнітного поля. Вплив звукової гідрокавітації та змінного за напрямом магнітного поля на водного середовища зводиться до єдиного процесу – розщепленню молекул води у кавітаційній порожнині на активні радикали, що зменшує вміст солей жорсткості та накипоутворення, підвищує строк роботи блоку зворотного осмосу, збільшує термін його регенерації та експлуатації.

Результати аналітичних та експериментальних досліджень дозволили створити методологію проектування насадків статичних кавітаторів у SolidWorks та визначати проектну продуктивність запропонованого обладнання. Запропоновану методологію проектування основних вузлів конструкції вібраційної машини і обладнання для зміни складу та властивостей водного середовища для котелень рекомендовано до впровадження науковцям і

інженерам при проектуванні вібраційних машин та обладнання для водопідготовки.

Результати виконаних досліджень та окремі теоретичні положення прийнято до впровадження на КП «Тепловик» (м. Староконстянтнів) та на ПФКФ «ДЖІЛКА» (м. Хмельницький).

Наукові положення та практичні здобутки, отримані в дисертаційному дослідженні, впроваджені у навчальний процес кафедри технології машинобудування Хмельницького національного університету для підготовки магістрів і докторів філософії у матеріалах методичних розробок при викладанні дисципліни «Інженерне моделювання та проектування технологічних процесів і конструкцій в машинобудуванні».

**Ключові слова:** вібраційна машина, режими роботи, продуктивність, статичний гідравлічний кавітатор, магнітне поле, комп'ютерне моделювання, проектування.

**Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:**

**Статті у журналах, що включені до переліку фахових видань України:**

1. Душенко О. С., Ткачук В. П. Обладнання вхідної магнітно-кавітаційної підготовки води для тепломереж. *Вісник Хмельницького національного університету, Технічні науки*. №3, Т.2. 2024 С. 73-80. Особистий внесок здобувача: розроблення конструкції обладнання для попереднього оброблення гідрокавітацією у вібраційній машині із застосуванням додаткового статичного кавітатора та магнітного поля.

2. Душенко О. С., Ткачук В. П. Обґрунтування параметрів продуктивності вібраційної машини зміни складу та властивостей води для тепломереж. *Вісник Хмельницького національного університету, Технічні науки*. №6, Т.1. 2024 С. 340-347. Особистий внесок здобувача: побудова математичної моделі вібраційної машини з визначенням її продуктивності.

3. Душенко О. С., Ткачук В. П. Дослідження впливу магнітного поля із змінною індукцією по довжині осі потоку на склад та властивості води для

тепломереж. *Вісник Хмельницького національного університету, Технічні науки.* №6, Т.1. 2025 С. 272-280. Особистий внесок здобувача: *розроблення конструкції блоку омагнічування та експериментальні дослідження впливу магнітного поля на властивості води.*

4. Душенко О. С., Ткачук В. П., Марченко М. В. Дослідження конструктивних параметрів кавітаційних насадків та режимів роботи обладнання водопідготовки для тепломереж у Solidworks і практичне використання. *Вісник Хмельницького національного університету, Технічні науки.* №6.2, 2025 С. 286-297. Особистий внесок здобувача: *побудова моделей насадків у Solidworks та аналіз інтенсивності кавітаційних процесів з визначенням числа кавітації та експериментальне визначення показників зміни складу водопровідної води після оброблення в обладнанні.*

***Патент України на корисну модель:***

5. Кавітаціо-магнітний пристрій зміни властивостей та складу води для котелень. №161692. МПК F25B 15/02 / Душенко О. С., Ткачук В. П. u202406294. Заявл.30.12.24. Опубл. 02.10.25.

Особистий внесок здобувача: *ідея розробки конструкції пристрою зміни властивостей та складу води для котелень та її опис; частка кожного з авторів є рівною.*

***Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір:***

6. Визначення параметрів продуктивності вібраційної машини зміни складу та властивостей води для тепломереж. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір №CR0211131125

Особистий внесок здобувача: *побудова математичної моделі вібраційної машини з визначенням її продуктивності.*

***Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:***

7. Душенко О. С., Ткачук В. П. Обладнання зміни властивостей та складу води для тепломереж. Proceedings of the 10th International Scientific and Practical Conference «X Ukrainian-Polish scientific dialogues» Actual problem of modern science. (June 11-15, 2024). Khmelniysky-Bydgoszcz. С. 145-149. Особистий

внесок здобувача: *розроблення конструкції обладнання для попереднього оброблення гідрокавітацією у вібраційній машині із застосуванням додаткового статичного кавітатора та магнітного поля.*

8. Душенко О. С., Ткачук В. П. Обладнання зміни властивостей та складу води для тепломереж. Abstracts of the conference 10th International Scientific and Practical Conference «X Ukrainian-Polish scientific dialogues» Actual problem of modern science. (June 11-15, 2024). Khmelnytsky-Bydgoszcz. P. 26. Особистий внесок здобувача: *запропоновано основні напрямки досліджень обладнання для попереднього оброблення гідрокавітацією у вібраційній машині із застосуванням додаткового статичного кавітатора та магнітного поля.*

9. Ткачук В. П. Душенко О. С. Конструкція обладнання вхідної підготовки води для тепломереж. Proceedings of the IVth International Scientific and Practical Conference. «Diversity and inclusion in scientific area» (Marh 28-29, 2024). Warchav. Poland. С. 417-422. Особистий внесок здобувача: *розроблення конструкції обладнання для попереднього оброблення гідрокавітацією у вібраційній машині із застосуванням додаткового статичного кавітатора та магнітного поля.*

10. Душенко О. С., Ткачук В. П. Дослідження параметрів вібраційної машини для підготовки води для котелень. Матеріали VIII Міжнародної науково-практичної конференції: "Сучасні технології промислового комплексу" (17-19 вересня 2024 року). Херсон- Хмельницький. С. 143-148. Особистий внесок здобувача: *математична моделі вібраційної машини з визначенням її продуктивності.*

11. Душенко О. С., Ткачук В. П. Вплив магнітного поля змінної індукції по довжині осі потоку на склад та властивості води для тепломереж. II International scientific conference of students and young scientists «problems and innovations in the development of engineering, technologies and transport». : Collection of scientific works of the International Scientific Conference of Students and Young Scientists, April 24-26, 2025 – Khmelnytskyi: KhNU, 2025. С.135-146.

Особистий внесок здобувача: *розроблення конструкції блоку омагнічування та експериментальні дослідження впливу магнітного поля на властивості води.*

12. Душенко О. С., Ткачук В. П. Моделивання кавітаційних процесів у насадках в обладнанні водопідготовки для тепломереж у SolidWorks Flow Simulation. International Scientific and Practical Conference “Current Issues and Prospects for the Development of Science, Education, Technology and Society in the Era of Digital Transformations”: Conference Proceedings (Austin, USA, July 31, 2025). Austin, USA: Golden Quill Publishing, 2025. P. 99-104. Особистий внесок здобувача: *побудова моделей насадків у SolidWorks Flow Simulation та аналіз інтенсивності кавітаційних процесів.*

## **ABSTRACT**

***Dushenko O. S.*** Justification of the parameters of cavitation-magnetic equipment for water treatment of boiler rooms – Qualification scientific work in the form of a manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in specialty 131 – Applied Mechanics. – Khmelnytskyi National University. – Khmelnytskyi, 2026.

The dissertation is devoted to solving the scientific and technical problem of improving the quality and composition of water supplied from municipal water supply, artesian wells and reservoirs by creating equipment and a vibration machine for pre-treatment by hydrocavitation and a magnetic field.

***The object of the study*** is the process of purification and changing the properties of water in cavitation-magnetic equipment and a vibration machine.

***The subject of the research*** is the technological parameters and design dependencies of the equipment, dynamic operating modes of the vibration machine, the frequency range of operating modes of the vibration drive, modeling of the cavitation process in the hydrocavitator nozzle.

***The introduction provides*** a general description of the work, justifies the relevance of the research topic, reveals the connection of the work with scientific programs, plans and topics, formulates the goal, objectives, object and subject of the

research, indicates the scientific novelty and practical significance of the results obtained, determines the personal contribution of the applicant, provides data on testing, publications, structure and scope of the work.

Solving the scientific and technical problem, namely improving the quality and composition of water coming from municipal water supply, artesian wells and reservoirs, by creating equipment for pre-treatment with hydrocavitation and a magnetic field in order to soften and change its properties is a relevant scientific and technical problem.

*The first section provides* a systematic analysis of the structure of modern water treatment equipment for use in heating networks and its technological parameters. The consequences of using insufficiently purified water are determined.

An analysis of literature sources on the use of cavitation processes in various technologies with water environments is carried out. A patent search is conducted and the designs of cavitation equipment for the impact on water environments are analyzed, as well as the features of the designs of equipment for the impact of a magnetic field on water environments. The object of the study is described.

The results of the analysis of literature sources and patent review made it possible to formulate the goal and objectives for achieving the set goal.

*In the second section,* based on the analysis of modern studies of the structure of the water molecule and the parameters of hydrogen bonds in the liquid, the main physical factors operating during cavitation-magnetic treatment of the water environment are determined.

The use of hydrodynamic cavitation in the proposed equipment allows you to intensify and accelerate technological processes in liquid environments, while significantly reducing energy consumption. The formed chemically active radicals of water splitting interact with other components of the solution, changing its properties. The speed and direction of chemical reactions are largely related to the nature of gaseous substances contained in the solution or formed as by-products of the reaction.

As a result of the analysis, it was found that the external magnetic field affects the number of hydrogen bonds, the structure of liquid water and the coefficient of

self-diffusion of water molecules. The magnetic field weakens the hydrogen bonds in water. Also, the magnetic field can additionally, by acting on oxygen atoms, partially provide separation from the nucleus of electrons and a change in the spins of oxygen protons, i.e. disrupt the dipole structure of water molecules, which leads to the fact that magnetized water is a monomolecular structure with positively charged molecules.

*The third section* provides a plan-program for conducting experimental research, describes the general methodology of the research conducted in the work, which is based on a systematic approach to solving the scientific and technical task.

For the process of carrying out the dissertation research, experimental installations for modeling the physical processes of cavitation-magnetic treatment of the aquatic environment and the design of a vibration machine for cavitation influence were developed and manufactured. A description of the original devices and sensors for conducting experimental research is given.

The methodology for conducting research on the parameters of static cavitators using SolidWorks is thoroughly described.

The methodology for conducting a multifactorial experiment to determine the kinematic and structural characteristics of cavitation-magnetic treatment equipment is given.

The methodology and devices for conducting research on the structural state and determining water parameters before and after treatment are described.

The methodology for processing experimental data and assessing the accuracy of the results obtained are given.

*The fourth section* presents the construction of an analytical model of the operation of a vibration machine for changing the composition and properties of water, from which the influence of design parameters and operating modes of the equipment drive on obtaining maximum productivity is established. In

As a result of the research conducted using high-speed video recording, the real frequency limits of the operating modes of the vibration machine and the amplitude of the piston oscillations were established. Also, as a result of experimental research,

it was established that the optimal performance of the vibration machine for changing the properties of water is at the following drive operation parameters and design ratios: drive oscillation frequency 19-21 Hz with amplitude  $A = 2$  mm; piston diameter  $D_p = 100$  mm and nozzle diameter 10 mm.

Modeling in SolidWorks Flow Simulation was used to study the pattern of fluid flow through nozzles of various configurations with the determination of their main characteristics and the cavitation number. Based on the analysis of the results of modeling the hydrodynamic cavitation process, cavitation nozzles were manufactured and studied: stepped at the inlet and outlet, confusing at the inlet and stepped at the outlet, confusing-diffuser with the following geometric parameters: nozzle neck length 20 mm, nozzle neck diameter in cavitation reactors 6 mm. It was established that the most rational is to use a cavitation nozzle with stepped at the inlet and outlet with a nozzle neck diameter of 6 mm, which showed the greatest ability to mix the liquid flow at its outlet at an inlet pressure of 0.12 MPa with a cavitation number less than one, which corresponds to the process of developed cavitation.

Experimental studies of the change in the pH of the aqueous medium under cavitation and complex cavitation-magnetic influence were conducted. According to the results of a multifactorial experimental study of determining the change in the pH of water during cavitation-magnetic treatment, it was found that with an increase in the level of magnetic induction, the pH indicator decreases to 8.1 units, with an increase in the speed of the liquid flow from 3 to 4 m/s, the pH indicator does not change, and with a change in the distance between the magnets from 15 to 35 mm, a maximum increase in pH is observed at a distance of 25 mm. The recommended parameters of the cavitation and magnetic blocks are as follows: magnetic induction level 900 mT; liquid flow speed 3 m/s; the optimal distance is 25 mm.

Experimental studies of changes in the structure of water by the crystal-optical method and determination of water parameters during magnetic-cavitation treatment were conducted. As a result of the application of the complex action of hydrocavitation in a static cavitator and a vibration cavitator with magnetization of the flow by a static magnetic field with a gradient of intensity along the fluid flow,

intensive conditions for carrying out oxidative and hydrogen reactions in real operating modes of water treatment equipment were created, which showed changes in the parameters of the oxidation-reduction potential of the aqueous medium over the treatment time and changes in the total mineralization content index over time, as well as the pH index of tap water over the treatment time, which indicates an improvement in the quality of the aqueous medium.

A technical and functional analysis was carried out and a methodology for designing the main structural components of a vibration machine and equipment for changing the composition and properties of water for boiler houses was proposed.

The results obtained were used in the development of recommendations for the design of effective water treatment equipment for heating networks at the first stage, which will make it possible to reduce the load on the equipment when using membrane technologies - reverse osmosis and ultrafiltration at the second stage, reducing scale formation. The energy costs of the proposed equipment for changing the composition and properties of water for boiler houses were determined.

***At the same time, the following scientific results were obtained:***

- for the first time, an analytical model was built to determine the maximum pressure in the pulsation chamber, which made it possible to determine the performance of the vibrating cleaning machine and changes in water properties depending on the design parameters and operating modes of the drive.

- the results of the studies using high-speed video recording made it possible to determine the real operating modes of the vibrating machine, which made it possible to establish the optimal performance of the vibrating cleaning machine and changes in water properties, which is at the following drive operating parameters and design ratios: the frequency of oscillations of the drive is 19-21 Hz at an amplitude of  $A = 2$  mm; piston diameter  $D_p = 100$  mm and nozzle diameter 10 mm.;

- as a result of the conducted studies of modeling cavitation processes in SolidWorks Flow Simulation in static cavitators of different design features, the trajectories of the liquid layers when passing through the cavitators and the pattern of the pressure distribution at different points of the cavitators were obtained, which

made it possible to determine the optimal design of the static cavitator - stepped at the inlet and outlet;

- the method of assessing the change in the basic properties of water was further developed and it was experimentally confirmed that magnetic and cavitation processes in a static cavitator and a vibration machine improve the basic characteristics of the aquatic environment, namely : pH increases, surface tension coefficient decreases, content of dissolved salts decreases.

***The practical significance*** of the obtained results for mechanical engineering is: in the creation of technological equipment to improve the quality and composition of water supplied from municipal water supply, artesian wells and reservoirs, by creating equipment for pre-treatment by hydrocavitation in a vibrating machine using an additional static cavitator and magnetic field. The effect of sonic hydrocavitation and a directionally variable magnetic field on water is reduced to a single process - the splitting of water molecules in the cavitation cavity into active radicals, which reduces the content of hardness salts and scale formation, increases the operating life of the reverse osmosis unit, increases the period of its regeneration and operation.

The results of analytical and experimental studies allowed us to create a methodology for designing static cavitator nozzles in SolidWorks and determine the design performance of the proposed equipment. The proposed methodology for designing the main structural components of a vibration machine and equipment for changing the composition and properties of water for boiler houses is recommended for implementation by scientists and engineers when designing vibration machines and equipment for water treatment.

***Keywords:*** vibration machine, operating modes, productivity, static hydraulic cavitator, magnetic field, computer modeling, design.

***Scientific works in which the main scientific results of the dissertation are published:***

Articles in journals included in the list of professional publications of Ukraine:

1. Dushenko O. S., Tkachuk V. P. Equipment for incoming magnetic-cavitation water treatment for heating networks. Bulletin of Khmelnytsky National University,

Technical Sciences. №3, Vol. 2. 2024 P. 73-80. Personal contribution of the applicant: development of the design of equipment for pre-treatment by hydrocavitation in a vibration machine using an additional static cavitator and a magnetic field.

2. Dushenko O. S., Tkachuk V. P. Justification of the performance parameters of a vibration machine for changing the composition and properties of water for heating networks. Bulletin of Khmelnytskyi National University, Technical Sciences. №. 6, Vol. 1. 2024 P. 340-347. Personal contribution of the applicant: construction of a mathematical model of a vibration machine with determination of its performance.

3. Dushenko O. S., Tkachuk V. P. Research into the influence of a magnetic field with variable induction along the length of the flow axis on the composition and properties of water for heating networks. Bulletin of Khmelnytskyi National University, Technical Sciences. № 6, Vol. 1. 2025 P. 482-490. Personal contribution of the applicant: development of the design of the magnetization unit and experimental studies of the influence of a magnetic field on the properties of water.

4. Dushenko O. S., Tkachuk V. P., Marchenko M. V. Research on the design parameters of cavitation nozzles and operating modes of water treatment equipment for heating networks in Solidworks and practical use. Bulletin of the Khmelnytsky National University, Technical Sciences. №6.2, 2025. C. 286-297. Personal contribution of the applicant: construction of nozzle models in Solidworks and analysis of the intensity of cavitation processes with determination of the cavitation number and experimental determination of indicators of changes in the composition of tap water after treatment in the equipment.

***Patent of Ukraine for a utility model:***

5. Cavitation-magnetic device for changing the properties and composition of water for boiler houses. No. 161692. MPK F25B 15/02 / Dushenko O. S., Tkachuk V. P. u202406294. Application 30.12.24. Publ. 02.10.25.

Personal contribution of the applicant: *the idea of developing a design for a device for changing the properties and composition of water for boiler houses and its description; the share of each author is equal.*

Certificate of registration of copyright for the work:

6. Determination of the performance parameters of a vibration machine for changing the composition and properties of water for heating networks. Certificate of registration of copyright for the work.

Personal contribution of the applicant: *construction of a mathematical model of a vibration machine with determination of its performance.*

***Scientific works certifying the approval of the dissertation materials:***

7. Dushenko O. S., Tkachuk V. P. Equipment for changing the properties and composition of water for heating networks. Proceedings of the 10th International Scientific and Practical Conference «X Ukrainian-Polish scientific dialogues» Actual problem of modern science. (June 11-15, 2024). Khmelnytsky - Bydgoszcz. P. 145-149. Personal contribution of the applicant: development of the design of equipment for pre-treatment by hydrocavitation in a vibrating machine with the use of an additional static cavitator and a magnetic field.

8. Dushenko O. S., Tkachuk V. P. Equipment for changing the properties and composition of water for heating networks. Abstracts of the conference 10th International Scientific and Practical Conference «X Ukrainian-Polish scientific dialogues» Actual problem of modern science. (June 11-15, 2024). Khmelnytsky - Bydgoszcz. P. 26. Personal contribution of the applicant: the main directions of research on equipment for pre-treatment by hydrocavitation in a vibrating machine with using an additional static cavitator and a magnetic field.

9. Tkachuk V. P. Dushenko O. S. Design of equipment for inlet water treatment for heating networks. Proceedings of the IVth International Scientific and Practical Conference. «Diversity and inclusion in scientific area» (Marh 28-29, 2024). Warchav. Poland. P. 417-422. Personal contribution of the applicant: development of the design of equipment for pre-treatment by hydrocavitation in a vibration machine using an additional static cavitator and a magnetic field.

10. Dushenko O. S., Tkachuk V. P. Research of the parameters of a vibration machine for water treatment for boiler houses. Materials of the VIII International

Scientific and Practical Conference: "Modern technologies of the industrial complex" (September 17-19, 2024). Kherson-Khmelnyskyi. P. 143-148. Personal contribution of the applicant: mathematical model of a vibrating machine with determination of its productivity.

11. Dushenko O. S., Tkachuk V. P. Influence of a magnetic field of variable induction along the length of the flow axis on the composition and properties of water for heating networks. II International scientific conference of students and young scientists «problems and innovations in the development of engineering, technologies and transport». : Collection of scientific works of the International Scientific Conference of Students and Young Scientists, April 24-26, 2025 – Khmelnytskyi: KhNU, 2025. P.135-146. Personal contribution of the applicant: development of the design of the magnetization block and experimental studies of the influence of a magnetic field on the properties of water.

12. Dushenko O. S., Tkachuk V. P. Modeling of cavitation processes in nozzles in water treatment equipment for heating networks in SolidWorks Flow Simulation. International Scientific and Practical Conference “Current Issues and Prospects for the Development of Science, Education, Technology and Society in the Era of Digital Transformations”: Conference Proceedings (Austin, USA, July 31, 2025). Austin, USA: Golden Quill Publishing, 2025. P. 99-104. Personal contribution of the applicant: construction of nozzle models in SolidWorks Flow Simulation and analysis of the intensity of cavitation processes.

## ЗМІСТ

АННОТАЦІЯ.....	2
ВСТУП.....	23
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ЗАСТОСУВАННЯ КАВІТАЦІЙНО-МАГНІТНОГО ВПЛИВУ У ТЕХНОЛОГІЯХ ТА ТЕХНІЦІ ДЛЯ ВОДОПІДГОТОВКИ .....	32
1.1 Сучасний стан в технології та обладнанні водопідготовки для застосування у тепломережах .....	32
1.2 Аналіз застосування кавітаційних процесів у різних технологіях	43
1.3 Аналіз конструкцій кавітаційного обладнання впливу на водні середовища.....	45
1.4 Аналіз особливостей конструкцій обладнання впливу магнітного поля на водні середовища .....	54
1.5 Аналіз об'єкта досліджень.....	64
1.6 Висновки. Ціль і завдання досліджень.....	68
РОЗДІЛ 2. АНАЛІЗ ТЕОРЕТИЧНИХ ОСНОВ ТА РЕЗУЛЬТАТІВ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ГІДРОКАВІТАЦІЙНОГО І МАГНІТНОГО ВПЛИВУ НА СТАН ВОДИ.....	71
2.1 Аналіз досліджень будови та параметрів водневих зв'язків у рідині.....	71
2.2 Аналіз основ процесу гідрокавітаційного впливу на стан водного середовища.....	74
2.3 Аналіз основ процесу впливу магнітного поля на стан водного середовища	80
Висновки до розділу 2.....	87

РОЗДІЛ 3. ПРОГРАМА, МЕТОДИКА ТА ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ	
ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	89
3.1 Програма проведення експериментальних досліджень.....	89
3.2 Експериментальні установки.....	90
3.3 Методика експериментального дослідження впливу параметрів	
роботи приводу на виникнення кавітаційних процесів у вібраційній	
машині.	95
3.4 Методика досліджень та опис експериментального обладнання	98
для відео-фіксації процесів у камері пульсації вібраційної машини .....	
3.5 Методика проведення досліджень параметрів статичних	
кавітаторів за допомогою SolidWorks .....	99
3.6 Методика проведення багатofакторного експерименту для	
визначення кінематичних та конструктивних характеристик обладнання	
кавітаційно-магнітного оброблення .....	104
3.7 Методика та прилади проведення досліджень структурного стану	
та визначення показників водного середовища .....	112
3.8 Обробка експериментальних даних та оцінка точності	
отриманих результатів.....	114
РОЗДІЛ 4. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ	
ДОСЛІДЖЕНЬ ОБГРУНТУВАННЯ КОНСТРУКТИВНИХ ПАРАМЕТРІВ	
ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ВОДОПІДГОТОВКИ ТА МЕТОДИКА	
ПРОЕКТУВАННЯ.....	116
4.1 Побудова аналітичної моделі роботи вібраційної машини для з	
кавітаційної міни складу та властивостей водного середовища.....	116
4.2 Дослідження впливу конструктивних параметрів та режимів	
роботи приводу обладнання на отримання максимальної продуктивності	120
....	
4.3 Визначення параметрів приводу вібраційної машини для	
отримання оптимальної продуктивності .....	122

4.4 Результати моделювання та аналіз кавітаційних процесів у статичних кавітаторах для зміни складу та властивостей водного середовища.....	124
4.5 Дослідження процесів кавітації за допомогою швидкісної зйомки процесу проходження рідини крізь насадок.....	132
4.6 Експериментальні дослідження зміни рН водного середовища при кавітаційному та комплексному кавітаційно-магнітному впливі .....	134
4.7 Результати багатофакторного експериментального дослідження визначення зміни показника рН водного середовища при кавітаційно-магнітній обробці	136
4.8 Експериментальні дослідження зміни структури водного середовища та визначення показників при магнітно-кавітаційному обробленні.....	141
4.9 Техніко-функціональний аналіз та методологія проектування конструкції обладнання для зміни складу та властивостей водного середовища для котелень .....	145
4.9.1 Визначення енергетичних витрат запропонованого обладнання для зміни складу та властивостей водного середовища для котелень...	150
Висновки до розділу 4.....	151
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	153
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	156
ДОДАТОК А. СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА.....	173
ДОДАТОК Б. АКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ .....	175
ДОДАТОК В. ПАТЕНТ ТА СВІДОЦТВО ПРО РЕЄСТРАЦІЮ АВТОРСЬКОГО ПРАВА.....	177
ДОДАТОК Г. МОДЕЛЮВАННЯ КАВТАЦІЙНОГО ПРОЦЕСУ У НАСАДКАХ.....	184
...	

## ВСТУП

*Актуальність теми.* Термін експлуатації обладнання котелень значною мірою залежить від фізико-хімічних властивостей водного середовища. Низька якість водного середовища, разом із відсутністю належного контролю та хімічної регуляції у тепломережах, пароконденсатних системах і котлах, сприяє утворенню накипу, а також розвитку кисневої й вуглекислотної корозії. У результаті знижується теплопередача, відбувається засмічення обладнання та скорочується його строк служби. Це, у свою чергу, призводить до зниження рентабельності, зменшення потужності та збільшення частоти простоїв.

Для котельного обладнання особливу небезпеку становить водне середовище з високим вмістом розчинених забруднень, зокрема кальцієвих і магнієвих солей жорсткості [1]. Ці солі мають властивість осідати на внутрішніх поверхнях обладнання, формуючи шар накипу. Накопичення такого шару значно погіршує теплопровідність металевих поверхонь, що змушує підвищувати витрати електроенергії для досягнення необхідних показників ефективності котельні. На сьогодні єдиним дієвим методом запобігання утворенню накипу залишається попереднє очищення водного середовища від розчинених домішок. Водопідготовка для котелень передбачає очищення водного середовища ще до її подачі в систему. Цей процес включає використання кількох фільтраційних блоків, завдяки яким із водного середовища видаляються як розчинені мінеральні солі, так і механічні домішки.

Початковий етап водопідготовки зазвичай не становить складностей і передбачає застосування стандартних фізичних методів, таких як механічна фільтрація. Однак другий етап вимагає більш ретельного підходу, оскільки передбачає видалення розчинених мінеральних солей. Найбільш сучасним і високоефективним методом тонкої очистки води для котелень сьогодні є мембранні технології, зокрема зворотний осмос і ультрафільтрація. Загалом процес водопідготовки для котелень включає такі стадії: попереднє очищення від колоїдів, суспензій, заліза та органічних речовин; демінералізацію або

пом'якшення; видалення агресивних газів, таких як вуглекислий газ і кисень; а також кінцеву корекційну обробку. Частими помилками у водопідготовці котелень є ігнорування або неналежне виконання попереднього очищення; недостатньо ефективно налаштування пом'якшувальних установок; відсутність деаераторів або їх неправильна експлуатація; і фактична відсутність корекційної обробки води. Основними джерелами водопостачання для котелень є міські водопровідні системи, артезіанські свердловини та відкриті водойми.

Найчастіше водопровідна вода подається до системи водопідготовки для живлення тепломереж і котлів без початкового очищення. Якщо таке водне середовище хлорується, то перед використанням у процесах зворотного осмосу чи хімічного знесолювання її потрібно повністю дехлорувати, оскільки хлор руйнує аніонні смоли і мембрани зворотного осмосу. Для водного середовища з підземних джерел характерний підвищений вміст іонів заліза. Однак така проблема нерідко зустрічається й у водопровідній воді через корозію трубопроводних систем. Надмірна концентрація заліза сприяє утворенню осадів на мембранах, що потребує частішого кислотного промивання та скорочує термін їхньої експлуатації.

Отже підвищення якості та складу водного середовища, яке поступає з муніципального водопостачання, артезіанських свердловин і водойм, шляхом створення обладнання для попереднього оброблення гідрокавітацією та магнітним полем з метою пом'якшення та зміни її властивостей є актуальним науково-технічним завданням.

***Зв'язок роботи із науковими програмами, планами, темами.***

Дисертаційна робота виконувалась у відповідності до державних і науково-технічних програм за пріоритетними напрямками розвитку науки та техніки України та відповідає Закону України «Про внесення змін до деяких законів України щодо пріоритетних напрямів розвитку науки і техніки та інноваційної діяльності» від 13 січня 2024р. № 3534-IX.

Дисертаційна робота виконана у відповідності з планом кафедри технології машинобудування та тематикою держбюджетної теми

«Обґрунтування параметрів кавітаційно-магнітного обладнання для водопідготовки котелень» (№ державної реєстрації 0125U003531) у якості виконавця роботи, а також в рамках науково-дослідних робіт Хмельницького національного університету.

**Мета і задачі дисертаційного дослідження.** Мета дисертаційної роботи полягає у дослідженні та розробленні параметрів кавітаційно-магнітного обладнання для зміни складу та властивостей водного середовища для тепломереж, обґрунтування його конструктивних параметрів з визначенням продуктивності вібраційної машини та раціональних режимів роботи її приводу

Досягнення сформованої мети передбачає вирішення таких завдань:

- на основі аналізу джерел виникнення кавітаційних процесів у вібраційних машинах для зміни складу та властивостей водного середовища сформулювати достатнє уявлення про область досліджень і розробок для створення високоефективних технічних рішень;
- провести аналіз теоретичних та експериментальних досліджень кавітаційно-магнітного впливу на стан водного середовища та визначити напрямки досліджень;
- розробити фізичну модель поршневого кавітатора – вібраційної машини, що проявляє механічний вплив на рідинне середовище;
- побудувати математичну модель руху середовища у поршневому кавітаторі – вібраційній машині, для визначення її продуктивності при зміні максимального тиску у камері пульсації від режимів роботи приводу;
- сформулювати методика проведення експериментальних досліджень динамічних параметрів роботи поршневого кавітатора – вібраційної машини, залежність режимів приводу машини на процес очищення та зміни властивостей водного середовища;
- за допомогою відеофіксації дослідити формування кавітаційних процесів у камері пульсації поршневого кавітатора – вібраційної машини при застосуванні низькочастотних вібрацій;

- провести дослідження динамічних та конструктивних параметрів насадків статичного кавітатора методом моделювання кавітаційних процесів у SolidWorks Flow Simulation;

- провести експериментальні дослідження працездатності кавітаційно-магнітного обладнання з вібраційною машиною для очищення та зміни властивостей водного середовища;

- сформуванню прикладну методологію проектування обладнання, розробити рекомендації по його використанню та передати на виробництво матеріали експериментально-промислової моделі кавітаційно-магнітного обладнання очищення та зміни властивостей води для котелень.

**Об’єкт дослідження** – процес очищення та зміни властивостей водного середовища у кавітаційно-магнітному обладнанні та вібраційній машині.

**Предмет дослідження** – технологічні параметри та конструктивні залежності, динамічні режими роботи вібраційної машини, частотний діапазон режимів роботи вібраційного приводу, моделювання процесу кавітації у насадку статичного гідрокавітатора.

**Методи дослідження** – Формування аналітичних залежностей для встановлення параметрів вібраційної машини здійснювалось шляхом розв’язування системи диференційних рівнянь за умови, що перехідні процеси пройшли і рух встановлений.

Дослідження динаміки руху приводу вібраційної машини здійснювалися шляхом фізичного і математичного моделювання динамічної системи на основі положень теорії математичного моделювання і математичної статистики, теорії коливань, гідромеханіки із застосуванням обчислювальної техніки.

Експериментальні дослідження динамічних та кінематичних параметрів обладнання проведено на спеціально розроблених експериментальних установках із використанням вимірювання тензометричними засобами реєстрування параметрів та відеофіксації процесу виникнення кавітації у насадках.

Моделювання процесів протікання рідини крізь насадок з визначенням величини кавітаційного впливу різних за конструкцією насадків на зміну властивостей та складу води для дослідження було використано програмний продукт SolidWorks Flow Simulation.

Достовірність теоретичних положень роботи підтверджена результатами експериментальних досліджень характеристик обладнання і практикою працездатності використання виконаних розробок.

**Наукова новизна одержаних результатів** полягає у створенні, теоретичному обґрунтуванні та експериментальному дослідженні обладнання комплексного кавітаційно-магнітного впливу і вібраційної машини для очищення та зміни властивостей водного середовища з обґрунтуванням режимів роботи приводу, зокрема:

- вперше побудовано аналітичну модель для визначення максимального тиску у камері пульсації, що дало можливість визначати продуктивність вібраційної машини очищення та зміни властивостей водного середовища залежно від конструктивних параметрів та режимів роботи приводу.

- результати проведених досліджень із застосуванням швидкісної відеозйомки дозволили визначити реальні режими роботи вібраційної машини, що дозволило встановити оптимальну продуктивність вібраційної машини очищення та зміни властивостей води, яка знаходиться при таких параметрах роботи приводу та конструктивних співвідношеннях: частота коливань приводу 19-21 Гц при амплітуді  $A = 2$  мм; діаметрі поршня  $D_p = 100$  мм та діаметрі насадка 10 мм;

- у результаті проведених досліджень моделювання кавітаційних процесів у SolidWorks в різних, за конструктивними особливостями, статичних кавітаторів було отримано траєкторії руху шарів рідини при проходженні крізь кавітатори та картину розподілу величини тиску у різних точках кавітаторів, що дало можливість визначити оптимальну конструкцію статичного кавітатора – ступінчастого на вході та виході;

- одержав подальший розвиток метод оцінки зміни основних властивостей водного середовища та експериментально підтверджено, що магнітні і кавітаційні процеси у статичному кавітаторі та вібраційній машині покращують основні характеристики водного середовища, а саме: зростає рН, зменшується коефіцієнт поверхневого натягу, зменшується вміст розчинених солей.

***Практична цінність роботи:***

Результати виконаних теоретичних і експериментальних досліджень реалізовано у новому технічному рішенні обладнання і конструкції вібраційної машини, що захищено патентом на корисну модель України (№126495). При цьому найбільшу практичну цінність мають такі одержані результати:

- у створенні технологічного обладнання для підвищення якості та складу водного середовища, яке поступає з муніципального водопостачання, артезіанських свердловин і водойм, для попереднього оброблення гідрокавітацією у вібраційній машині із застосуванням додаткового статичного кавітатора та магнітного поля;

- вплив звукової гідрокавітації та змінного за напрямом магнітного поля на водне середовище зводиться до єдиного процесу – розщеплення молекул води у кавітаційній порожнині на активні радикали, що зменшує вміст солей жорсткості та накипоутворення, підвищує строк роботи блоку зворотного осмосу, збільшує термін його регенерації та експлуатації;

- результати аналітичних та експериментальних досліджень дозволили створити методологію проектування насадків статичних кавітаторів та визначати проектну продуктивність запропонованого обладнання.

Результати виконаних досліджень та окремі теоретичні положення прийнято до впровадження на КП «Тепловик» (м. Староконстянтнів) та на ПФКФ «ДЖІЛКА» (м. Хмельницький).

Наукові положення та практичні здобутки, отримані в дисертаційному дослідженні, впроваджені у навчальний процес кафедри технології машинобудування Хмельницького національного університету для підготовки

магістрів і докторів філософії у матеріалах методичних розробок при викладанні дисципліни «Інженерне моделювання та проектування технологічних процесів і конструкцій в машинобудуванні».

**Особистий внесок здобувача.** Всі основні наукові положення, результати, висновки і рекомендації дисертаційної роботи отримані автором особисто. Опрацьовано та проаналізовано літературні джерела, обґрунтовано доцільність проведення досліджень за темою дисертації.

Постановка задач досліджень, аналіз і трактування одержаних результатів виконані спільно з науковим керівником.

У спільних публікаціях автору належить: [1] – розроблення конструкції обладнання для попереднього оброблення гідрокавітацією у вібраційній машині із застосуванням додаткового статичного кавітатора та магнітного поля; [2] – побудова математичної моделі вібраційної машини з визначенням її продуктивності; [3] – розроблення конструкції блоку омагнічування та експериментальні дослідження впливу магнітного поля на властивості води; [4] – побудова моделей насадків у Solidworks та аналіз інтенсивності кавітаційних процесів з визначенням числа кавітації та експериментальне визначення показників зміни складу водопровідної води після оброблення в обладнанні; [5] – ідея розробки конструкції пристрою зміни властивостей та складу води для котелень та її опис; частка кожного з авторів є рівною; [6] – побудова математичної моделі вібраційної машини з визначенням її продуктивності; [7] – розроблення конструкції обладнання для попереднього оброблення гідрокавітацією у вібраційній машині із застосуванням додаткового статичного кавітатора та магнітного поля; [8] – запропоновано основні напрямки досліджень обладнання для попереднього оброблення гідрокавітацією у вібраційній машині із застосуванням додаткового статичного кавітатора та магнітного поля; [9] розроблення конструкції обладнання для попереднього оброблення гідрокавітацією у вібраційній машині із застосуванням додаткового статичного кавітатора та магнітного поля; [10] – математична моделі вібраційної машини з визначенням її продуктивності;

[11] – розроблення конструкції блоку омагнічування та експериментальні дослідження впливу магнітного поля на властивості води; [12] – побудова моделей насадків у SolidWorks Flow Simulation та аналіз інтенсивності кавітаційних процесів.

**Апробація результатів дисертації.** Основні наукові положення і результати досліджень доповідались та отримали позитивну оцінку на науково-технічних конференціях: 4th International Scientific and Practical Conference «*Diversity and Inclusion in Scientific Area*» (March 26-28, 2024). Warsaw, Poland; 10th International Scientific and Practical Conference «*X Ukrainian-Polish scientific dialogues*» Actual problem of modern science. (June 11-15, 2024). Khmelnytsky – Bydgoszcz; VIII Міжнародної науково-практична конференції «*Сучасні технології промислового комплексу*» (17-19 вересня 2024 року). Херсон-Хмельницький; II International scientific conference of students and young scientists «*Problems and innovations in the development of engineering, technologies and transport*». Collection of scientific works of the International Scientific Conference of Students and Young Scientists. (April 24-26, 2025) Khmelnytskyi; International Scientific and Practical Conference «*Current Issues and Prospects for the Development of Science, Education, Technology and Society in the Era of Digital Transformations*». Conference Proceedings (July 31, 2025). Austin, USA.

У повному обсязі дисертація доповідалась і отримала схвалення на науковому семінарі кафедри технології машинобудування Хмельницького національного університету.

**Публікації.** За матеріалами дисертації опубліковано 12 наукових праць у тому числі 4 статті у фахових виданнях України, що входять до переліку ДАК, 6 публікацій апробаційного характеру у матеріалах та тезах конференцій, одержано 1 патент України на корисну модель України, 1 свідоцтво на авторське право.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертація складається з анотації, змісту, вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Повний обсяг роботи становить 191 сторінку друкованого тексту, з

них анотація – на 18 стор., зміст – на 3 стор., основний текст – на 140 стор., список із 171 використаних джерел – на 17 стор., додатки – на 19 стор. Дисертація містить 81 рисунок та 2 таблиці.

# РОЗДІЛ 1

## АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ЗАСТОСУВАННЯ КАВІТАЦІЙНО-МАГНІТНОГО ВПЛИВУ У ТЕХНОЛОГІЯХ ТА ТЕХНІЦІ ДЛЯ ВОДОПІДГОТОВКИ

### 1.1 Сучасний стан в технології та обладнанні водопідготовки для застосування у тепломережах

Термін служби обладнання котелень здебільшого залежить від фізико-хімічних властивостей водного середовища. Неналежна якість водного середовища, відсутність достатнього контролю та необхідної хімічної корекції водного середовища на теплових мережах і в котлах призводять до утворення накипу, кисневої й вуглекислотної корозії. Унаслідок цього знижуються показники теплопередачі, відбувається забруднення обладнання, скорочення терміну його експлуатації, зменшення рентабельності й продуктивності, а також зростає частота аварійних зупинок.

Для обладнання котелень особливо небажаною є водне середовище з високим вмістом розчинених забруднювачів, зокрема, солей жорсткості, таких як кальцієві та магнієві сполуки. Солі жорсткості мають властивість осідати на внутрішніх поверхнях обладнання, утворюючи шар накипу. Накип, у свою чергу, знижує теплопровідність металів. Це змушує значно збільшувати енергоспоживання для досягнення необхідних результатів роботи котельного устаткування. Єдиним ефективним способом запобігти утворенню накипу є попереднє очищення водного середовища від розчинених домішок. Джерела водопостачання для котелень включають муніципальні системи водопостачання, артезіанські свердловини та природні водойми. У більшості випадків водопровідна вода надходить до систем водопідготовки для підживлення тепломереж і котлів без попереднього очищення. Якщо водне середовище містить хлор, то застосовуючи методи зворотного осмосу або хімічного знесолення, необхідно провести її повну дехлоризацію [1-4].

Це обумовлено тим, що хлор може руйнувати аніонітні смоли та мембрани у системах зворотноосмотичної фільтрації. Вода також може містити механічні та колоїдні забруднення значних розмірів. Частинками механічного походження здебільшого є пісок і глина, іноді зустрічаються частки іржі та накипу.

Склад цих забруднень варіюється залежно від джерела водного середовища — свердловини чи трубопроводу. Додатково до цього у водне середовище можуть надходити продукти корозії металевих труб та нагрівальних елементів. Перевищення допустимого рівня таких компонентів часто веде до поломок насосного обладнання, запірної арматури та регулювальних механізмів, забивання труб і скорочення їх внутрішнього діаметра.

Абразивні механічні домішки, такі як: пісок, продукти корозії трубопроводів, накіп теплообмінних поверхонь тощо (рис. 1.1). Наявність цих домішок може призвести до абразивного руйнування деталей трубопроводу (труб, арматури), зменшення прохідного перерізу, заклинювання регулюючих елементів.



Рис. 1.1. Корозійні утворення на трубах та накип

Розчинені у воді солі (карбонати та бікарбонати кальцію, магнію, хлориди кальцію), розчинені та нерозчинені гази, зважені речовини. Найбільшу загрозу нормального функціонування котлів несуть саме розчинені у воді

домішки, які, власне, і викликають утворення накипу на теплообмінних поверхнях котла та іржавіння металевих елементів трубопроводів та котлів.

Накип, який накопичується на теплообмінних поверхнях, спричиняє помітне збільшення споживання палива (або електроенергії, в залежності від конструкції котла). Наприклад, якщо товщина шару накипу сягає 1 мм, перевитрата палива становить 10 %, при 2 мм – 15 %, а при 10 мм – вже 48 % .

Що стосується розчинних домішок, то буде доцільно їх класифікувати на декілька категорій.

Солі жорсткості та інші малорозчинні солі.

Солі жорсткості, такі як карбонати кальцію та магнію, є основними складниками накипу. З підвищенням температури вони швидше випадають в осад, формуючи однорідну вапняну кірку. Слід зауважити, що такі речовини, як сульфат кальцію, силікати, сполуки мангану та міді, теж здатні кристалізуватися при температурах, що перевищують 100 °С. Наприклад, для сульфатів точка кристалізації досягається при 130 °С.

Наліт, що утворився, перешкоджає передачі тепла з поверхонь і призводить до зменшення потужності котла. Це, зі свого боку, спричиняє збільшення витрат на енергетичні ресурси та скорочує строк служби котлів. Навіть тонкий шар накипу заважає теплообміну та може викликати перегрів металу, що з часом призводить до утворення розривів і тріщин на поверхні труб.

Окрім того, існує низка домішок, які можуть сприяти процесам корозії. Важливо знати, що корозія буває двох типів: хімічна та електрохімічна.

Хімічна корозія передбачає руйнування матеріалу під впливом агресивних компонентів водного середовища, а електрохімічна виникає через утворення мікрогальванічних пар на металевих поверхнях, переважно з іонами заліза та мангану.

Розчинені агресивні гази.

Розчинені гази  $O_2$  та  $CO_2$ , будучи домішками, є головними каталізаторами корозійних процесів у котлах через свої окислювальні характеристики. Одним з

ключових факторів зменшення корозійної активності виступає рН водного середовища. Його необхідно узгоджувати з хімічними властивостями металу трубопроводів. Наприклад, алюміній демонструє стійкість при рН - 8,3 - 8,5, в той час як залізо може бути вразливим до корозії, якщо рН нижче 9.

Хлоридна корозія спричиняє руйнування захисної плівки, тому концентрацію хлоридів у водному середовищі регламентують в діапазоні 150-200 мг/л.

Піноутворювачі, зокрема фосфати, луги, мастила та нафтопродукти, сприяють формуванню піни. Ці компоненти частково використовуються для нейтралізації солей жорсткості та запобігання утворенню накипу. Для парових котлів ці домішки особливо небезпечні, оскільки призводять до забруднення пари та відкладення осаду на лопатках турбін, захоплених піною.

Варто пам'ятати, що зі зростанням температури нагріву водне середовище, яке подається в котел, має бути чистішим. До закритих систем пред'являються більш суворі вимоги.

Відсутність попередньої водопідготовки для котлів не тільки знижує ККД обладнання, але й скорочує термін його служби. Це призводить до значного збільшення витрат на опалення або нагрівання водного середовища для інших потреб, а також суттєво підвищує витрати на ремонт, заміну або обслуговування обладнання.

Коли не організована водопідготовка для котлів, то забруднення, які присутні в неочищеній воді, зумовлюють цілий ряд проблем:

1. Великі колоїдні та механічні забруднення, такі як накип, іржа, глина або пісок, швидко засмічують труби, зменшуючи їхній внутрішній діаметр. Це призводить до несправностей запірної арматури та насосного обладнання.

2. Солі жорсткості та інші важкорозчинні сполуки (карбонати, сульфати магнію і кальцію, силікати, а також сполуки міді та марганцю) осідають на металевих поверхнях обладнання у вигляді твердої кірки. Це знижує тепловіддачу системи, спричиняє втрату потужності котлів, підвищує витрати енергоресурсів і значно скорочує експлуатаційний ресурс техніки.

3. Розчинені у воді агресивні гази, такі як CO<sub>2</sub> та O<sub>2</sub>, що володіють окислювальними властивостями, сприяють запуску корозійних процесів усередині котлів.

4. Високий вміст хлоридів у неочищеній воді стає причиною хлоридної корозії.

5. Наявність піноутворювачів (нафтопродуктів, лугів або фосфатів) провокує утворення піни, яка містить забруднення. Ці домішки осідають на лопатях турбін котлів і спричиняють забруднення виробленої пари.

Схема підготовки водного середовища для котельного обладнання включає таке обладнання:

1. Фільтр для очищення водного середовища від механічних домішок із міського водопроводу. Він оберігає очисне обладнання і автоматичні системи від потрапляння механічних та крупнозернистих завислих частинок.

2. Установа для пом'якшення водного середовища, яка знижує рівень жорсткості до необхідних показників.

3. Бак для зберігання підживлювальної водного середовища. Забезпечує подачу водного середовища в систему під час регенерації пом'якшувальної установки у процесі підготовки водного середовища для котлів.

4. Дозувальна станція, яка за допомогою хімічних реагентів регулює рН робочого середовища. Це зменшує корозію і продовжує термін служби обладнання.

У процесі водопідготовки для котлів із водного середовища має видалятися максимальна кількість домішок. Зазвичай у воді, що подається з центрального водопроводу, водойми або свердловини, є багато мінералів і різних дрібнодисперсних частинок. Їх видалення для запобігання поломкам, аваріям та збільшення експлуатаційного терміну обладнання проводиться приблизно за такою схемою:

- попереднє (механічне) очищення водного середовища від великих включень (до 100 мкм) фільтрами;

- видалення заліза та зниження концентрації солей жорсткості за допомогою обладнання для пом'якшення безперервної та періодичної дії;
- максимальне видалення інших видів забруднень та газів зворотним осмосом.

Методи водопідготовки для котлів і види обладнання, що використовується, визначаються залежно від складу вхідного водного середовища після його аналізу. Наприклад, для первинного очищення водного середовища, що подається зі свердловини, можуть знадобитися такі фільтри:

- механічний;
- фільтр для знезалізнення;
- установка зворотного осмосу або модуль для пом'якшення водного середовища іонним обміном.

Існують як обов'язкові, так і додаткові етапи водопідготовки для котлів промислових підприємств. До обов'язкових належать:

1. Первинне механічне чищення. На цьому етапі з водного середовища видаляються великі частки, окалина, каміння, мул, пісок, які здатні пошкодити різноманітні елементи інших фільтрів, систем та опалювального устаткування.

2. Зм'якшення та максимально чисте очищення водного середовища на молекулярному рівні за допомогою систем зворотного осмосу та фільтрів з іонообмінними смолами.

Звичайна система водопідготовки передбачає декілька стадій.

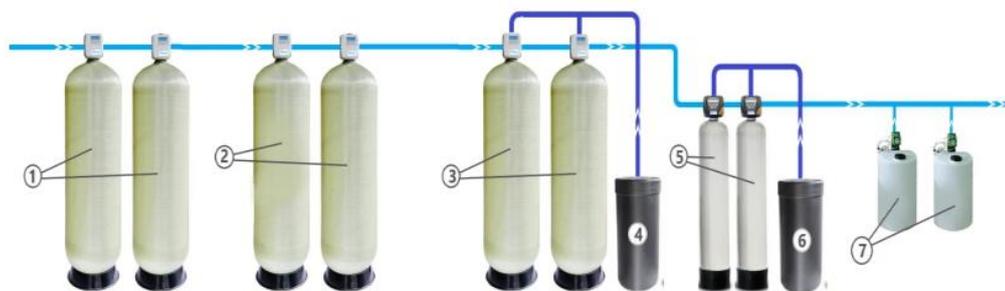


Рис. 1.2. Схема системи звичайної водопідготовки

1. Механічне очищення для зниження каламутності водного середовища (1) є ключовим етапом у будь-якій системі водопідготовки. Зазвичай для цього використовують засипні фільтри з кварцовим піском, які ефективно затримують великі частинки й осади.

2. Знезалізнення або деманганація здійснюється для видалення домішок заліза та мангану, оскільки ці елементи швидко окиснюються під впливом високих температур, утворюючи осади і суспензії, що можуть пришвидшувати корозійні процеси. Також цей етап може включати очищення водного середовища від органічних забруднень за допомогою вугільних фільтрів (2). Цей процес може бути пропущеним, якщо вихідне воднесередовище вже має задовільну якість.

3. Двоступеневе пом'якшення водного середовища на іонообмінних смолах (3,5) спрямоване на зменшення жорсткості. У ході цього процесу катіони солей твердості, такі як кальцій і магній, замінюються на катіони натрію, які не утворюють осадів та накипу. Коли ресурс іонообмінної смоли вичерпується, її відновлення відбувається шляхом регенерації за допомогою розчину хлориду натрію з бака-солерозчинника (4, 6).

4. Дозування реагентів (7) включає введення спеціальних хімічних речовин, таких як регулятори рівня рН, антискаланта та інших засобів для оптимізації процесу водопідготовки.

Наведена схема гарантує якість водного середовища, яке повністю відповідає вимогам водогрійного котла. До недоліків цього підходу також слід віднести велику кількість громіздкого обладнання, яке займає значні площі. Існує два основних варіанти реалізації: двоступеневий іонний обмін із певними модифікаціями або технологія зворотного осмосу. Обидва методи успішно застосовуються як для водогрійних, так і для парових котлів.

Іонообмінні технології.

Компанія Ecosoft успішно втілила багато проєктів із модернізованими схемами. При впровадженні таких рішень для застарілих котелень часто частково використовують обладнання, що вже було встановлене раніше.

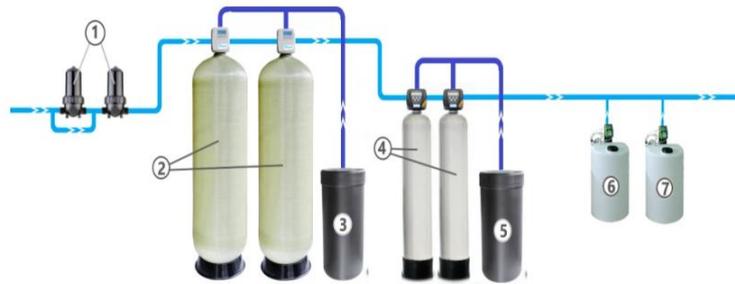


Рис. 1.3. Устаткування водопідготовки компанії Ecosoft

На першому етапі здійснюється встановлення фільтрів для механічного очищення, вибір яких – дискові чи засипні – залежить від якості вихідної води. Дискові фільтри мають такі переваги:

- відсутність потреби у витратах на промивку та заміну фільтруючого матеріалу, оскільки їх очищення відбувається вручну або автоматично, з мінімальним використанням вихідного водного середовища;
- компактні розміри, що дозволяють більш ефективно використовувати виробничий простір.

На наступному етапі, залежно від властивостей водного середовища, застосовуються одна з двох систем:

- система пом'якшення (Na-катіонування) для видалення солей жорсткості. Вона є доречною для вихідного водного середовища високої якості, якщо воно практично не має кольоровості та не містить заліза і марганцю;
- система комплексного очищення на основі матеріалу Ecomix, яка одночасно усуває залізо, марганець, пом'якшує водне середовище та знижує його кольоровість.

Регенерація фільтрів у цих випадках здійснюється за допомогою розчину хлориду натрію, який подається з сольового бака. Роботу системи налаштовують так, щоб під час регенерації одного фільтра інші продовжували функціонувати, забезпечуючи безперервне очищення водного середовища.

Наступний етап передбачає вторинне пом'якшення водного середовища також методом Na-катіонування. Як і раніше, для регенерації використовується сольовий розчин із бака, забезпечуючи безперервність роботи обладнання.

На завершальному етапі до очищеного водного середовища додаються спеціальні реагенти для покращення його властивостей:

- рН-регулятори, здебільшого лужні компоненти, які підвищують рівень рН до потрібного рівня;
- антискаланти, що запобігають утворенню відкладень накипу;
- реагенти для зв'язування кисню;
- піногасники.

У разі високої якості вихідного водного середовища процес пом'якшення може бути обмежений лише одним етапом.

Одним із найбільш ефективних способів підготовки водного середовища для котлів є зворотний осмос. Завдяки багатоступеневій системі очищення ця технологія дозволяє практично повністю демінералізувати водне середовище, що суттєво підвищує енергоефективність роботи системи.

Розглянемо принцип роботи основних елементів обладнання для підготовки водного середовища більш детально. Процес очищення водного середовища ґрунтується на іонному обміні, який здійснюється за допомогою іоннообмінних фільтрів. У ході Na-катіонування іони жорсткості  $Mg^{2+}$  і  $Ca^{2+}$  заміщуються іонами  $Na^+$  відповідно до концентраційних констант обміну. Це дозволяє знизити жорсткість водного середовища, що є одним із ключових параметрів її технічної якості [160].

Na-катіонітні фільтри найчастіше використовують виключно для зменшення жорсткості водного середовища. Якщо у вихідному водному середовищі всі катіонні сполуки представлені у формі Na, то після очищення катіони жорсткості у відфільтрованій воді не виявляються. Їхня поява свідчить про те, що концентраційний фронт катіонів жорсткості досяг нижніх шарів катіоніту. Як правило, експлуатацію Na-катіонітного фільтра припиняють, коли рівень катіонів жорсткості у фільтраті досягає встановленого контрольного значення.

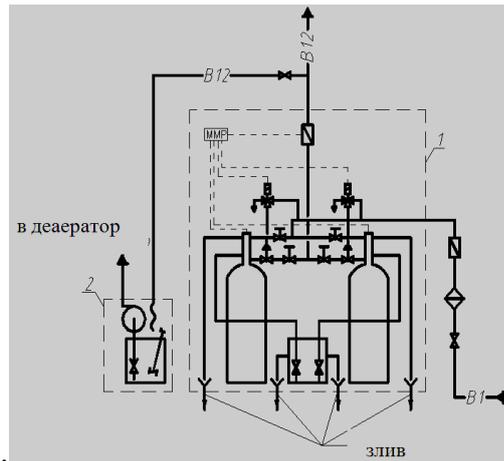


Рис. 1.4. Принципова схема водопідготовки включає наступні елементи:  
 В1 – сира вода, що постачається з водопроводу, В12 – хімічно очищена вода. У процесі беруть участь такі установки: 1 – обладнання для пом'якшення води, 2 – дозуюча установка для введення хімічних реагентів

Під час тривалої експлуатації іоніт із низькою осмотичною міцністю поступово дробиться на дрібні частинки. Ці частинки потрапляють у проміжки між зернами фільтруючого матеріалу, що зменшує пористість шару та збільшує гідравлічний опір.

Після завершення робочої фази виконується розпушування шару, яке не тільки надає йому пухку структуру, але й усуває подрібнені частинки.

Під час розпушування зерна іоніту піднімаються потоком води, переміщуються верх та осідають униз. Це забезпечує перемішування верхніх і нижніх часток, що сприяє рівномірному розподілу іонів різних форм по висоті шару.

Для відновлення функцій іоніту проводиться регенерація методом Накатіонування, під час якої використовують розчин хлориду натрію. Регенерація здійснюється пропусканням розчину через розпушений шар відпрацьованого іоніту. Основними способами проведення процесу є прямоточна та протитечійна регенерація: у першому випадку розчин рухається в тому ж напрямку, що й очищене водне середовище, а в другому – у зворотному.

Для максимально ефективного очищення важливо повністю відновлювати властивості іоніту. Це досягається шляхом стабільного пропускання регенеруючого розчину через його шар. Фаза регенерації триває значно менше часу, ніж експлуатаційна; чим більша ця різниця, тим краще оптимізовано процес. Швидкість регенерації підвищується за використання концентрованих регенераційних розчинів.

Після закінчення регенерації проводиться очищення іонізатора від залишків розчину та продуктів регенерації. Очищення починається після проходження рідини через фільтр, оскільки певна кількість залишків затримується в його шарах.

Видалення таких залишків здійснюється за допомогою нижньої дренажної системи. Спершу у фільтруючий шар подається промивна вода знизу вгору, а потім її напрям змінюється зверху вниз, утворюючи так звану водяну подушку. На наступному етапі вода протікає зі швидкістю, подібною до регенераційного потоку.

Деаерація води призначена для видалення агресивних газів, таких як кисень (O<sub>2</sub>) чи вуглекислий газ (CO<sub>2</sub>), які провокують корозію металевих поверхонь. У порівнянні з вакуумним методом деаерації хімічний спосіб є дешевшим і простішим [160].

Його часто використовують для підготовки живильної води для котлів і теплових мереж. Хімічна деаерація передбачає додавання сульфїту натрію до води, який вступає у реакцію з розчиненим киснем.



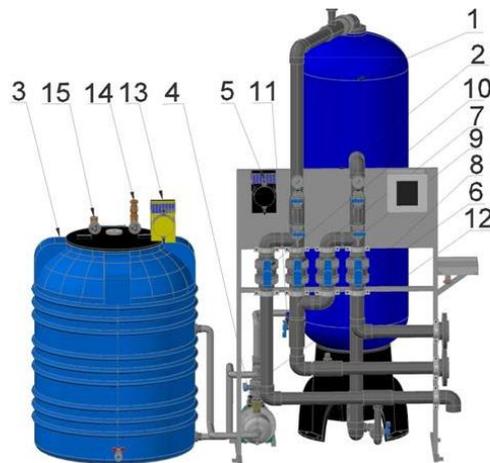


Рис. 1.5. Загальний вигляд дозуючої станції: 1 – корпус фільтра; 2 – рама; 3 – бак для розчину сульфіту натрію; 4 – циркуляційний насос; 5 – насос-дозатор стабілізаційного розчину; 6, 12 – кульові крани DN 25; 7, 8, 9, 10 – кульові крани DN 40; 11 – лічильник холодної води; 13 – насос-дозатор розчину сульфіту натрію; 14, 15 – кульові крани DN 15.

На основі аналізу останніх досліджень запропоновано впровадити попередню обробку водного середовища методом гідрокавітації гідрокавітацією та змінним за напрямом магнітним полем для покращення її якості та складу. Це рішення стосується водного середовища, що постачається з муніципального водопостачання, артезіанських свердловин та природних водойм, і має застосовуватися перед етапами фільтрації та деаерації.

## 1.2 Аналіз застосування кавітаційних процесів у різних технологіях

За останні роки технологія гідродинамічної кавітації (ГК) привертає інтерес наукової спільноти до очищення води. У ГК мікронанобульбашки водяної пари при низькому тиску утворюються шляхом пропускання води через пластини з отворами та трубки Вентурі [5]. Утворення, ріст і бурхливе згорання бульбашок призводить до вивільнення великої кількості енергетичних «гарячих точок», ударних хвиль і мікроструменів, які можуть розщепити або розщепити органічні речовини, присутні в рідині. Крім того,

високореактивні гідроксильні радикали ( $\text{OH}\cdot$ ), що утворюються в ГК, можуть розкласти широкий спектр стійких забруднюючих речовин [6]. Ефективність ГК підвищується, коли вона поєднується з іншими процесами, наприклад, аерацією, оксигенацією та фентоном [7-9], ультразвуком [10], УФ [11], озоном [12] і плазмою [13]. Деякі переваги ГК – це простота конструкції, низька вартість, висока енергоефективність і легка масштабованість [8,14,15]. Очищення стічних вод за допомогою мембранної фільтрації здійснюється в основному на третинному етапі, і використання керамічних мембран (КМ) в останні роки зросло. Деякі переваги КМ щодо полімерних мембран: стійкість до забруднення, робота при високих температурах і можливість більш тривалого циклу фільтрації [16]; однак вони дорожчі. Крім того, мембрани дозволяють ефективно видаляти загальну кількість завислих речовин, наприклад, як повідомляється для стічних вод бійні з використанням неорганічної мембрани з розміром пор 0,13 мкм [17]. Мембранна технологія також може бути інтегрована в біологічні процеси для одночасного культивування мікробдоростей і очищення стічних вод у занурених мембранних фотобіореакторах [18,19].

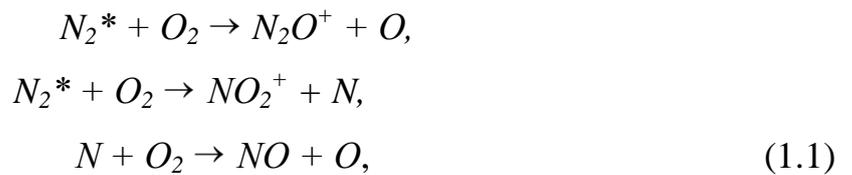
Одним із визнаних багатообіцяючих нетрадиційних методів є гідродинамічна кавітація, яка була пов'язана виключно з інженерними проблемами, такими як шум, вібрація та кавітаційна ерозія (індикатори зниження ефективності машини). Проте в останнє десятиліття ГК була широко визнана як можливий метод очищення стічних вод завдяки ефективному руйнуванню складних органічних хімічних речовин, нехімічній природі, хорошій сумісності з іншими прогресивними процесами окислення, простоті експлуатації, створенню необхідної інтенсивності кавітації. [20-27].

За останні роки з'явилося багато досліджень застосування кавітаційних процесів та обладнання для проведення звукохімічних реакцій у воді [28-31].

Вплив кавітаційного звукового поля на матеріали, що потрапляють в кавітаційну порожнину, є прямим, причому активні гази  $\text{O}_2$  і  $\text{H}_2$  діють на реакції радикального перетворення, а  $\text{N}_2$  – на газову звукохімію, кінцевим результатом

якої є фіксація азоту. Коли кавітаційна бульбашка лопається, в розчин переходять іони  $H^+$ ,  $OH^-$ , низькоенергетичні електрони, що утворюються в газовій фазі при розщепленні молекули  $H_2O$ , а також метастабільні збуджені молекули  $H_2O$ .

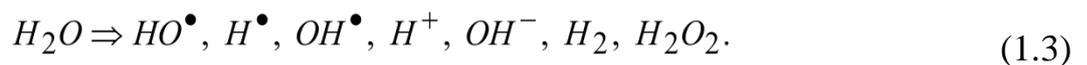
Газофазні реакції за участю азоту в основному зумовлені реакцією збуджених молекул  $N_2^*$ . Тому реакції за участю іонів та атомів азоту є найбільш важливими у випадку окислення:



а у випадку відновлення:



В цілому сутність процесу полягає в тому, що вплив гідрокавітації на водні розчини зводиться до єдиного процесу – розщепленню молекул води у кавітаційній порожнині на активні радикали:



Значний вплив на зміну властивостей вод та її склад дає циклічна гідрокавітація у вібраційних машинах при зворотно-поступальному русі рідини крізь насадок [28-29].

### **1.3 Аналіз конструкцій кавітаційного обладнання впливу на водні середовища**

За останній період з'явився новий напрям створення гідродинамічного обладнання для обробки води кавітацією, яке забезпечує надання воді нових властивостей і її знезараження. Розглянемо конструкції та принцип роботи деяких пристроїв та машин для знезаражування водних потоків.

Як приклад конструкції кавітаційного обладнання наведено схему гідродинамічного кавітаційного реактора на рис. 1.6 [33,166].

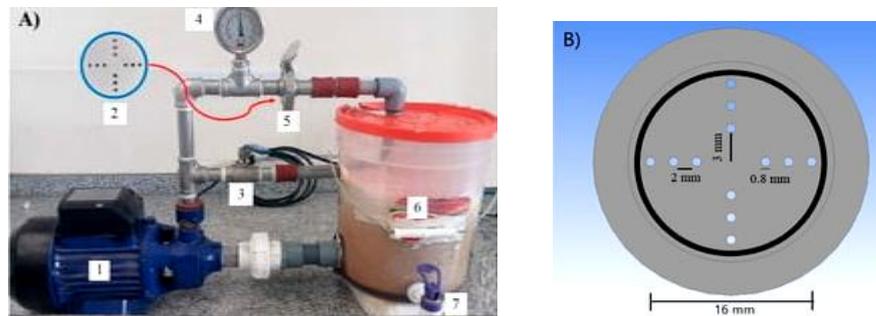


Рис. 1.6. Схема експериментальної установки гідродинамічного кавітаційного реактора (А) і кавітаційного пристрою – діафрагми (В). (А): 1– насос; 2 – кавітаційний пристрій (діафрагма); 3 – клапан в байпасній лінії; 4 – манометр; 5 – зона кавітації; 6 – рециркуляційний бак; 7 – точка відбору води

Гідродинамічний кавітаційний реактор, відомий серед пристроїв для обробки рідин, належить до обладнання, яке може використовуватися як хімічний реактор, де роль каталізатора виконує кавітація.

У конструкціях таких реакторів між вхідним і вихідним отворами встановлюють штучну перешкоду, яка зменшує переріз потоку. Це спричиняє збільшення швидкості рідини в зоні обтікання цієї перешкоди, а також створює перепад тиску, за рахунок якого формується кавітаційний потік. Проте ефективність роботи таких реакторів залишається незначною, оскільки генерація кавітації обмежується лише локальною ділянкою рідини, де утворюється ядро кавітаційного струменя.

Щоб підвищити продуктивність хімічних реакцій, які каталізуються кавітацією, необхідно забезпечити інтенсивне перемішування рідини та багаторазову її обробку кавітаційним впливом. Для цього використовуються роторні пристрої, відомі як гідродинамічні сирени.

Деякі сучасні типи реакторів створюють кавітаційні потоки по всьому об'єму рідини, однак у них потужність гідродинамічних коливань обмежується максимальною окружною швидкістю ротора, яка становить 25 м/с. Перевищення цього значення призводить до значного зростання кавітаційної ерозії контактних поверхонь, що в результаті суттєво скорочує термін служби ротора та статора.

Ефективність гідродинамічних коливань залежить також від кута нахилу профілю виступів на диску. Якщо кут менший за  $25^\circ$ , тоді потужність коливань та продуктивність хімічних процесів зменшуються. У той же час нахил понад  $40^\circ$  призводить до різкого збільшення рівня ерозійного зносу ротора й статора, що негативно впливає на довговічність обладнання.

На рис. 1.7 представлено загальний вигляд гідродинамічного кавітаційного реактора в розрізі; рис. 1.8 демонструє перетин А-А; на рис. 1.9 зображено перетини В-В та С-С, що відповідають даним зображенням із рис.1.7.

Гідродинамічний кавітаційний реактор працює наступним чином. Рідина, що обробляється, через вхідний отвір 2 потрапляє в простір між ротором 4 і статором 5.

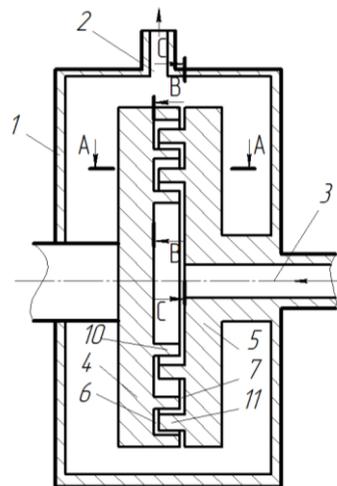


Рис. 1.7 Схема загального вигляду гідродинамічного кавітаційного реактора складається з таких основних елементів: 1 – корпус, 2 – вхідний отвір, 3 – вхідний отвір, 4 – ротор, 5 – статор, 6 – пази ротора, 7 – пази статора, 10 і 11 – виступи

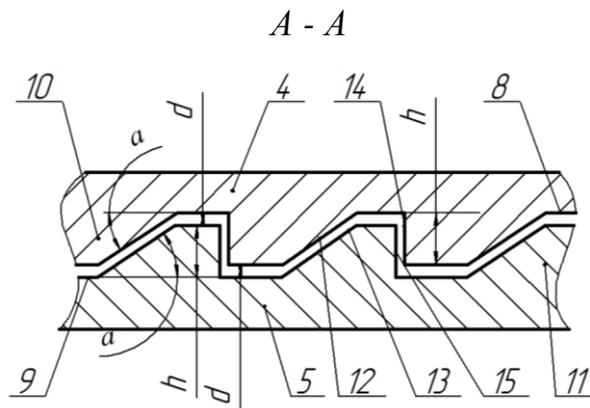


Рис.1.8 Схема перетину канавок ротора та статора по лінії А-А:

8,9 – канавки; 12,13 – фаски; 14,15 – кромки

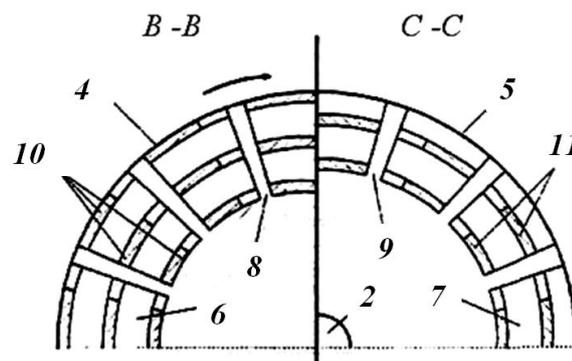


Рис. 1.9 Схема перетинів ротора та статора *B-B* та *C-C* містить такі елементи:  
2 – вхідний отвір; 4 – ротор; 5 – статор; 6 – пази ротора; 7 – пази статора; 8,9 – канавки; 10,11 – виступи

Під час обертання ротора, коли його радіальні канавки збігаються з радіальними канавками статора, утворюється прохід для переміщення рідини.

У цей момент певна кількість рідини просувається від центральної частини дисків до їхньої периферії.

Виступи ротора захоплюють рідину і проштовхують її через власні пази та пази на статорі. Кавітаційний потік формується за краєм виступу ротора і перед краєм виступу статора.

Коли ж канавки ротора перекриваються виступами статора, а канавки статора – виступами ротора, переріз каналу зменшується.

Це змушує рідину змінювати напрямок і подорожувати поперечно, огинаючи виступи через зазор між дисками.

Завдяки таким змінам напрямку течії в просторі між ротором і статором відбувається інтенсивне перемішування рідини.

Під час обертання ротора рідина спрямовується до його виступів та виступів статора завдяки скошеним граням, розташованим відповідно на кожному елементі.

Відрив потоку трапляється на краях цих виступів, що утворює розрідження, яке викликає формування кавітаційних потоків. Зони кавітації, що виникають у таких місцях, стискаються до центра пазів завдяки рідині, яка надходить у розріджену область, спрямовуючи рух струменя до наступного виступу.

Скошені грані з боку натікання рідини забезпечують поступове підвищення тиску після відриву кавітаційного струменя.

Як тільки тиск перевищує критичну межу, струмінь швидко розсіюється, переходячи в ламінарний стан. Такий процес захищає поверхні реактора від пошкоджень.

Після проходження простору між дисками рідина виводиться з реактора через вихідний отвір, а обертання ротора забезпечується електродвигуном.

Принцип роботи відцентрового насоса гарантує надходження рідини через вхідний отвір та її видалення через вихідний.

Відомі конструкції роторно-імпульсних апаратів РІА [35-37].

При проходженні робочої рідкої системи, що знаходиться в системі під тиском крізь отвори в роторі, що обертається, і статорі відбувається процес кавітації (рис. 1.10).

При чергуванні етапів поєднання та розбіжності профільних отворів у просторі між ротором і статором чергуються етапи низького та підвищеного

тиску. Внаслідок цього перепад тиску генерує процес утворення кавітаційних порожнин.

Є конструкції, в яких отвори на роторі і статорі замінені виточеними каналами на торцевих поверхнях дисків.

Виражений ефект при роботі РІА – гомогенізація, що часто застосовується для обробки емульсій або суспензій.

Недоліком таких конструкцій можна назвати недостатній тиск на вході в систему, у зв'язку з чим у ряді випадків спостерігається механічне подрібнення (перетирання) суспензій та емульсій.

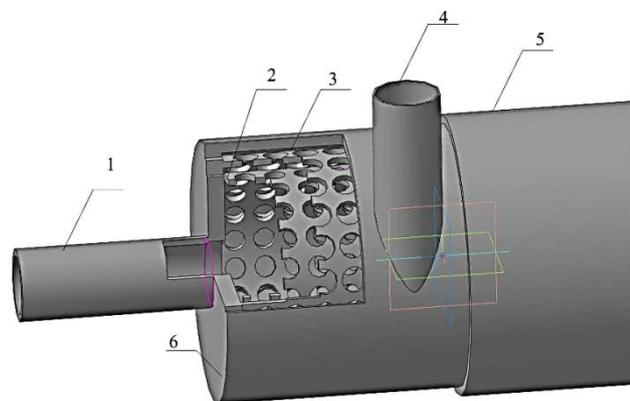


Рис. 1.10. Схема роторно-імпульсного апарату 1 – всмоктувальний патрубок; 2 – ротор апарату; 3 – перфорований статор; 4 – вихідний патрубок; 5 – двигун установки; 6 – корпус апарату

Другою групою кавітаторів є статичні проточні кавітатори, які застосовують у проточних лініях і дозволяють провести обробку за один цикл обробки.

Відомі протічні струменеві кавітаційні пристрої [38], схему якого показано на рис.1.11.

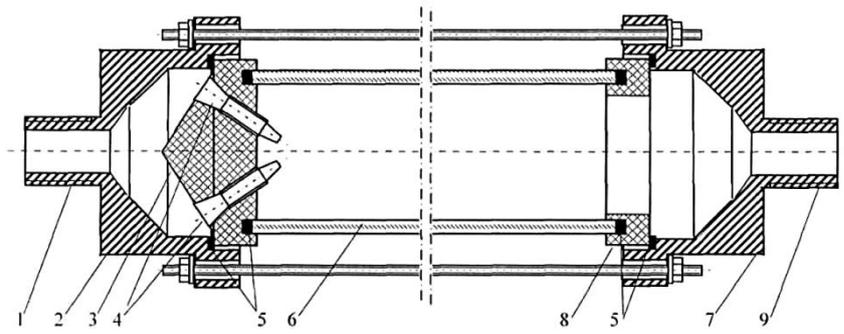


Рис. 1.11. Схема гідродинамічного струминного кавітатора: 1 – патрубок подачі води; 2 – обойма; 3 – вставка; 4 – сопло; 5 – ущільнення; 6 – корпус; 7 – обойма; 8 - вставка; 9 - патрубок відведення води

Гідродинамічний струминний кавітатор функціонує таким чином. Рідинно-фазове середовище, яке підлягає кавітаційній обробці, подається під тиском через вхідний патрубок 1 у проміжок між обоймою 2 та вставкою 3. Потік розподіляється однорідно по перерізу цього простору завдяки конічній формі вставки 3 і потрапляє до сопел 4. На виході кожного сопла генерується струмінь з високою кінетичною енергією. У момент зіткнення струменів, що відбувається на певній відстані від сопел 4, у рідинному середовищі утворюється кавітація, створюючи зону кавітації всередині корпуса 6.

Завдяки руху потоку ця зона поширюється вздовж осі кавітатора і охоплює весь простір корпуса 6. У межах цієї кавітаційної зони компоненти рідинного середовища інтенсивно обробляються, сприяючи прискоренню хімічних реакцій, процесів масо- і теплоперенесення, генерації теплової енергії, а також очищенню стічних вод.

Після завершення процесу обробки у полі кавітації рідинне середовище виводиться з кавітатора через вихідний патрубок 9.

Відомий також вібраційний електромагнітний кавітатор резонансної дії, який застосовується для викликання кавітації у рідинах. Цей прилад належить до обладнання, що використовується у кавітаційних хіміко-технологічних процесах, і може використовуватися для очищення води, знезараження питної

води чи стоків від хімічних, харчових або переробних підприємств, включаючи усунення біологічних забруднень.

Даний кавітатор відноситься до категорії приладів фізико-хімічного методу магнітного та кавітаційного ініціювання та активації окисно-відновлювальних реакцій у рідинах енергією сплеску бульбашок у полі магнітного впливу.

Схематичне зображення вібраційного електромагнітного кавітатора резонансної дії представлено на рис. 1.12 із фрагментом поперечного перерізу А-А. До складу цього кавітатора входять завантажувальна камера 6, робоча камера 9 та відвідна камера 14, які з'єднані між собою за допомогою гнучких гофрів 8 і 12, що забезпечує можливість їх відносного переміщення гофрів 8 і 12, що забезпечує можливість їх відносного переміщення.

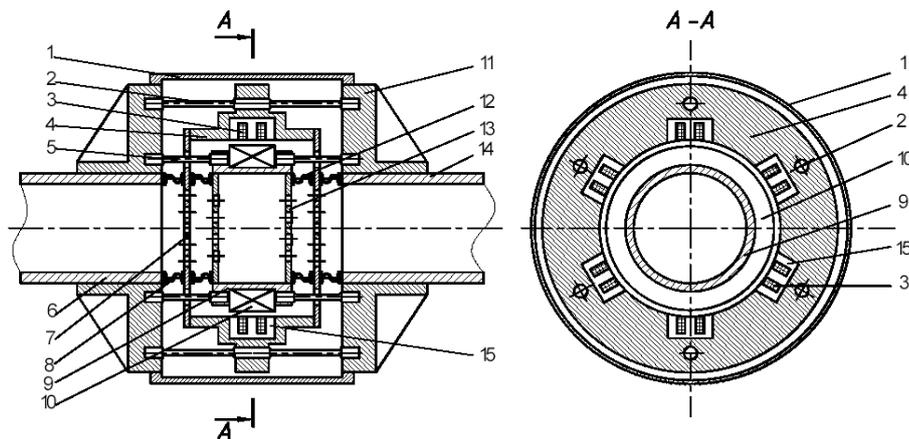


Рис. 1.12. Принципова схема вібраційного електромагнітного кавітатора резонансної дії для магнітно-кавітаційного оброблення рідин: 1 – корпус; 2,5 – пружні стержні; 3 – обмотка; 4 – корпус статора; 6 – труба; 7,13 – деки; 8,12 – пружні елементи; 9 – камера; 10 – якір; 11 – реактивна маса; 14 – труба; 15 – котушки електромагнітів

На робочій камері закріплений кільцевий якір, виготовлений із листового заліза. Камера та якір з'єднані через циліндричні пружні стержні із закріпленими на трубах завантажувальної та відвідної камер реактивними

масами. Корпус статора кріпиться до реактивних мас за допомогою тих самих пружних стержнів, співвісно з якорем. У статорі рівномірно розташовані котушки електромагнітів з обмотками. Обмотки шести електромагнітів, рівномірно розміщених по колу, з'єднані так, щоб утворити три двотактних вібробудники зі зсувом фаз на  $120^\circ$ .

Статор із котушками та обмотками, разом із якорем і робочою камерою, формують кільцевий електромагнітний вібробудник.

У поєднанні із пружними стержнями, закріпленими на реактивній масі, система створює тримасову резонансну коливальну конструкцію. Перша коливальна маса складається з робочої камери та прикріпленого до неї якоря, друга – зі статора з котушками й обмотками, а третя – з реактивної маси та масивних труб для завантажувальної й відвідної камер. До якоря і статора жорстко закріплені деки-збурювачі кавітації з рівномірно розташованими отворами по всій площині, призначеними для протікання рідини, що обробляється. Ці пари дек, прикріплені до якоря й статора, симетрично розташовані біля входу та виходу робочої камери. На рис. 1.13, *a* – відображено фрагмент поперечного перерізу *A-A* кавітатора із нашаруванням силових ліній магнітного поля, схему формування кавітаційного поля насадкою-форсункою при перетіканні крізь неї рідини (*b*), фрагмент деки-збурювача кавітації із насадкою-форсункою (*в*).

Для інтенсифікації збурення кавітаційних каверн при перетіканні крізь деки 7 та 13 оброблюваної рідини на отвори дек напресовано насадки-форсунки 16 із циліндричною зовнішньою  $\alpha$  та сферичною внутрішньою  $\beta$  поверхнями (рис. 1.13 *в*). Діаметр циліндричної поверхні  $D = 2A$  та радіус сферичної внутрішньої поверхні  $R = 2A$  рівні розмаху, тобто подвійному значенню амплітуди  $A$  коливань деки.

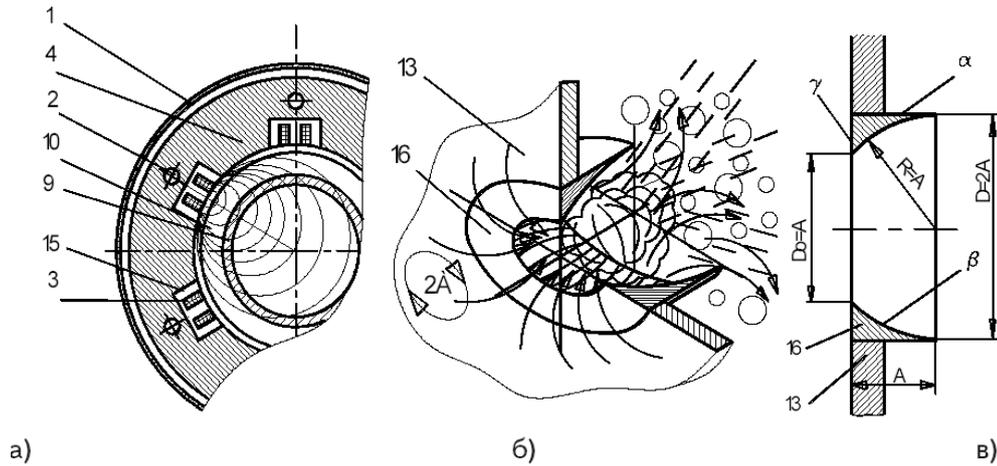


Рис. 1.13. Схеми фізичного впливу на оброблювану рідину передбачають використання таких механізмів: а) вплив магнітного поля; б) кавітаційного поля; в) співвідношення розмірів насадки та форсунки. Основні елементи конструкції: 1 – корпус; 3 – обмотка; 4 – корпус статора; 9 – камера; 10 – яркір; 11 – реактивна маса; 13 – дека; 16 – насадок

У конструкції насадки-форсунки 16 передбачено внутрішню сферичну поверхню, яка на перетині з торцевою площиною утворює отвір для перетікання рідини, діаметр якого дорівнює  $D_0 = A$ . Отвір зорієнтовано в напрямку, протилежному руху потоку оброблюваної рідини. Відстань між сусідніми отворами в деках відповідає подвійному значенню амплітуди коливань, тобто  $k = 4A$ . Для запобігання проникненню сторонніх предметів до коливальних систем захисний кожух 1 встановлено над електромагнітним вібратором. Функціонування вібраційного електромагнітного пристрою для магнітно-кавітаційної обробки рідин відбувається таким чином: через трубу завантажувальної камери 6 оброблювана рідина надходить у робочу камеру 9 під незначним тиском або самопливом. Паралельно на обмотки 3 котушок і електромагнітів послідовно, у напрямку за або проти годинникової стрілки, подається напруга.

Електромагніти по чергові притягують до себе робочу камеру, наповнену рідиною, що викликає прогин пружних циліндричних стержнів 2 та 5 назустріч один одному.

При цьому робота електромагнітів супроводжується коливаннями якоря 10 з деками 7 і 13. Змінні магнітні потоки, створювані статорами 3 з їхніми обмотками 4, мають значний градієнт індукції і взаємно перетинають заповнену робочу камеру, забезпечуючи безперервну магнітну обробку рідини.

Завдяки симетричному розташуванню дек – збурювачів кавітації – рідина проходить через них двічі, піддаючись кавітаційній обробці, а магнітній – одноразово.

Однак такі установки мають певний недолік: час перебування рідини у зоні виникнення кавітації залишається недостатньо тривалим для ефективного впливу.

#### **1.4 Аналіз особливостей конструкцій обладнання впливу магнітного поля на водні середовища**

У численних статтях протягом кількох десятиліть повідомлялося, що магнітне поле (МП) може змінювати фізико-хімічні властивості води [40-47]. Коли вода проходить через МП, вона стає намагніченою водою (НВ). Автори [41] досліджували оптичні властивості води між двома сильними магнітами та виявили, що властивість інфрачервоного поглинання МВ змінюється. Дослідники [42, 43] дійшли висновку, що МП може підвищити провідність та зменшити поверхневий натяг води. Автори [44] досліджували вплив статичного МП на рідку воду за допомогою експериментів з тертям, результати показали, що коефіцієнт тертя був меншим у МП.

Вчені у своїх роботах [45 - 47] вивчали вплив МП на водневі зв'язки води та обговорювали механізм намагнічування на основі моделювання молекулярної динаміки, експериментальних та теоретичних моделей.

Дослідженнями [48-50] показано вплив змінного магнітного поля на проходження різних хімічних реакцій та зміну властивостей води і її складу.

На теперішній час розроблено інноваційні способи та конструкції для магнітної обробки рідини, реструктуризації та очищення рідини [51-67].

Українські дослідники продемонстрували у своїх роботах, що магнітна обробка води може ефективно сприяти насиченню її іонами кальцію та карбонату. Дія магнітного поля допомагає роздрібнити агрегати феромагнітних частинок на дрібніші фрагменти або окремі частки, вивільняючи їх з водної оболонки та сприяючи утворенню газових мікробульбашок.

Одним із відомих прикладів таких технологій є чотириступенева магнітно-кавітаційна система очищення робочої рідини, представлена на рис. 1.14 у джерелі [53].

На першому етапі проводиться підготовка води за допомогою генератора ультразвукових коливань (ГУК). Другий етап включає обробку води в поздовжньому аксіально-симетричному магнітному полі, яку забезпечує блок знакозмінного поля (БЗМ). Третій етап передбачає використання поперечного аксіально-симетричного магнітного поля за допомогою магнітної аксіально-симетричної системи (МАКС). Четверта ступінь забезпечує адсорбційну фільтрацію потоку.

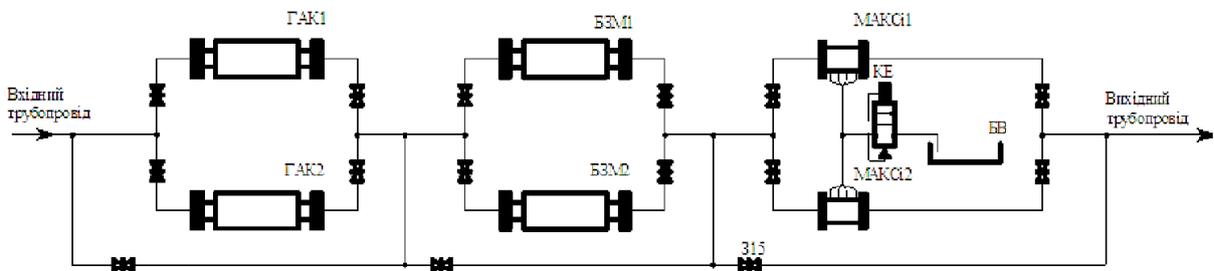


Рис. 1.14. Технологічна схема магнітно-кавітаційної системи очищення робочої рідини

Отже, процес очищення здійснюється за допомогою обробки середовища спрямованим ультразвуковим потоком від частотного генератора акустичних коливань (ГAK), а також змінним поздовжнім і поперечним магнітним полем – за допомогою блоку змінного магнітного поля (БЗМ) та магнітної аксіально-

симетричної системи (МАКС). Подальше видалення домішок забезпечується за рахунок їх адсорбції через фільтр адсорбційної очистки (ФАО).

Розглянемо основні напрями побудови конструкції електромагнітних та магнітних апаратів впливу магнітного поля на воду та водні системи. Авторами [54, 55] розроблено електромагнітний апарат (рис.1.15).

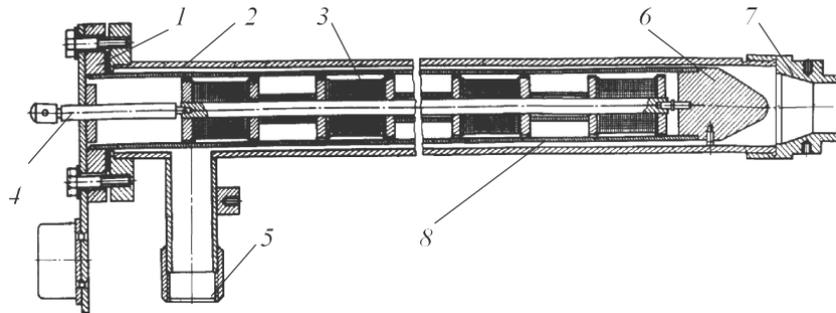


Рис. 1.15. Електромагнітний апарат (тип 15): 1 – фланець; 2 – корпус; 3 – електромагніт; 4 – шток; 5 – вхідний патрубок; 6 – регулятор швидкості потоку рідини; 7 – вихідний патрубок; 8 – труба

Електромагнітний апарат (рис. 1.16) призначений для магнітної обробки води з метою зниження карбонатних відкладень на поверхнях котлів опалення, що віддають тепло, і швидкісних водонагрівачів систем опалення та гарячого водопостачання житлових, громадських і промислових будинків.

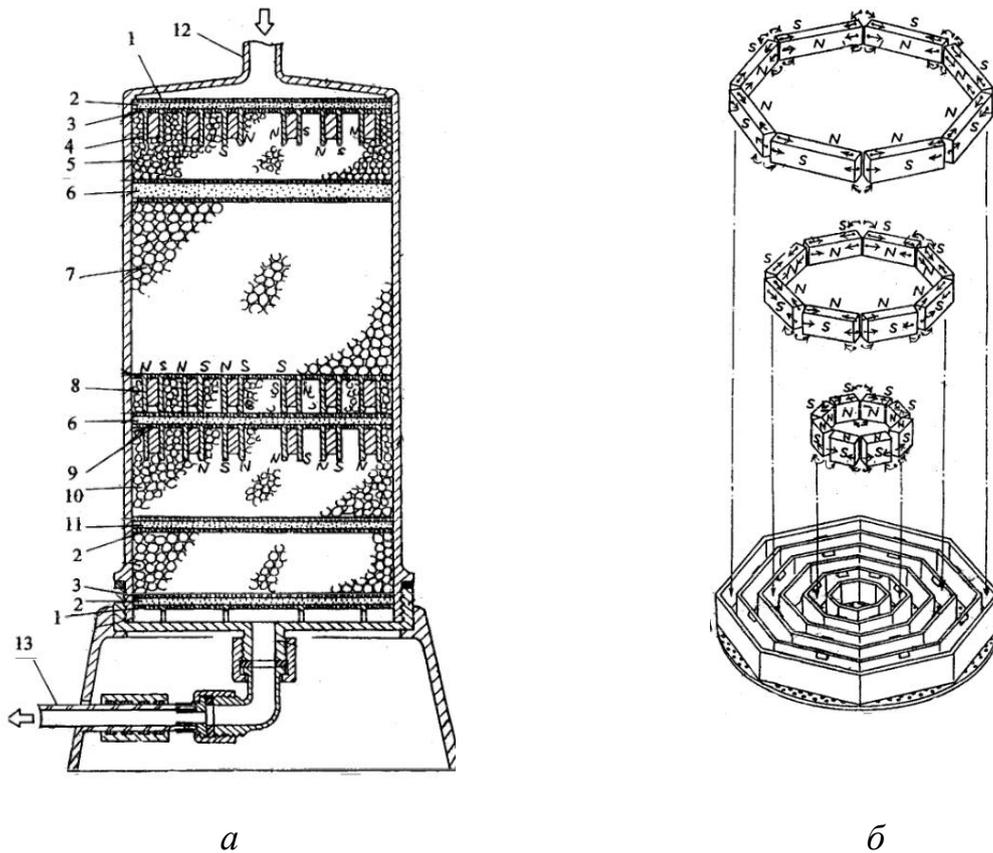


Рис. 1.16. Схема фільтру для доочищення питної води: а) розріз конструкції апарату демонструє послідовність розташування складових кришка (1), пластикова пластина (2), тканинний фіброзний фільтр (3) та багат шарові системи очищення; б) схема розташування магнітів відображає їх ефективне впорядкування в конструкції фільтру – дошки магнітів «Magnacircle» (4, 8, 9) являють собою пристрої з заповненням щілин керамічними гранулами або гранульованим активованим вугіллям, а також інших матеріалів для покращення очищуючих властивостей – штучна пориста кераміка (5), фетрове вугілля (6), гранульоване активоване вугілля (7, 11), а також екоенергетичну кераміку зі збагаченням залізом (10), вхідний і вихідний патрубків (12, 13) забезпечують підключення апарату до системи водопостачання

У роботі [55] розроблено фільтр для доочищення питної води, в якому застосовується магнітне поле, створене постійними магнітами типу "Magnacircle". Пристрій призначений для отримання високоякісної води в

системах питного водопостачання.

Фільтр забезпечує п'ять етапів доочищення: фільтрацію, очищення, знезараження, збагачення мікроелементами та біологічну активацію за рахунок дії магнітного поля. Така обробка дозволяє воді відновлювати природні властивості, наближаючись до характеристик «живої» води.

Завдяки цьому апарат забезпечує отримання питної води високої якості, зокрема сприяє значному зниженню рівня канцерогенів, таких як важкі метали й інші шкідливі домішки.

Крім того, використання цього методу дозволяє зменшити витрати на очищення води як мінімум на 75% порівняно з альтернативними підходами.

Магнітне поле в дискретних областях дуже неоднорідне, тобто має дуже великий градієнт напруженості в напрямку, перпендикулярному до напрямку поширення водної системи, а число таких областей змінюється в достатньо широкому діапазоні і, як правило, не менше п'яти. Через замкнутість магнітних силових ліній створити «абсолютну» ортогональність векторів швидкості потоку водних розчинів та індукції магнітного поля у цьому випадку неможливо.

У пристрої [56] для намагнічування розчинів, що базується на використанні котушки, для створення неоднорідного магнітного поля застосовуються феромагнітні пластини з отворами, розташовані перпендикулярно до напрямку магнітних силових ліній. Завдяки викривленню ліній магнітного поля формується перпендикулярна до головної осі складова магнітної індукції. Її величина може варіюватися залежно від параметрів, таких як товщина феромагнітних пластин, їх щільність розташування та сила струму в котушці.

Крім того, ця складова змінюється і в площині поперечного перерізу отвору (каналу), через який проходить розчин.

Таким чином, перпендикулярна складова магнітної індукції змінюється як уздовж осі, так і в напрямку, перпендикулярному до неї.

На рис. 1.17, а, для прикладу, показано розміщення феромагнітних

кілець, а на рис. 1.17, б – зміна перпендикулярної складової індукції  $\vec{B}$ .

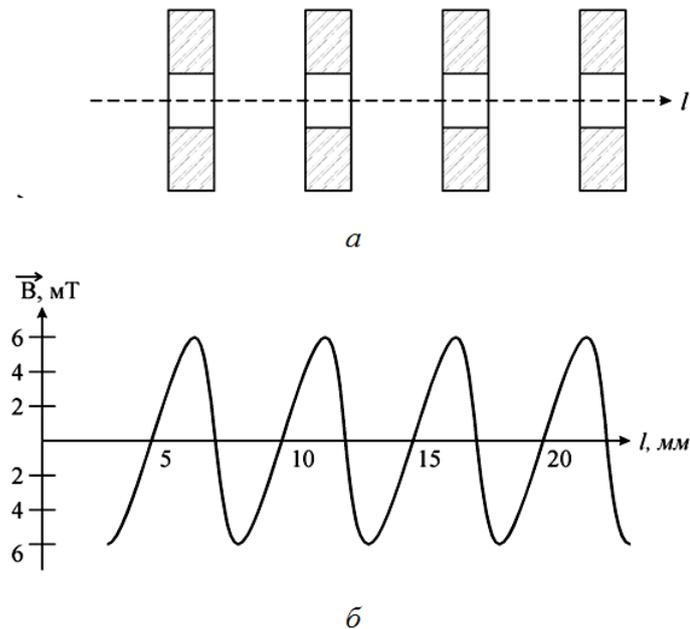


Рис. 1.17 Зміна магнітного поля у пристрої: а) конфігурація ферромагнітних пластин; б) зміна перпендикулярної складової індукції магнітного поля вздовж осі  $l$

Загалом ефективність впливу магнітного поля зростає зі збільшенням кількості «порогів», через які розчин проходить у зоні дії магнітного поля. Поліекстремальний характер дії магнітного поля, а також його залежність від частоти проходження розчину через магнітні «пороги», вказують на резонансну природу його впливу на воду.

Під час проєктування пристроїв для електромагнітної обробки води прагнуть максимально раціонально використати дію магнітного поля, забезпечуючи при цьому його найефективніший вплив на розчин.

Це досягається за рахунок ретельного підбору геометричних параметрів простору, де перебуває розчин, а також таких елементів, як полюсні наконечники, магнітопроводи й інші частини магнітної системи пристрою.

Довжина зон впливу магнітного поля на потік рідини та рівень магнітної

індукції мають важливе значення. Як наслідок, виникає асиметрія коливань, змінюється енергія водневих зв'язків, що призводить до їх часткового розриву, зміни взаємного розташування молекул і, відповідно, структури води.

На орієнтацію молекул та розподіл зв'язків між ними суттєво впливають електричні поля, які виникають через зміну магнітної індукції під час проходження молекул через зони дії магнітних полів.

Під впливом більшої індукції зовнішнього магнітного поля посилюються поляризаційні процеси, зокрема атомна й орієнтаційна поляризація.

Це спричиняє збільшення кількості розірваних водневих зв'язків і молекул, які виходять із положення рівноваги у вузлах квазикристалічної структури й переходять у порожнини. У першу чергу руйнуються слабкі «довгі» зв'язки.

У більшості конструкцій пристроїв для магнітної обробки водного середовища магнітне поле змінюється від нульового або близького до нуля рівня до певного оптимального значення.

Авторами [56] запропоновано конструкцію пристрою для магнітної обробки водного середовища, в якому поміж полюсами постійних магнітів було розміщено металеві вставки – конусоподібні магнітопроводи, між якими проходить немагнітна трубка (рис. 1.18 а).

Завдяки такій конструкції пристрою індукція магнітного поля на вершині конусної вставки збільшена і становить 600 мТ при постійному полі 300 мТ. (рис. 1.18, а). Зміна величини індукції магнітного поля вздовж напрямку проходження розчину по довжині вставки показано на рис. 1.18, б.

З графіка 1.18, б видно, що магнітне поле має екстремальних характер вздовж довжини немагнітної трубки.

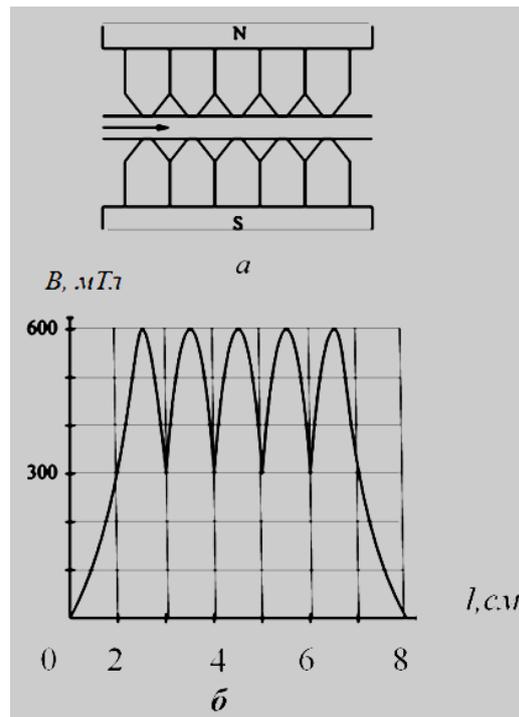


Рис. 1.18. Схема будови пристрою із конусоподібними вставками: а – структура вставок; б – параметри індукції вздовж довжини немагнітної трубки

У дослідженнях впливу магнітного поля на фізико-хімічні процеси у водних розчинах автори [57] визначали вплив магнітного поля на водне середовище, застосовували конструкції пристроїв зі зворотним рухом рідини крізь постійне магнітне поле ( рис. 1.19).

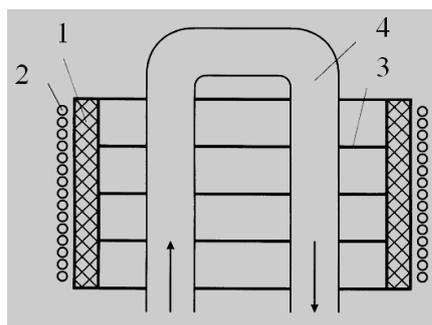


Рис. 1.19. Схема електромагнітного пристрою: 1 – корпус; 2 – обмотка з дроту; 3 – феромагнітні кільця; 4 – трубопровід з не феромагнітного матеріалу

Пристрій складається з електромагнітної котушки розмірами 0,09 м у

висоту та 0,1 м у діаметрі. На котушці намотано 3600 витків мідного дроту. У центрі котушки, вздовж її осі симетрії, знаходиться отвір розміром  $0,05 \times 0,05$  м, всередині якого розташовано десять паралельно встановлених феромагнітних пластин із регульованими проміжками між ними. Кожна пластина має два симетричних отвори для кріплення водопровідних трубок, виготовлених із неферомагнітного матеріалу. З одного боку котушки ці трубки об'єднані між собою.

Живлення постійним струмом надходить до котушки через випрямляч, а його силу контролює амперметр. При силі струму в 1 А індукція компоненти магнітного поля, яка є перпендикулярною до напрямку руху розчину, досягає 6 мТ. У конструкції магнітного пристрою (рисунок 1.20) передбачені чотири послідовно з'єднані трубки для прокачування розчину, розміщені між двома парами плоских магнітів з розмірами  $8 \times 10$  см.

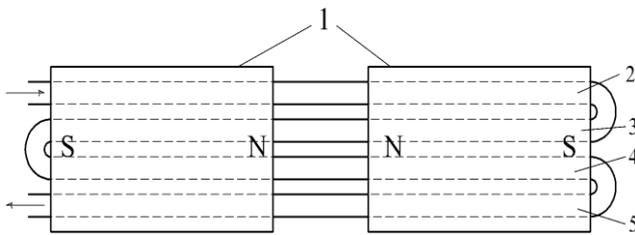


Рис. 1.20. Схема пристрою з чотирьох послідовно з'єднаних трубок між двома парами плоских магнітів: 1 – постійні магніти; 2, 3, 4, 5 – немагнітні трубки

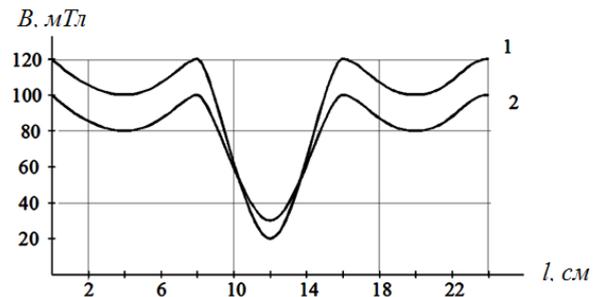


Рис. 1.21. Зміна величини індукції магнітного поля вздовж проходження розчину: 1 – трубки 2, 5; 2 – трубки 3, 4 з рис. 1.20

Відомий магнітний пристрій (рис. 1.22) складається з трьох пар плоских магнітів, розташованих так, щоб між ними протікала вода. Магніти в кожній парі орієнтовані однаковими полюсами один до одного, що при відстані 20 мм між парами створює високий градієнт напруженості магнітного поля. Завдяки використанню гнучкої трубки потік води перетинає магнітні зони з різною напруженістю 12 разів. Лінійна швидкість водяного потоку в магнітному полі

становить 4 м/хв.

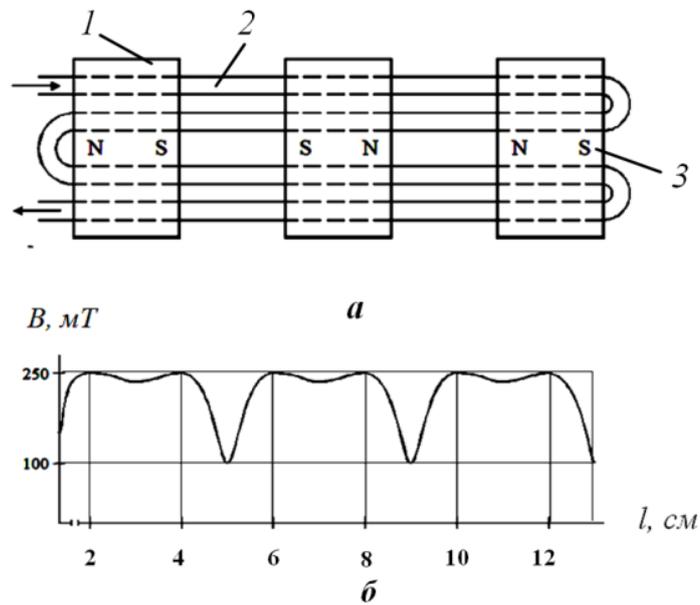


Рис. 1.22. Схема магнітного устаткування (а) та зміна індукції магнітного поля вздовж напрямку проходження води (б)

Застосування перистальтичного насоса унеможливило формування газових бульбашок. Таким чином, впливу магнітного поля піддавалася безпосередньо лише сама рідина, практично без будь-яких домішок. Для визначення міри впливу магнітного поля на глибоко опріснену воду застосовано контрольне випробування магнітної водної обробки (реакція окиснення йодом тіосульфату натрію) [57].

У звичайній демінералізованій воді після намагнічування темп цієї реакції збільшується на 80% відносно темпу в такій самій воді без попереднього впливу магнітного поля. Спостереження з глибоко опрісненою водою продемонстрували, що під дією магнітного поля швидкість реакції зростає на 74%, що майже тотожно приросту темпу даної реакції у звичайній демінералізованій воді.

З аналізу джерел встановлено, що магнітне поле, яке може створюватися електромагнітами або постійними магнітами, значно впливає на зміну властивостей та склад води, а обладнання та пристрої повинні мати змінну

індукцію магнітного поля вздовж проходження води, що досягається певними відстанями між магнітами.

Дослідження працездатності запропонованої конструкції обладнання для підготовки води для тепломереж, з багатоциклічним впливом за часом магнітного поля на воду, є актуальною науково-технічною задачею.

### 1.5 Аналіз об'єкта досліджень

З метою зменшення навантаження на очисні фільтри мембрани та прискорення процесу підготовки води до заливки у котли запропоновано попереднє очищення від солей жорсткості та зміну параметрів води.

В роботі покладено завдання створення конструкції кавітаційно-магнітного обладнання зміни властивостей та складу води для котелень [68] у якому, завдяки встановленню в трубопроводі подачі води у бак статичного кавітатора з соплом ступеневої форми (рис. 1.25) та блоку з постійними магнітами (рис. 1.26), встановленим на немагнітний трубопровод, а також поршневого кавітатора – вібраційної машини кавітаційної підготовки водного середовища (рис. 1.27), приєднаної трубопроводом до бака з водою.

При коливаннях поршня вібраційної машини виникає зворотно-поступальний рух у насадку та трубопроводі де при певних режимах виникає кавітаційний процес із розщепленням молекул води на активні радикали  $H^+$ ,  $OH^-$  та здійснюється додатковий вплив на їх розщеплення магнітним полем зі значним градієнтом напруженості від постійних магнітів, що розташовані на зовнішніх стінках немагнітного трубопроводу.

На (рис. 1.25) зображено статичний кавітатор 7, який містить корпус 1, закритий кришкою 2 і закріпленою болтами 3, у яку загвинчено сопло ступеневої форми 4 та у корпус 1 встановлено вихідний штуцер 6, а у кришку 2 встановлено вхідний штуцер 5.

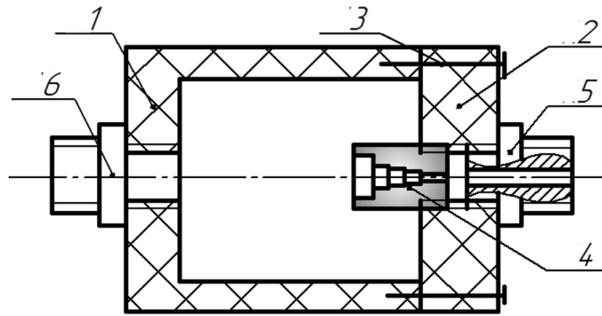


Рис. 1.25. Схема конструкції гідростатичного кавітатора:

1 – корпус; 2 – кришка; 3 – гвинти; 4 – сопло ступеневої форми;  
5 – вхідний штуцер; 6 – вихідний штуцер

На трубопроводі 8, який з'єднаний з баком 10, встановлено блок омагнічування 9 з постійними магнітами (рис. 1.26).

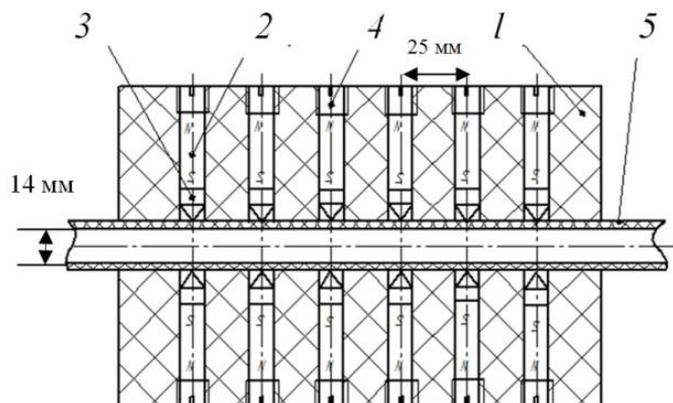


Рис. 1.26. Схема конструкції встановлення постійних магнітів: 1 – немагнітний корпус; 2 – постійний магніт; 3 – конусна вставка; 4 – заглушка;  
5 – немагнітна трубка зливного трубопроводу

Трубопровід 11 з'єднаний з баком 10 та входом у насос 3 і призначений для забору води 12 з бака 10. Трубопровід 13 з'єднано через трійник 4 та кран 6 з баком 10 для зливу надлишків води 12 та регулювання швидкості руху рідини у кавітаторі 7. До баку 10 у нижній частині за допомогою трубопроводу 14 приєднано поршневий кавітатор – вібраційна машина 15 (рис. 1.27).

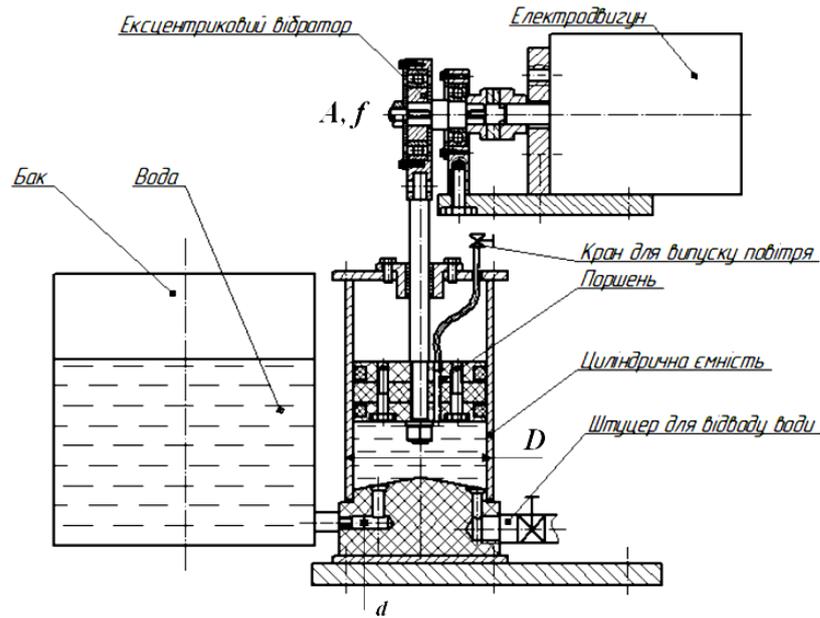


Рис. 1.27. Принципова схема вібраційної машини кавітаційної підготовки води для тепломереж:  $A$  – амплітуда коливань приводу;  $f$  – частота коливань приводу;  $D$  – діаметр камери пульсації;  $d$  – діаметр насадки

Запропоноване кавітаційно-магнітне обладнання зміни властивостей та складу води для котелень (рис. 1.28) містить: основу 1 на якій встановлено електродвигун 2 з насосом 3. На виході з насоса 3 (рис. 1.29) встановлено трійник 4, на який вкручено кулькові крани 5, 6 для регулювання процесу виникнення кавітації у статичному кавітаторі 7.

Кавітаційно-магнітний пристрій зміни властивостей та складу води для котелень працює наступним чином. Вода 12 заливається у бак 10, після чого включається електродвигун 2, який приводить у дію насос 3. Вода 12 крізь трійник 4 поступає у трубопроводи 8 і 13, де її швидкість протікання регулюється кранами 5, 6 для досягнення кавітаційного процесу у статичному кавітаторі 7, перетікаючи по трубопроводу 8 крізь блок омагнічування 9 з постійними магнітами 2, де завдяки створенню значного градієнту напруженості магнітного поля в напрямку, перпендикулярному до напрямку руху водної системи, здійснюється розрив водневих зв'язків та трубопроводом 8 подається у бак 10. Надлишок води 12 крізь трубопровід 13 вертається у бак 10. Також при включенні вібраційного поршневого кавітатора – вібраційної

машини – 15 вода 12 додатково підлягає кавітаційному впливу при зворотно-поступальному руху рідини крізь насадок 5, у якому виникає кавітаційний процес, та циклічно подається крізь трубопровід 14 у бак 10.

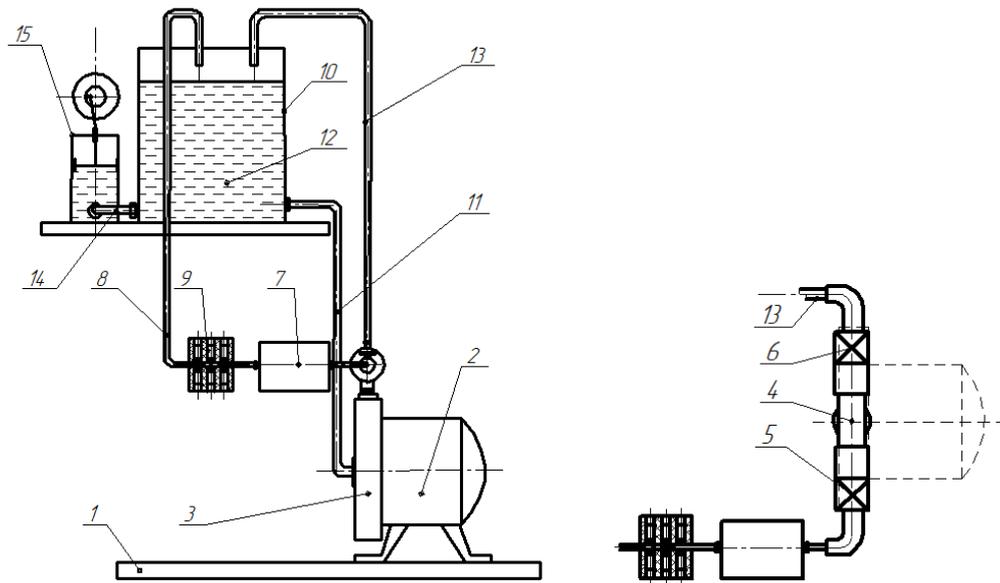


Рис. 1.28. Принципова схема обладнання вхідної магнітно-кавітаційної підготовки води для тепломереж: 1 – основа; 2 – електродвигун; 3 – насос; 4 – трійник; 5, 6 – крани кулькові; 7 – статичний кавітатор; 8 – блок постійних магнітів; 9 – трубопровід; 10 – бак; 11 – трубопровід; 12 – трубопровід; 13 – трубопровід; 14 – поршнева вібраційна машина ексцентрикового типу; 15 – вода

Таким чином, вода 12 з бака 10 проходить багаторазово крізь блок омагнічування 9 та статичний кавітатор 7 і додатково підлягає кавітаційному обробленню у поршковому кавітаторі 15, де також виникає кавітаційний процес із розщепленням молекул води на активні радикали  $H^+$ ,  $OH^-$  та здійснюється додатковий вплив розриву водневих зв'язків магнітним полем.

Після 15-20 хвилин оброблення водного середовища за допомогою працюючого насоса 3 та перекриттям крану 5 по трубопроводу 13 вода зливається у окрему ємність для відстоювання протягом 2-3 діб.

## 1.6 Висновки. Мета і завдання досліджень

1. Проведений аналіз наукових досліджень застосування кавітаційних технологій та впливу магнітного поля на стан водного середовища у процесах його очищення та зміни властивостей води показав, що кавітаційна обробка рідин має різноманітні технологічні можливості зміни властивостей води на рівні водневих зв'язків і постає доцільною не лише у поглибленому вивченні та дослідженнях технологічних можливостей комплексної обробки, а й у напрямі створення конструкцій вібраційних машин, спроможних органічно поєднати ефективність способів збурення кавітації та омагнічування.

2. Аналіз сучасних конструкцій обладнання та машин для кавітаційного та магнітного впливу на рідинне середовище показав переваги і недоліки різних конструкцій обладнання. Найбільш дієвим приводом вібраційної машини визначено ексцентриковий тип, у якому забезпечується жорсткий зв'язок амплітуди коливань з частотою коливань. Використання такого приводу дозволяє здійснювати строгий керований вплив на процес виникнення кавітаційних порожнин з формуванням кавітаційних бульбашок шляхом вибору конструктивних параметрів машини і експлуатаційних режимів приводу.

3. З аналізу літературних джерел встановлено, що вплив кавітації на воду обмежується лише одним процесом – розщепленням молекул води в кавітаційних бульбашках та окисненням розчинених солей. Незалежно від природи розчинених речовин, кавітація впливає на один компонент – на воду, що призводить до зміни її фізико-хімічних властивостей: підвищення рН, електропровідності, числа вільних іонів і активних радикалів, структурування та активації молекул.

4. Переважна більшість літературних джерел демонструє ефективність застосування низькочастотних коливань для очищення води від соляних забруднень та зміни її структури і властивостей.

5. Дослідження підвищення якості води для котелень залишається як вагомим науково-технічним завданням, так і суспільною проблемою. Тому

дослідження процесу водопідготовки з використанням кавітації при коливаннях рідини та магнітного поля, створення нових конструкцій обладнання є актуальним завданням.

Результати аналізу літературних джерел і патентного огляду дали можливість сформулювати мету та задачі для досягнення поставленої мети.

Мета дисертаційної роботи полягає у дослідженні та розробленні параметрів кавітаційно-магнітного обладнання для зміни складу та властивостей води для тепломереж, обґрунтування його конструктивних параметрів з визначенням продуктивності вібраційної машини та раціональних режимів роботи її приводу

Досягнення сформованої мети передбачає вирішення таких завдань:

- на основі аналізу джерел виникнення кавітаційних процесів у вібраційних машинах для зміни складу та властивостей води сформулювати достатнє уявлення про область досліджень і розробок для створення високоефективних технічних рішень;
- провести аналіз теоретичних та експериментальних досліджень кавітаційно-магнітного впливу на стан води та визначити напрямки досліджень;
- розробити фізичну модель поршневого кавітатора – вібраційної машини, що проявляє механічний вплив на рідинне середовище;
- побудувати математичну модель руху середовища у поршневому кавітаторі – вібраційній машині, для визначення її продуктивності при зміні максимального тиску у камері пульсації від режимів роботи приводу;
- сформулювати методику проведення експериментальних досліджень динамічних параметрів роботи поршневого кавітатора – вібраційної машини, залежність режимів приводу машини на процес очищення та зміни властивостей води;
- за допомогою відеофіксації дослідити формування кавітаційних процесів у камері пульсації поршневого кавітатора – вібраційної машини при застосуванні низькочастотних вібрацій;

- провести дослідження динамічних та конструктивних параметрів насадків статичного кавітатора методом моделювання кавітаційних процесів у SolidWorks Flow Simulation;

- провести експериментальні дослідження працездатності кавітаційно-магнітного обладнання з вібраційною машиною для очищення та зміни властивостей води;

- сформулювати прикладну методологію проектування обладнання, розробити рекомендації щодо його використання та передати на виробництво матеріали експериментально-промислової моделі кавітаційно-магнітного обладнання очищення та зміни властивостей води для котелень.

**РОЗДІЛ 2**  
**АНАЛІЗ ТЕОРЕТИЧНИХ ОСНОВ ТА РЕЗУЛЬТАТІВ**  
**ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ГІДРОКАВІТАЦІЙНОГО І**  
**МАГНІТНОГО ВПЛИВУ НА СТАН ВОДИ**

**2.1 Аналіз досліджень будови та параметрів водневих зв'язків у рідині**

Розглянемо представлення будови електронної структури молекули  $H_2O$  та взаємодію водневих зв'язків. Погляд на електронну структуру молекули  $H_2O$  виявляє причину цих міжмолекулярних взаємодій (рис. 2.1).

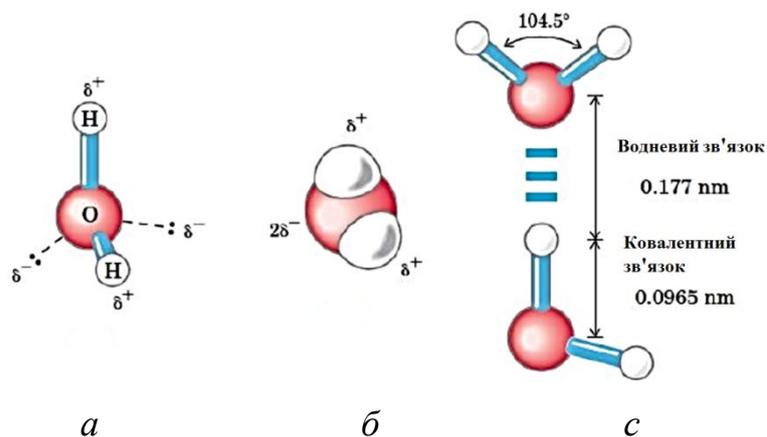


Рис. 2.1. Структура молекули води: *a* – кулестержнева модель води; *б* – масштабна модель *с* – водневі зв'язки показані трьома паралельними синіми лініями

Кожен атом водню молекули води ділить електронну пару з центральним атомом кисню. Геометрія молекули продиктована формами зовнішніх орбіталей електронів атома кисню, які подібні до  $sp^3$ -зв'язуючих орбіталей вуглецю. Ці орбіталі описують грубий тетраedr з атомом водню у кожному з двох кутів та неподіленими парами електронів у двох інших кутах (рис. 2.1 *a*). Кут з'єднання Н–О–Н становить  $104.50$  менше, ніж  $109.50$  ідеального тетраедра через скупчення розпушуючих орбіталей атома кисню. Ядро кисню притягує

електрони сильніше, аніж ядро водню (протон), тобто кисень є більш електронегативним. Відтак розподіл електронів між Н і О є нерівномірним, електрони частіше містяться поблизу атома кисню, аніж водню. Результатом цього нерівномірного обміну електронами є два електричних диполя у молекулі води, по одному вздовж кожного зі зв'язків Н–О; кожний водень несе частковий позитивний заряд ( $\delta^+$ ), а атом кисню несе частковий негативний заряд, рівний сумі двох часткових позитивів ( $2\delta^+$ ). У підсумку між атомом кисню однієї молекули води та воднем іншої (рис. 2.1 с) виникає електростатичне притягування, яке називається водневим зв'язком.

Водневі зв'язки відносно слабкі. Водневі зв'язки, що містяться у рідкій воді, мають енергію дисоціації зв'язку (енергію, потрібну для розриву зв'язку) близько 23 кДж/моль, як порівняти з 470 кДж/моль для ковалентного зв'язку в О–Н у воді або 348 кДж/моль для ковалентного зв'язку С–С [68].

Вченим зі Швейцарії, Японії та Фінляндії вдалося виміряти силу водневого зв'язку в окремій молекулі за допомогою атомно-силового мікроскопа. Про своє дослідження вони розповіли в журналі *Science Advances*.

Водневі зв'язки, яким присвячено дослідження, зустрічаються досить часто і забезпечують властивості білків та нуклеїнових кислот, а також, наприклад, високу температуру кипіння води. До теперішнього моменту вивчення водневих зв'язків було неможливо як з допомогою спектроскопії, так і через електронний мікроскоп. Дослідження на атомно-силовому мікроскопі також поки не давали чітких результатів. Автори дослідження використовували пропелани – поліциклічні вуглеводні, у яких три цикли мають загальний атом вуглецю. При наближенні наконечника атомно-силового мікроскопа до молекули пропелана атоми водню утворюють з молекулою монооксиду вуглецю водневі зв'язки. Їх силу вже можна було виміряти. Таким чином авторам роботи вдалося уникнути ситуації, коли зв'язок встановлюється не з тими атомами, з якими було заплановано. Виміряні в ході експерименту сили і відстані між атомами кисню на наконечнику мікроскопа і атомами водню в молекулі

пропелана досить точно відповідали розрахованим значенням. Водневий зв'язок виявився дуже слабким, довжиною близько 300 пікометр рис. 2.2.

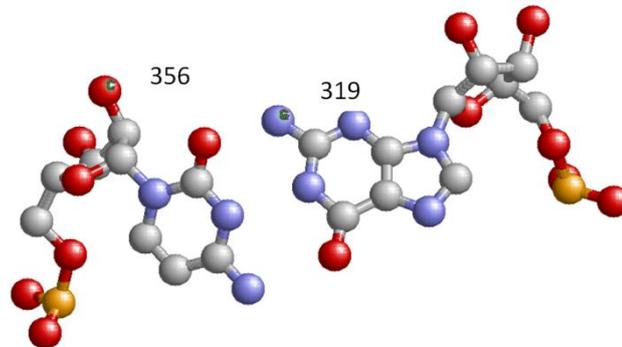


Рис. 2.2. Схема розмірів водневих зв'язків у рідині

Завдяки коротким та слабким водневим зв'язкам можливо їх порушення різними енергетичними впливами (кавітація, магнітне поле, лазерний промінь, електричний пробій, низькочастотні коливання) з отриманням нових властивостей водного розчину.

Детальне узагальнення та розгляд праць про структуру води отримало подальший розвиток у багатьох монографіях [69, 70].

Важко відшукати першопричину, однак нерідко наголошується, що розриви водневих сполучень є обов'язковою передумовою для зміни структури води. Структурні трансформації під впливом різних зовнішніх чинників – температури, тиску чи магнітних полів – визначаються також більшим чи меншим викривленням сполучень (зміною кута між прямою, яка сполучає центри найближчих молекул води, та орієнтацією зв'язку О-Н однієї з цих молекул). Енергія, потрібна для викривлення водневих сполучень, незрівнянно менша за енергію їхнього розриву, тому одночасна деформація кута та довжини зв'язку молекул енергетично вигідніша, аніж деформація лише кута чи лише довжини зв'язку [70]. Отже, зміна структури води можлива при затраті енергії, значно меншої за енергію водневих сполучень.

Дослідження довели, що вода є відкритою, рухливою, структурно-складною системою, в якій сталий стан легко порушується при будь-якому

зовнішньому втручанні. У працях [71-73] показано, що під впливом магнітного поля відбувається послаблення чи розрив водневих сполучень між молекулами води, внаслідок чого збільшується їхня рухливість.

## 2.2 Аналіз основ процесу гідрокавітаційного впливу на стан води

Високоєфективними і продуктивними пристроями з низькими питомими енерговитратами для обробки рідких водних систем показали себе кавітаційні апарати різних конструкцій [74]. Проточні гідродинамічні кавітаційні апарати статичного типу представляють собою надійне високоєфективне обладнання для розчинення, змішування, диспергування, емульгування гомогенізації в дисперсних системах типу «рідина-рідина» або «рідина-тверда речовина». Відмінною ознакою цих апаратів є просторово-часова локалізація енергії, що дає можливість при порівняно низькому рівні енергії створювати направлені імпульси великої потужності.

Використання гідродинамічної кавітації в обладнанні цього типу дозволяє інтенсифікувати і прискорювати технологічні процеси в рідких середовищах, при цьому значно зменшуючи витрати енергії. Ефективність кавітаційних апаратів пов'язана з виникненням супутніх до явища кавітації ефектів, таких як ударні мікрохвилі, вібротурбулізація, дифузія і теплообмін, які виникають при утворенні, зростанні і колапсі бульбашок. У результаті, створюються умови для ефективного проходження гідромеханічних, фізичних і хімічних процесів на мікро- і нанорівнях [74-76].

За класифікацією, запропонованою Блейком, механізм виникнення кавітації трактується або як інерційний розвиток бульбашок (парова кавітація), або як дифузія розчиненого газу в ядро кавітації (газова кавітація) з рідини, що тече або з тріщин, що знаходяться на поверхні тіла (гіпотеза Корнфельда-Суворова [77]).

Місце порушення спільності рідини прийнято зв'язувати з наявністю в рідинах так званих кавітаційних захворювань – яких-небудь неоднорідностей в

рідинах. Такими неоднорідностями можуть бути як тверді включення, так і гази, що знаходяться в рідинах.

За останній час зі збільшенням числа досліджень кавітаційного впливу на рідинні середовища було показано, що кавітаційні струмені можуть бути практично застосовні у багатьох корисних технологіях. Крім уже широко використовуваного явища прискорення хімічних реакцій при приготуванні емульсій і суспензій, зміні властивостей та складу води з'являються нові сучасні технічні рішення та пристрої використання кавітації [73 – 101].

Серед них широко досліджено експериментально і теоретично [102, 103], в тому числі і з використанням програмних пакетів моделювання гідродинамічних процесів [104–111], виникнення умов та різних за конструкцією технічних засобів утворення кавітаційних процесів у різних технологіях.

В звичайних умовах для рідин з джерел або водопроводу при кавітаційному впливі не спостерігається виникнення чистих газових або парових бульбашок і бульбашки, як правило, заповнені парогазовою сумішшю. Відомо, що у рідинах може знаходитися до 10% розчиненого повітря та різних газів [112-114].

Росту парогазової бульбашки протидіє приєднана маса рідини, статичний тиск і тиск від сили поверхневого натягу. Зростання або витіснення кавітаційної бульбашки відбувається при переважній кількості тих або інших ефектів.

Нелінійність фазового балансу призводить до того, що середня температура бульбашки знижується відносно температури рідини навколишнього середовища, а це викликає потік тепла з рідини в бульбашки, випарювання рідини і зростання розмірів бульбашки в середньому за період.

У припущенні, що парогазова суміш в реальній кавітаційній бульбашці при адіабатичному стисканні веде себе як ідеальний газ, тиск у бульбашці в момент сплескування визначається параметром газоутримання  $\alpha$ .

Розрізняють дві стадії кавітації: початкову та розвинену. Існують різні форми початкової стадії кавітації при натіканні потоку на сферичне тіло [115] (рис. 2.3).

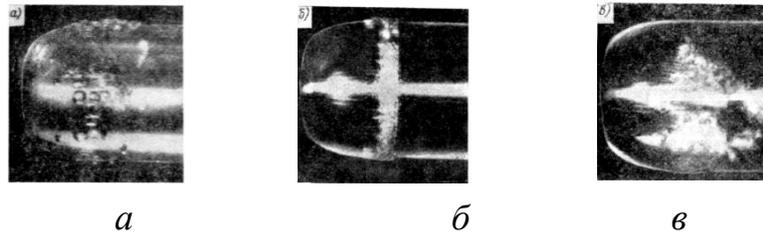


Рис. 2.3. Різні форми початкової стадії кавітації: *a* – бульбашкова; *б* – плівкова у вигляді паска; *в* – у вигляді плям

Коли рідина опиняється під тиском, що дорівнює тиску її насичених парів, може з'явитись парова кавітація. Крізь поверхню бульбашки завжди відбувається дифузія газу – виникає газова кавітація. Фактично завжди фіксується парогазова кавітація.

Модель фізико-хімічних процесів, які відбуваються у кавітаційній бульбашці та засвоюють до неї обсяг рідини, подана у наступному вигляді [116,117]. У кавітаційну бульбашку можуть потрапити пари води, розчинені гази, а також сполуки з високою пружністю пари, тоді як іони чи молекули нелетких розчинених речовин не спроможні проникнути. Енергія, що виділяється під час згортання бульбашки, достатня для збудження, іонізації та дисоціації молекул води, газу та речовин з високою пружністю пари всередині кавітаційної порожнини. На цьому етапі будь-який із наявних газів слугує активним складником, який бере участь у передачі енергії збудження, перезарядженні та інших процедурах. Вплив звукового поля на речовину, що потрапляє у бульбашку, є безпосереднім, прямим, через дію активних газів  $O_2$ ,  $H_2$  та  $N_2$  у кавітаційній бульбашці подвійним:

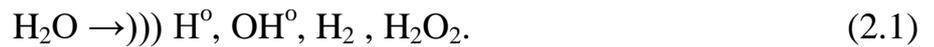
- у першій черзі,  $O_2$  і  $H_2$  беруть участь в реакції трансформації радикалів:

$H^\circ + O_2 \rightarrow HO_2^\circ$ ,  $OH^\circ + H_2 \rightarrow H^\circ + H_2O$ , а  $N_2$  – в газових звукохімічних реакціях, кінцевим результатом яких є фіксація азоту:



- у другій черзі, хімічно активні гази, які проникають у кавітаційну бульбашку, беруть участь, так само й благородні гази, у передачі енергії електронного збудження молекулам води, а також у процесі заряджання. Символом  $\cdot$  позначено хімічну дію звука.

При сплескуванні кавітаційної бульбашки в розчин переходять радикали  $H^\cdot$ ,  $OH^\cdot$ , іони та електрони малої енергії, що утворилися в газовій фазі при розщепленні молекул  $H_2O$  і речовини з високою пружністю пари, продукти їх взаємодії і часткових рекомбінацій, а також метастабільні збуджені молекули  $H_2O$ . Сумарну схему кавітаційного розщеплення молекули води представлено в такому вигляді:



Утворювані в системі активні частинки після переходу в розчин реагують з розчиненими речовинами. На цій стадії, коли здійснюються акустичні коливання, на хід процесу можуть впливати в основному лише хімічно активні гази –  $O_2$  і  $N_2$ . В кінцевому підсумку, вплив кавітації на водні розчини зводиться до одного процесу – розпаду молекул води в кавітаційних бульбашках. Незважаючи на характер розчинених речовин, звук діє на одну субстанцію – воду, що призводить до зміни її фізико-хімічних властивостей: підвищення рН, електропровідності, зростання кількості вільних іонів і активних радикалів, структурування та активації молекул. Питаннями виділення газу з рідкої фази займалися багато дослідників [113 - 116]. Відомо, що в технічних рідинах та воді є розчинене повітря чи газ. Кількість розчинених газів у рідині підкоряється закону Генрі-Дальтона:

$$V_r = \lambda V_p \frac{P_2}{P_1}, \quad (2.2)$$

де  $V_r$  і  $V_p$  – об'єм розчиненого газу й об'єм рідини;

$P_1$  і  $P_2$  – початковий і кінцевий тиски, під якими знаходиться рідина;  
 $\lambda$  – коефіцієнт розчинності газу в рідині.

Значення коефіцієнта  $\lambda$  для різних газів у рідинах коливається в широких межах від 2 до 11 [115].

Розчинені гази будуть виділятися з рідини при зниженні тиску за умови:

$$\frac{P_r}{P_a} \leq \frac{\lambda_1}{\lambda(P_a, T)}, \quad (2.3)$$

де  $P_a$  – атмосферний тиск;

$$T – температура; \lambda = \frac{V_r}{V_p}.$$

Зародкові пухирці при падінні тиску зазнають постійних змін розмірів: спочатку хибна, потім газова кавітація. При хибній кавітації газові пухирці великих розмірів можуть значно збільшуватися, навіть при тисках, що перевищують тиск насичених парів  $P_H$ . Хибна кавітація не викликає кавітаційної ерозії.

Відповідно автором [115] визначені тиски, при яких виникають газова й парова кавітація:

$$P_{\text{кав.г}} = P_H + P_r - \frac{2\sigma}{R_0} \sqrt{\frac{P_r}{P_0 - P_H + 2\sigma/R_0}};$$

$$P_{\text{кав.п}} = P_H - \frac{2}{3\sqrt{3}} \sqrt{\frac{2\sigma/R_0}{P_0 - P_H + 2\sigma/R_0}}, \quad (2.4)$$

де  $P_{\text{кав.г}}$ ,  $P_{\text{кав.п}}$  – тиск газової й парової кавітації відповідно;

$P_H$  – тиск насичених парів;

$P_r$  – тиск газу, що насичує рідину;

$\sigma$  – коефіцієнт поверхневого натягу;

$R_0$  – вихідний радіус пухирця;

$P_0$  – вихідний зовнішній тиск.

Ці вирази показують, що тиск парової кавітації  $P_{\text{кав.п}}$  завжди нижчий за тиск насиченої пари рідини, у той час як тиск газової кавітації  $P_{\text{кав.г}}$  перевищує  $P_{\text{н}}$  тим у більшому ступені, чим вищий тиск газу, що насичує рідину,  $P_{\text{г}}$  і більші розміри зародкових пухирців.

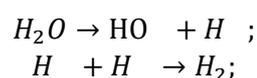
Ініціація кавітаційних механізмів підтримує утворення енергетичних імпульсів високої амплітуди, час їх тривалості становить лише декілька наносекунд. Це, у свою чергу, дозволяє сконцентрувати енергію таких імпульсів у окремих локальних ділянках нанометрових розмірів. Під час цього процесу у рідинному середовищі формуються парогазові міхури, вміст яких може змінюватися залежно від відношення газу до пари — теоретичні межі цього відношення можуть коливатись від нуля до одиниці. Відповідно до вмісту пари або газу всередині порожнин, такі міхури класифікуються як парові або газові.

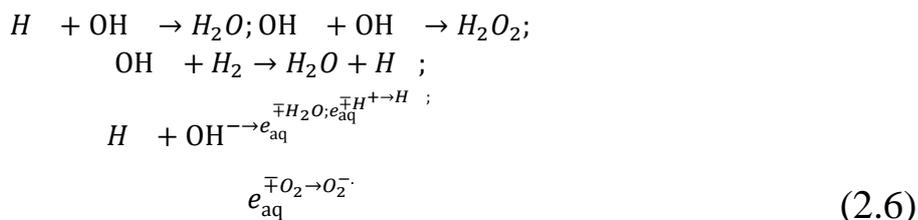
В роботах Маргуліса [117, 118] чітко пояснена можливість виникнення гідратованих електронів за допомогою теорії вільних радикалів.

Модель фізико-хімічних процесів, що відбуваються в кавітаційній бульбашці та прилеглий до неї ділянці рідини, автори [117, 118] надають у такому вигляді. У кавітаційну порожнину здатні проникати пари води, розчинені гази, а також сполуки з високою пружністю пари, але не можуть проникати іони або частки нелетких розчинених речовин. Газоподібні молекули води руйнуються як при піролізі, формуючи радикальні високоактивні частинки, а також гідроксильні радикали:



В роботах [117, 118] чітко пояснена можливість виникнення гідратованих електронів за допомогою теорії вільних радикалів. Молекули води і розчинений в ній газ під дією кавітації зазнають таких перетворень:





Утворені хімічно активні радикали розщеплення води взаємодіють з іншими компонентами розчину, змінюючи його властивості. Швидкість та направленість хімічних реакцій значною мірою пов'язані із природою газоподібних речовин, що містяться в розчині або утворюються як побічні продукти реакції.

Активні частинки, що виникають в системі, після переходу в розчин сольватуються і реагують з розчиненими речовинами. На цій стадії, коли здійснюються непрямі дії акустичних коливань, на хід процесу можуть впливати практично тільки хімічно активні гази -  $O_2$  і  $H_2$ .

Останніми роками розроблено способи та пристрої для створення потужних акустичних коливань в рідині при низьких частотах (10...100 Гц) [112, 117]. При цьому виникає акустична кавітація з бульбашками розміром від 1 мм до 2 см, які ініціюють ті хімічні та фізико-хімічні ефекти, що й ультразвукова кавітація.

### 2.3 Аналіз основ процесу впливу магнітного поля на стан води

Можливість використання магнітних та інших полів для впливу на процеси в рідких системах стала відомою вже давно. Зокрема, електромагнітне поле застосовується для прискорення процесів полімеризації під час отримання високомолекулярних сполук. Однак технічне впровадження короточасних впливів випромінювання та полів набуло поширення лише з появою безреагентних методів запобігання утворенню накипу в парових котлах і теплообмінних апаратах, як-от обробка за допомогою височастотного електричного поля, ультразвуку чи магнітного впливу. Характер заповнення частот у структурі води, що зазнає впливу поля, виявився схожим на воду з

більш високою температурою. Таким чином, можна стверджувати, що магнітне поле спричиняє підвищення структурної температури води. Також було виявлено, що короткочасна дія магнітного поля впливає на поверхневий натяг води, викликаючи його зростання на 2% у низькочастотному змінному магнітному полі. Однак цей ефект зникає через 24 години після завершення обробки. Густина води, що зазнала поляризації у магнітному полі, збільшується від 0,02 до 0,03% порівняно із початковою водою. У деяких випадках зміни можуть досягати навіть 0,1% або більше.

Важливо зазначити, що магнітна обробка води дає ефект лише тоді, коли вона протікає через одне чи декілька магнітних полів. Статичний вплив магнітного поля на нерухому воду значно менш ефективний. Експерименти підтвердили необхідність штучно створеного магнітного поля для переміщення води під час обробки. Оскільки вода завжди має певну електропровідність, її рух у магнітному полі супроводжується утворенням слабкого електричного струму. З огляду на це, таку обробку можна вважати не просто магнітною, а електромагнітною.

Перебуваючи в магнітному полі, молекули води орієнтуються уздовж силових ліній цього поля, що призводить до значних змін у їхній внутрішній структурі. У результаті такого впливу молекули води набувають тільки одного ступеня свободи – коливання навколо осі, визначеної силовими лініями. Це створює ефект, при якому молекули води стають наче "фіксованими" між полюсами магніту, тимчасово набуваючи більш впорядкованого і структурованого стану.

Попри зазначені зміни в структурі води, ефекти магнітного поля не є стабільними та піддаються коливанням. Результати експериментів у стандартних умовах демонструють певну нестійкість, що утруднює однозначне використання таких властивостей у практичних цілях. Однак після впливу магнітного поля вода демонструє кілька помітних змін: прискорення хімічних реакцій та кристалізації розчинених речовин, інтенсифікація абсорбції, коагуляція домішок та осадження. Особливо ці ефекти позначаються на

поведінці домішок, які знаходяться у складі води, хоча механізми цього впливу залишаються недостатньо вивченими. Практичне застосування магнітної обробки води включає її використання для видалення важкоосаджуваних суспензій, зокрема каламуті. Магнітна вода сприяє коагуляції малих часток із наступним збільшенням їхнього розміру та осадженням. Ця властивість активно використовується на водопровідних станціях для очищення природних вод із високим ступенем каламутності.

У промислових стічних водах магнітна обробка допомагає швидко осаджувати дрібнодисперсні забруднення, захищаючи природні водойми від надмірного забруднення. Зміни змочувальних властивостей води після магнітної обробки також залежать від складу твердої поверхні. Наприклад, якщо матеріал містить кремній, здатність води змочувати поверхню покращується; у протилежному випадку — погіршується. Вказана властивість активно використовується у гірничодобувній промисловості, зокрема для флотаційного збагачення руд, де потрібно підвищити ефективність відокремлення корисних металів.

Історично магнітна обробка виникла як спосіб запобігання накипоутворенню та корозії в технічних системах. Згодом її почали застосовувати як метод боротьби із внутрішніми інкрустаціями в пивоварній, цукровій, целюлозно-паперовій та хімічній промисловості, а також для усунення сольових відкладень у трубах нафтових свердловин. Додатково технологію успішно впроваджують задля прискорення твердіння та підвищення міцності будівельних матеріалів на основі цементу й алебастру, а також для прискорення процесів осадження зважених часток.

Численні публікації як вітчизняних [119–129], так і закордонних дослідників [130–138], стверджують, що магнітне поле може змінювати фізико-хімічні властивості води та здійснювати очистку від сполук металів та солей. Також впливає на оптичні властивості води, провідність і зменшує силу поверхневого натягу води, прискорює деградацію органічних речовин целюлозно-паперових стічних вод, гальмує осадження накипу на металевих

поверхнях, змінює рН середовища. Застосування магнітного поля широко використовується для хімічної та харчової промисловості, теплопостачання, сільського господарства та будівництва внаслідок зміни фізико-хімічних властивостей води.

Експериментальні результати щодо впливу магнітних полів на кінетику хімічних реакцій показують, що вплив магнітних полів не є однозначним для різних типів реакцій. Наприклад, швидкості гідролізу сахарози, оцтового ангідриду та сечовини зменшуються під впливом магнітних полів [72], тоді як швидкості багатьох окислювально-відновних реакцій значно зростають під впливом магнітних полів [140-71458]. Однак, залежно від механізму конкретної реакції, магнітні поля можуть сповільнювати окисно-відновний процес або не впливати на його перебіг [142]. Причому ці ефекти спостерігаються як при додаванні реагентів у попередньо намагнічену воду, так і при впливі на розчин магнітного поля. Як наслідок, існує значна кількість гіпотез, що пояснюють загальний вплив магнітних полів на системи водних розчинів: згідно з [14], магнітні поля збільшують рухливість молекул води. Одночасно зі збільшенням рухливості молекул константа дисоціації води зменшується і вона стає «структурованою», як показано в роботі [144]. Це свідчить про зменшення енергії водневих зв'язків між молекулами  $H_2O$ , що дозволяє такій воді легше розщеплюватися в організмі людини при споживанні. Таким чином, намагнічену воду слід розглядати як розчинник, що має схожі властивості зі звичайною водою, але певною мірою відрізняється від неї.

Відомо, що ефект магнітного опрацювання водних систем, як правило, є багатополярним та залежить від параметрів магнітного поля й режиму опрацювання. Поки що цих даних замало для точних обчислень, які пов'язують параметри магнітного поля, такі як градієнт і частота, з величиною конкретного впливу магнітного поля при дії на водну систему. Зміни фізико-хімічних властивостей водних розчинів унаслідок магнітного опрацювання залежать, головним чином, від їхніх властивостей. Тому на сучасному етапі досліджень механізмів дії магнітного поля на воду можна робити лише якісні чи

напівкількісні оцінки ефектів. Різні автори висувають різні гіпотези для пояснення механізмів впливу магнітного поля на водні системи, які часто суперечать одна одній, навіть стосовно таких специфічних процесів, як утворення накипу та кристалізація-розчинення. Незважаючи на широке розмаїття водних систем, в яких були виявлені певні ефекти магнітного поля, спільним базовим складником є сама вода. Дослідження впливу магнітних полів на деіонізовану воду підтвердили [145] висновок про те, що магнітні поля спричиняють зміни в електронній структурі молекул води. Усі зміни фізико-хімічних властивостей водних розчинів є наслідком післядії магнітних полів. Фактично ці зміни можна пояснити зменшенням іонного добутку води та зменшенням енергії водневих зв'язків між молекулами води як розчинника. При цьому ефекти магнітного поля спостерігаються не тільки після нагрівання намагніченої води чи водних розчинів до температури кипіння, але й після зміни їх когезійного стану, що було задокументовано за допомогою інфрачервоної спектроскопії водяної пари. Це свідчить про те, що електронна структура молекул води суттєво змінюється після впливу магнітного поля. Це показує, що неоднорідне магнітне поле діє безпосередньо на саму воду, без домішок, у тому числі парамагнітних іонів заліза.

Серйозним підтвердженням сказаного є також дані роботи [146], які показали, що під впливом змінного магнітного поля досягається помітна зміна низки фізичних властивостей води та льоду, отриманого кристалізацією води  $H_2O$  з питомою електропровідністю  $\chi = 1,2 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$  та кристалізацією важкої води  $D_2O$  з питомою електропровідністю  $\chi = 1 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$ .

У низці досліджень з електромагнітного опрацювання води наведено розрахунки для пристроїв, що намагнічують [147, 148]. Однак спільним недоліком усіх розрахунків є те, що вони ґрунтуються на фундаментальних властивостях магнітних полів та гідродинаміки потоку, які ще недостатньо вивчені. Як показали ці дослідження, результати магнітного опрацювання води та водних розчинів загалом не мають простої й чіткої залежності від середньої індукції магнітного поля, його градієнта та величини електрорушійної сили.

Водночас розрахунки апріорі припускають такі чіткі залежності, на основі яких виконуються детальні розрахунки обладнання: гідродинамічні (для заданої продуктивності) та електричні розрахунки (визначення коефіцієнта використання потоку, властивостей магнітопроводу, магнітної індукції в зазорі тощо). У цьому аспекті розрахунки електромагнітних систем різних пристроїв принципово не відрізняються один від одного. У всіх випадках перед введенням обладнання в експлуатацію проводиться попереднє налаштування. Підбирається необхідна індукція магнітного поля та швидкість потоку розчину. Це пов'язано з тим, що відомі конструкції були розроблені для певних умов, і їхній вплив може виявитися незначним в інших умовах. Навіть для пристроїв, призначених для зменшення накипоутворення, режим їхньої роботи залежить від жорсткості води та її класу.

Наприклад, в роботі [149] описані оптимальні умови магнітної обробки, знайдені експериментально. Згідно з експериментальними даними, оптимальне значення індукції магнітного поля зростає зі збільшенням вмісту солей і загальної жорсткості для кожного класу води. Температура кипіння – ще один основний фізичний параметр води і його значення може змінюватися під дією магнітного поля [150]. Зміна температури кипіння може бути пов'язана з магнітним ефект намагнічування води, а оптимальний ефект намагнічування було отримано при 300 мТл у нормальних умовах.

Автори [151] вивчали вплив постійного магнітного поля на осадження карбонату кальцію та досліджували в різних умовах концентрації карбонату кальцію у воді, рН обробки та швидкості потоку води в магнітному полі. Оброблена вода була піддана тесту на утворення накипу шляхом дегазації розчиненого у воді  $\text{CO}_2$ . Було виявлено, що магнітна обробка збільшує загальну кількість осаду та сприяє однорідному утворенню зародків залежно від рН оброблення води та часу, швидкості потоку води.

Авторами [152, 153] запропонована фізична модель дії магнітного поля на структуру чистої води та зміни характеру цієї структури води, з визначеними оптимальними параметрами магнітного поля, які дозволять замінити

енергоємний процес нагріву всього масиву води до температури фазового перетворення, тобто розриву кластерних водневих зв'язків даного порядку, до мономолекулярної структури.

Також магнітне поле може додатково, впливаючи на атоми кисню, частково забезпечити відрив від ядра електронів та зміну спинів протонів кисню, тобто порушити дипольну структуру молекул води, що призводить до того, що омагнічена вода являє собою мономолекулярну структуру з позитивно зарядженими молекулами, що призводить до більш активної взаємодії з розчиненими речовинами, з зовнішніми та внутрішніми поверхнями капілярно-порових та колоїдно капілярно-порових тіл.

Автори [154-156] у своїх експериментальних дослідженнях результати впливу магнітного поля на воду стверджують, що у намагніченій воді коефіцієнт тертя менший, ніж у воді. Чим сильніша магнітна інтенсивність, тим нижчим стає коефіцієнт тертя в намагніченій воді. Магнітне поле послаблює водневі зв'язки у воді. Після обробки фізико-хімічні властивості води змінилися, що проявляється у зменшенні поверхневого натягу та збільшенні в'язкості з часом обробки.

Вода є більш стабільною після магнітної обробки з меншою молекулярною енергією та більшою енергією активації, як показано в розрахунках, проведених на основі результатів. Було показано, що зовнішнє магнітне поле впливає на кількість водневих зв'язків, структуру рідкої води та коефіцієнт самодифузії молекул води в зовнішньому магнітному полі. Завдяки експериментальним вимірюванням в'язкості, ентальпій, поверхневого натягу води під дією магнітного поля, було висловлено припущення, що водневі зв'язки водню були розірвані.

## **Висновки до розділу 2**

1. У результаті аналізу останніх досліджень будови електронної структури молекули  $H_2O$  та взаємодії водневих зв'язків встановлено, що водневі зв'язки за своєю будовою мають короткі та слабкі зв'язки і можливі

їхнє порушення під дією різних енергетичних впливів (кавітація, магнітне поле, лазерний промінь, електричний пробій, низькочастотні коливання) з отриманням нових властивостей водного розчину.

2. Використання гідродинамічної кавітації в обладнанні дозволяє інтенсифікувати і прискорювати технологічні процеси в рідких середовищах, при цьому значно зменшуючи витрати енергії. Утворені хімічно активні радикали розщеплення води взаємодіють з іншими компонентами розчину, змінюючи його властивості. Швидкість та направленість хімічних реакцій значною мірою пов'язані із природою газоподібних речовин, що містяться в розчині або утворюються як побічні продукти реакції.

3. У результаті аналізу теоретичних основ омагнічування водних середовищ встановлено, що зовнішнє магнітне поле впливає на кількість водневих зв'язків, структуру рідкої води та коефіцієнт самодифузії молекул води. Магнітне поле послаблює водневі зв'язки у воді. Також магнітне поле може додатково, впливаючи на атоми кисню, частково забезпечити відрив від ядра електронів та зміну спинів протонів кисню, тобто порушити дипольну структуру молекул води, що призводить до того, що омагнічена вода являє собою мономолекулярну структуру з позитивно зарядженими молекулами.

4. Проаналізувавши переваги та недоліки різних кавітаційних пристроїв та обладнання для омагнічування, запропоновано провести ряд досліджень з моделювання явища кавітації у SolidWorks Flow Simulation для насадків різної конструкції та визначити характер зміни складу і властивостей води, застосовуючи гідрокавітаційний режим у проточному кавітаторі та з додатковим впливом магнітного поля з градієнтом напруженості вздовж потоку рідини та з додатковим впливом на середовище вібраційного кавітатора.

## РОЗДІЛ 3

### ПРОГРАМА, МЕТОДИКА ТА ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

#### 3.1 Програма проведення експериментальних досліджень

Відповідно до мети роботи, поставленими завданнями і проведеними теоретичними дослідженнями, розроблено програму та методику експериментальних досліджень впливу на зміну складу та властивостей води кавітації та магнітного поля, згідно з якими передбачається:

- спроектувати та виготовити експериментальний зразок запропонованої конструкції установки для дослідження впливу кавітаційних процесів та магнітного поля на зміну властивостей води;

- спроектувати та виготовити експериментальний зразок запропонованої конструкції вібраційної машини для дослідження кавітаційних процесів під час руху рідини крізь насадок та впливу на властивості води;

- визначити режими роботи приводу вібраційної машини для створення максимальної продуктивності процесу;

- дослідити реальну картину виникнення кавітаційних процесів за допомогою відеофіксації у камері пульсації вібраційної машини;

- провести експериментальні дослідження зміни показників, властивостей та складу води при одночасному впливі кавітації та магнітного поля;

- використавши програмний продукт SolidWorks Flow Simulation провести моделювання процесу кавітації у різних за конструкцією насадків з метою отримання їх параметрів для максимального впливу на кавітаційний процес;

- провести експериментальні дослідження працездатності запропонованого обладнання.

### 3.2 Експериментальні установки

Експериментальні дослідження проводились на фізичній моделі обладнання –експериментальній установці, яка показана на рис. 3.1. З метою проведення активних експериментів в установці була передбачена можливість зміни конструктивних параметрів і режимів роботи приводу вібраційної машини і вхідного тиску у трубопроводах та об’єктивна кількісна реєстрація досліджуваних параметрів.



Рис. 3.1. Загальний вигляд дослідної установки для зміни властивостей водопровідної води: 1 – вібраційний кавітатор; 2 – ємність з водою; 3 – вузол омагнічування статичним магнітним полем з градієнтом напруженості вздовж потоку рідини; 4 – статичний кавітатор; 5 – манометр; 6 – насос з електродвигуном; 7 – трубопровід від бака до насоса; 8 – зливний трубопровід від насоса до бака; 9 – трубопровід напірний

З метою впливу постійного магнітного поля на склад водопровідної води на напірному трубопроводі 9 було застосовано вузол омагнічування 3 із змінною індукцією вздовж осі каналу проходження води. При включенні електродвигуна насос 6 подає воду з бака 2 крізь трубопровід 7 у систему. Величина тиску регулюється за допомогою кранів 10 та 11 і контролюється

манометром 5. Додатково включається вібраційний кавітатор 1 для збільшення кавітаційного впливу на стан води. За певний час рідина з бака отримує багатоциклічний вплив гідрокавітації та магнітного поля, що призводить до руйнування структурних і міжмолекулярних зв'язків, зміни її властивостей та складу.

Практичне застосування впливу на склад водопровідної води оцінювалося зміною показників: рН, загальної мінералізації (показник – TDS), окислювального-відновлювального потенціалу (ORP) та аналізом осаду, який утворюється за часом після відстоювання (дві доби).

Для проведення експериментальних досліджень впливу магнітного поля на властивості води було спроектовано та виготовлено установку циклічного магнітного впливу на воду рис. 3.2.

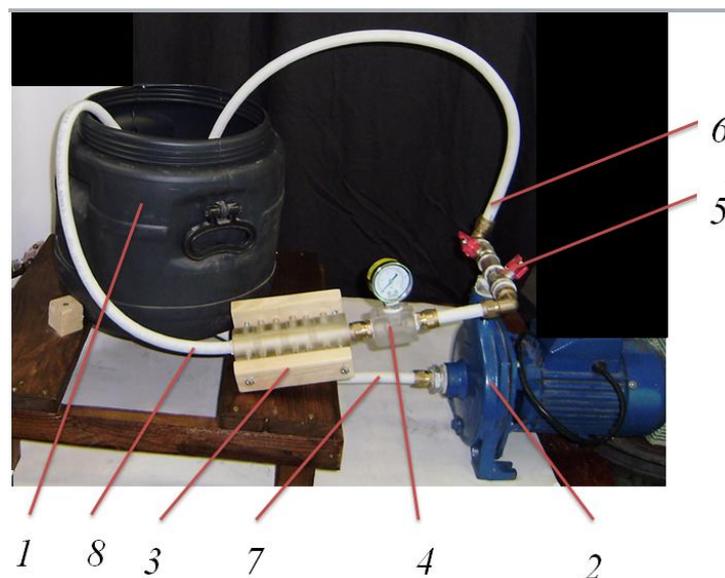


Рис. 3.2. Фотографія експериментальної установки циклічного магнітного впливу на воду: 1 – бак; 2 – насос з електродвигуном; 3 – блок постійних магнітів; 4 – манометр тиску; 5 – крани; 6 – переливний трубопровід; 7 – вхідний трубопровід; 8 – зливний трубопровід

Працює установка таким чином. При включенні електродвигуна з насосом 2 вода з бака 1 подається крізь вхідний трубопровід 7 в насос 2. Далі вода

поступає у трубопровід 8 крізь блок регулювання кранами 5, де є можливість перенаправляти потоки води крізь блок постійних магнітів 3 та частково відводити крізь переливний трубопровід 6 у бак 1, таким чином можна регулювати швидкість проходження води крізь магнітне поле, змінюючи вхідний тиск води, який фіксувався манометром 4. Таким чином, на відміну від відомого обладнання, вплив магнітного поля здійснюється циклічно за часом, що призводить до більш значного впливу на показники води.

Для проведення експериментальних досліджень впливу магнітного поля на властивості води було спроектовано та виготовлено магнітний блок (рис. 3.3), який дає можливість впливу неоднорідного магнітного поля на потік води, що проходить крізь блок постійних магнітів, розташованих у корпусі з певним кроком. На рис. 3.3 показано схему конструкції блоку постійних магнітів.

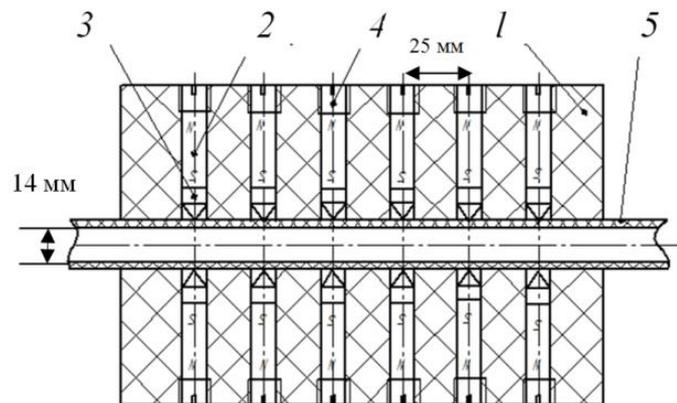


Рис. 3.3. Схема конструкції встановлення постійних магнітів: 1 – немагнітний корпус; 2 – постійний магніт; 3 – конусна вставка; 4 – заглушка; 5 – немагнітна трубка зливного трубопроводу

Обладнання виготовлено з можливістю застосування індивідуально окремих блоків, а саме: гідростатичного кавітатора, блока омагнічування, вібраційного кавітатора, та застосування їх в комплексі.

На рис. 3.4 показано застосування окремих блоків, а саме: гідростатичного кавітатора та блока омагнічування.

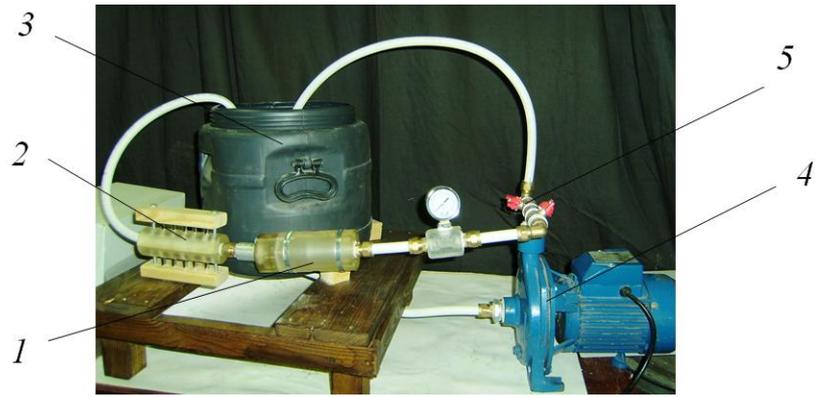


Рис. 3.4. Фотографія експериментальної установки при застосуванні гідростатичного кавітатора та блока омагнічування: 1 – статичний кавітатор; 2 – блок омагнічування; 3 – бак з водою; 4 – насос; 5 – регулююча апаратура

В експериментальному обладнанні для підготовки водопровідної води для котелень було застосовано статичний кавітатор (рис. 3.5) з насадком ступеневим на вході та виході.

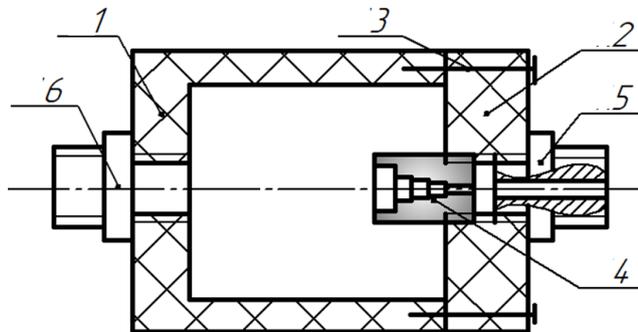


Рис. 3.5. Схема конструкції гідростатичного кавітатора: 1 – корпус; 2 – кришка; 3 – гвинти; 4 – сопло ступеневої форми; 5 – вхідний штуцер; 6 – вихідний штуцер

На рис. 3.6 показана принципова схема вібраційної машини кавітаційної підготовки води для тепломереж, яка під'єднано до бака для збільшення кавітаційного впливу на стан води. При включенні електродвигуна приводиться у рух ексцентриковий вібратор, який приводить у зворотно-поступальний рух

поршень. Вода з циліндричної ємкості крізь насадку періодично поступає у бак. За певних параметрів частоти та амплітуди коливання у насадку виникає кавітаційний процес, що дозволяє додатково впливати на параметри води.

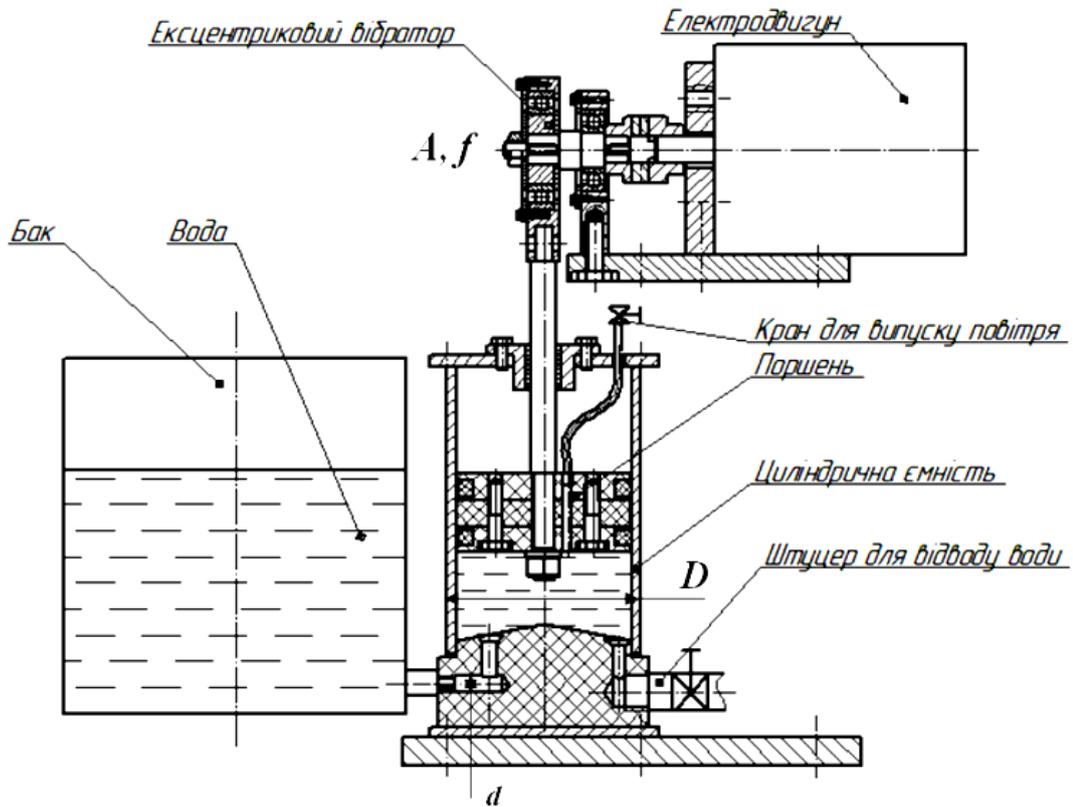


Рис. 3.6. Принципова схема вібраційної машини кавітаційної підготовки води для тепломереж:  $A$  – амплітуда коливань приводу;  $f$  – частота коливань приводу;  $D$  – діаметр камери пульсації;  $d$  – діаметр насадка

За певний час рідина з бака отримує багатоциклічний вплив гідрокавітації та магнітного поля, що призводить до руйнування структурних і міжмолекулярних зв'язків, зміни її властивостей та складу.

Практичне застосування впливу на склад водопровідної води оцінювалося зміною показників: рН, загальної мінералізації (показник – TDS), окислювального відновлювального потенціалу (ORP) та аналізом осаду, який утворюється за часом після відстоювання (дві доби).

### 3.3 Методика експериментального дослідження впливу параметрів роботи приводу на виникнення кавітаційних процесів у вібраційній машині

Як відомо з попередніх досліджень, на виникнення кавітаційного процесу впливає перепад тисків при проходженні води крізь насадок. Тому для визначення впливу параметрів роботи приводу на виникнення кавітаційних процесів у вібраційній машині було застосовано попередньо тарований на тиск мембранний тензометричний датчик тиску МРМ489 (рис. 3.7), який встановлено у циліндричний корпус вібраційної машини.



Рис. 3.7. Фотографія датчика тиску МРМ489 для вимірювання миттєвого тиску у ємності вібраційної машини

У п'єзорезистивному датчику тиску МРМ489 мембрана виготовлена зі сталі 316L, разом з електронікою перетворювача розташована в корпусі з нержавіючої сталі із зручним засобом приєднання.

Осцилограф ВМ8020 підсилює та автоматично перевіряє стан датчика МРМ489, компенсує температурний вплив оточуючого середовища у великому діапазоні та видає стандартний вихідний сигнал. На персональному комп'ютері за допомогою програмного продукту «Disko» за періодом коливань відображається величина сигналу, яка потім записується у електронний файл та зберігається у вигляді скріншота. Осцилограф ВМ8020 підсилює та автоматично перевіряє стан датчика МРМ489, компенсує температурний вплив

оточуючого середовища у великому діапазоні та видає стандартний вихідний. На рис. 3.8 показано експериментальну установку для вимірювання та фіксації миттєвого тиску у ємності вібраційної машини.

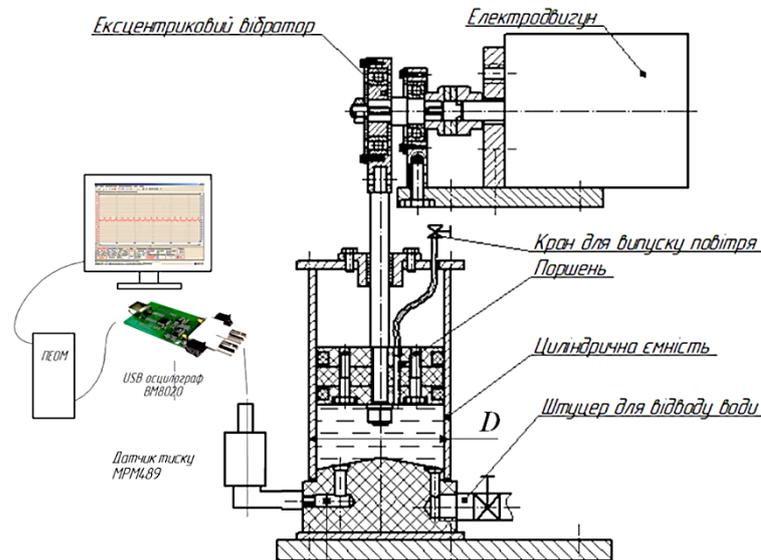


Рис. 3.8. Схема експериментальної установки для вимірювання миттєвого тиску у циліндричній ємності вібраційної машини

Датчик тиску МРМ489 було протаровано попередньо на експериментальному стенді за допомогою компресора стисненого повітря (рис. 3.9) та проведено фіксацію результатів за допомогою електронного осцилографа. Тарувальний графік показано на рис. 3.10.

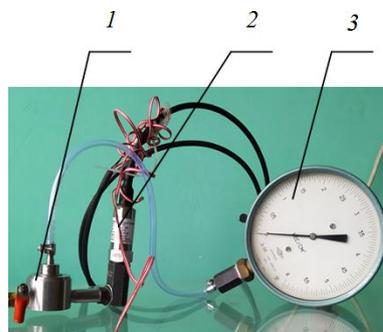


Рис. 3.9. Фотографія експериментального стенду для проведення тарування датчика тиску МРМ489: 1 – редуктор; 2 – датчик МРМ489; 3 – пневматичний манометр

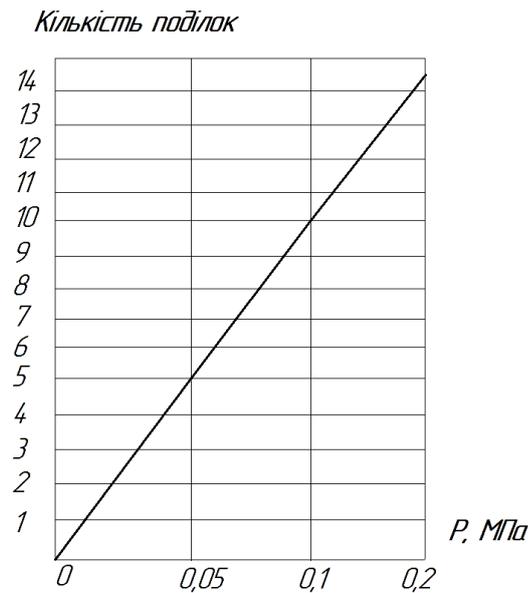


Рис. 3.10. Тарувальний графік датчика тиску МРМ489

Дослідження миттєвого значення сили гідродинамічного тиску струменя з насадка вібраційної машини відбувалось на експериментальній установці рис.3.6 за допомогою мембранного датчика тиску (рис. 3.11), який встановлювався перед соплом входу у бак на відстані 15 мм.

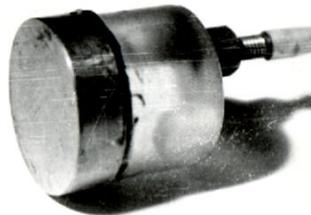


Рис. 3.11. Мембранний датчик для вимірювань миттєвої сили тиску пульсуючого струменю

Вивчення процесу здійснювалися у такий спосіб. Після ввімкнення приводу вібраційного апарату та його виведення на певну частоту фіксувалася осцилограма. Потому проводилася обробка згідно з калібрувальним графіком. Дослідження проводились за таких сталих і змінних параметрів: діаметр камери пульсації 100 мм; діаметр отвору 10 мм; амплітуда коливань змінювалася через

заміну ексцентрика з величиною ексцентриситету 1, 2, 3 мм; частота коливань змінювалася за допомогою зміни напруги на двигуні постійного струму.

### 3.4 Методика досліджень та опис експериментального обладнання для відео-фіксації процесів у камері пульсації вібраційної машини

З метою визначення процесів протікання рідини (вода при 20°C) при зворотно-поступальному русі крізь насадок при різних режимах роботи приводу вібраційної машини було розроблено прозорий макет насадка та камери пульсації, на якому можливо проводити відеофіксацію процесів.

Рух рідини фіксувався цифровою відеокамерою з подальшою обробкою і перетворенням інформації у комп'ютерний файл.

На рис. 3.12 показана експериментальна установка для проведення швидкісної відеофіксації та фотографування картини руху рідини крізь насадок та процесів, що утворюються у камері пульсації.

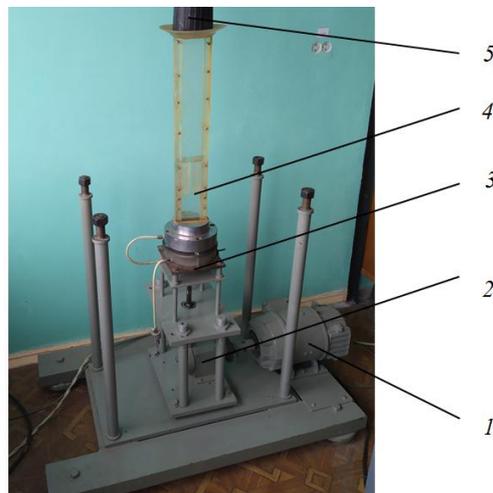


Рис. 3.12. Установка для візуалізації процесу проходження рідини крізь насадок та процесів, що утворюються у камері пульсації: 1 – електродвигун;

2 –вібратор; 3 – камера створення пульсації; 4 – насадок з оргскла;

5 – смінь

Відеозйомка проводилась при таких параметрах: діаметр насадка 10 мм, відношення діаметра камери  $D$  до діаметра насадка  $d$   $D/d = 10$ , амплітуда коливань  $A = 2$ мм, частоту коливань приводу  $f$  збільшували поступово від нуля до 25 Гц.

### **3.5 Методика проведення досліджень параметрів статичних кавітаторів за допомогою SolidWorks**

Для проведення визначення величини кавітаційного впливу різних за конструкцією насадків на зміну властивостей та складу води для дослідження було використано програмний продукт SolidWorks Flow Simulation.

SolidWorks Flow Simulation – це програмне забезпечення на базі SolidWorks для розрахунку потоків рідини всередині і поза моделями SolidWorks.

За допомогою Flow Simulation можна вивчати широкий спектр явищ потоку рідини і теплопередачі, які включають таке:

- зовнішні та внутрішні потоки рідини;
- стаціонарні та залежні від часу потоки рідини;
- течії нестисливої рідини;
- дозвукові, трансзвукові та надзвукові течії газу;
- течії рідини з примежовими шарами, включаючи ефекти шорсткості стінок;
- ламінарні та турбулентні потоки рідини;
- багатовидові рідини та багатокомпонентні тверді тіла;
- течії рідини в моделях з рухомими/обертливими поверхнями та/або деталями;
- кавітація в потоках нестисливої рідини.

Flow Simulation базується на розв'язанні рівняння На'ве-Стокса, які є формулюваннями законів збереження маси, імпульсу та енергії для потоків рідини. Рівняння доповнюються рівняннями стану рідини, що визначають

природу рідини, та емпіричними залежностями густини, в'язкості та теплопровідності рідини від температури. Непружні неньютонівські рідини розглядаються введнням залежності їхньої динамічної в'язкості від швидкості зсуву потоку і температури, а стисливі рідини – введнням залежності їхньої густини від тиску. Конкретна задача остаточно задається визначенням її геометрії, граничних і початкових умов.

Більшість потоків рідини, що зустрічаються в інженерній практиці, є турбулентними, тому Flow Simulation в основному був розроблений для моделювання та вивчення турбулентних потоків. Для прогнозування турбулентних потоків використовуються усереднені за Фавром рівняння Нав'є-Стокса, в яких розглядаються усереднені за часом ефекти впливу турбулентності потоку на параметри потоку, тоді як інші, тобто великомасштабні, залежні від часу явища враховуються безпосередньо. Завдяки цій процедурі в рівняннях з'являються додаткові члени, відомі як напруження Рейнольдса, для яких необхідно додаткову інформацію. Щоб закрити цю систему рівнянь, Flow Simulation використовує рівняння переносу для турбулентної кінетичної енергії та швидкості її розсіювання, так звану k-ε модель.

Flow Simulation використовує одну систему рівнянь для опису як ламінарних, так і турбулентних потоків. Більше того, можливий перехід від ламінарного до турбулентного стану та/або навпаки.

Закони збереження маси, кутового моменту та енергії в локальній декартовій системі координат (наприклад, системі координат, що обертається) можна записати у формі збереження таким чином:

$$\frac{d\rho}{dt} + \frac{d}{dx_i}(\rho u_i) = S_M^p,$$

$$\frac{d\rho u_i}{dt} + \frac{d}{dx_j}(\rho u_i u_j) + \frac{dp}{dx_i} = \frac{d}{dx_i}(\tau_{ij} + \tau_{ij}^R) + S_i + S_{ji}^p, \quad i = 1,2,3; \quad j = 1,2,3. \quad (3.1)$$

$$\frac{d\rho H}{dt} + \frac{d\rho u_i H}{dx_i} = \frac{d}{dx_i}$$

$$H = h(P, T, y) + \frac{u^2}{2} + k,$$

де  $u$  – швидкість рідини,

$\rho$  – густина рідини,

$S_i$  – розподілена за масою зовнішня сила на одиницю маси, зумовлена опором пористого середовища, силою тяжіння та відцентровою силою.

$H$  – повна ентальпія в локальній системі відліку,

$h(P, T, y)$  – теплова ентальпія при заданому тиску ( $P$ ), температурі ( $T$ ) та складі суміші компонентів,

$k$  – кінетична енергія турбулентності,

$Q_H$  – джерело або поглинач тепла в одиниці об'єму,

$\tau_{ij}$  – тензор в'язких напружень зсуву,

$q_i$  – дифузійний тепловий потік.

Дослідження кавітаційних моделей проводиться за такими припущеннями. Вважається, що рідина є однорідною газорідинною сумішшю, в якій газова фаза складається з пари та неконденсованого (розчиненого) газу. Масова частка пари визначається за термодинамічними умовами локальної рівноваги. Масова частка розчиненого газу є константою, яка може бути змінена користувачем.

Швидкості і температури газоподібної (включаючи пару і газ, що не конденсується) і рідкої фаз вважаються однаковими.

У кавітаційних моделях зроблено такі припущення та обмеження:

- у рівноважній кавітаційній моделі кавітація наразі доступна лише для попередньо визначеної води (при визначенні рідин проекту слід вибрати воду зі списку попередньо визначених рідин).

- кавітаційний процес вважається рівноважним.

- суміш вважається однорідною двофазною рідиною, швидкості і температури газоподібної (включаючи пару і газ, що не конденсується) і рідкої фаз вважаються однаковими.

- модель не описує детальної структури кавітаційної області, тобто параметрів окремих бульбашок пари та міграції бульбашок.
- температура і тиск в області фазового переходу мають бути в таких межах:  $280.15 \text{ К} < T < 583.15 \text{ К}$ ,  $10^3 \text{ Па} < P < 10^7 \text{ Па}$ .
- об'ємна частка пари обмежена 0,95. Параметри потоку при початкових і граничних умовах повинні задовольняти цю вимогу.
- опція Кавітація не застосовується, якщо ви розраховуєте потік рідини в моделі без отворів для потоку (вхідного і вихідного).
- область рідини, в якій відбувається кавітація, повинна бути розділена дрібною розрахунковою сіткою.
- якщо розрахунок завершився або був зупинений, а опція Кавітація була увімкнена або вимкнена, розрахунок не може бути відновлений або продовжений і повинен бути перезапущений з самого початку.

Густина газорідинної суміші розраховується як:

$$\rho = \frac{1}{v}, v = y_g \frac{R_{унів} T}{P \mu_g} + (1 - y_g - y_v) v_l(T, P) + y_v \frac{R_{унів} T z_v(T, P)}{P \mu_v}, \quad (3.2)$$

де  $v$  – питомий об'єм газорідинної суміші,

$v_l$  – питомий об'єм рідини,

$z_v(T, P)$  – коефіцієнт стисливості пари,

$R_{унів}$  – універсальна газова стала,  $P$  - місцевий статичний тиск,  $T$  - місцева температура,

$y_v$  – масова частка пари,

$\mu_v$  – молярна маса пари,

$y_g$  – масова частка газу, що не конденсується;

$\mu_g$  – молярна маса газу, що не конденсується.

Властивості розчиненого газу, що не конденсується, прирівнюються до властивостей повітря. За замовчуванням масову частку газу, що не

конденсується, встановлено на рівні  $10^{-4}$ . Це типове значення моделі, яке використовується в більшості випадків, але може бути змінено користувачем в діапазоні  $10^{-3} \dots 10^{-5}$ .

Масова частка пари  $y_v$  визначається чисельно з такого нелінійного рівняння для повної ентальпії газорідинної суміші:

$$H = y_g h_g(T, P) + \quad (3.3)$$

$$I_c =$$

де температура суміші  $T$  є функцією тиску  $P$  та  $y_v$ .

$h_g, h_b, h_v$  – ентальпії неконденсованого газу, рідини та пари, відповідно,

$k$  – турбулентна енергія,

$I_c$  – квадратичний імпульс, визначений як:  $I_c =$

Для оцінки режиму течії рідини крізь насадки застосовано визначення числа Рейнольдса, що характеризує гідродинамічні умови в потоці і стан рідини. Число Рейнольдса для рідини, що тече в циліндричній трубці і визначається рівнянням:

$$Re = \frac{VD\rho}{\mu}, \quad (3.4)$$

де  $V$  – середня швидкість потоку, м/с;

$D$  – діаметр трубки, м;

$\mu$  – в'язкість, Па·с;

$\rho$  – густина рідини, кг/м<sup>3</sup>.

В якості параметра для характеристики кавітаційних явищ в середині досліджуваних статичних кавітаторів використовувалось число кавітації  $\chi$ , як один з найбільш важливих параметрів.

Кавітаційне число розраховували за формулою:

$$\chi = \frac{P - P_{\text{кав.}}}{\frac{1}{2}\rho V^2}, \quad (3.5)$$

де  $P$  – тиск перед соплом, Па;

$V$  – швидкість течії в соплі, м/с;

$P_{\text{кав}}$  – мінімальний тиск в потоці, Па.

Вважається, що при числах кавітації  $\chi > 2$  кавітація відсутня, при значеннях  $\chi$  від 1,0 до 2,0 кавітація має місце, а найбільша інтенсивність кавітації при  $\chi < 1$ .

### **3.6 Методика проведення багатofакторного експерименту для визначення кінематичних та конструктивних характеристик обладнання кавітаційно-магнітного оброблення**

В попередніх розділах було з'ясовано, що на продуктивність зміни властивостей води впливає швидкість та відстань між постійними магнітами відповідно зміни магнітної індукції вздовж потоку за часом багатократного проходження потоку.

З огляду на це, що на показник рН впливає низка чинників, було запропоновано використати багатofакторне дослідження для визначення зміни його значення. Згідно з математичним методом планування дослідів, перед початком випробувань було здійснено пошукові експериментальні дослідження щодо вибору діапазону меж параметрів проведення випробувань. Завдяки застосуванню математичного апарату [157-158] формалізовано експериментальні дії, дослідження проведено з варіюванням заздалегідь визначених чинників, рівні чинників прийнято за спеціальними обчисленнями, кількість дослідів зведено до мінімуму.

Для з'ясування зміни величини максимального пульсуючого тиску струменя з насадку визначено основні змінні фактори, які впливали на його величину:

$x_1$  – рівень магнітної індукції;

$x_2$  – швидкість потоку рідини;

$x_3$  – відстань між постійними магнітами.

Проведено кодування факторів для переведення їх у безрозмірні величини для побудови плану-матриці експерименту. Оброблення отриманих результатів експериментальних даних проводили за загальновідомими методиками та методами кореляційного й регресійного аналізу експериментальних даних для отримання у кінцевому результаті емпіричних рівнянь регресії [157-158].

Тому для отримання регресійної моделі залежності рН було вибрано відповідний умовний план експерименту – центральне композиційне рототабельне планування другого порядку. Оскільки, під час проведення експериментів, змінні незалежні фактори неоднорідні та мають різний вплив на величину максимального пульсуючого тиску струменя, то їх приводили до єдиної системи обрахунків шляхом переходу від дійсних значень до кодованих.

Зв'язок між кодованими  $x_i$  та натуральними  $X_i$  змінними факторами встановлюється за залежністю [157-158]:

$$x_i = \frac{X_i - X_{i0}}{\Delta X_i}, \quad (3.4)$$

де  $X_{i0}$  – натуральне значення  $i$ -го фактору на нульовому рівні;

$\Delta X_i$  – інтервал варіювання  $i$ -го фактору.

Багатофакторний експеримент проведено на трьох рівнях варіювання факторами. Нульовий рівень або середнє значення кожного вхідного фактору, визначено за формулою:

$$X_{0i} = \frac{X_{i\max} + X_{i\min}}{2}, \quad (3.5)$$

де  $X_{0i}$  – числове значення нульового рівня вхідного фактору;

$X_{i\max}$  – числове значення верхнього рівня вхідного фактору;

$X_{i\min}$  – числове значення нижнього рівня вхідного фактору.

Інтервали варіювання факторами визначалися за залежністю:

$$\Delta X_i = \frac{X_{i \max} - X_{i \min}}{2}. \quad (3.6)$$

Для побудови план-матриці експериментів введено умовні позначення верхнього, нижнього та нульового рівнів варіювання факторів, відповідно +1, -1, 0.

Визначено основний (нульовий) рівень для кожного фактору:

- для рівня магнітної індукції:

$$X_{01} = \frac{600 + 1200}{2} = 900(\text{мТл}),$$

- для швидкості потоку рідини:

$$X_{02} = \frac{2 + 4}{2} = 3(\text{м/с}),$$

- для відстані між постійними магнітами.

$$X_{03} = \frac{15+35}{2} = 25(\text{мм}), .$$

Інтервали варіювання та кодовані значення вибраних

факторів відповідно дорівнюють:

$$\Delta X_1 = \frac{1200-600}{2} = 300(\text{мТл}), \Delta X_2 = \frac{4-2}{2} = 1(\text{м/с}), \Delta X_3 = \frac{35-15}{2} = 10(\text{мм}),$$

У випадку для трьох факторів модель другого порядку можна записати такою регресійною залежністю [157-158]:

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_{12} x_1 x_2 + b_{13} x_1 x_3 + b_{23} x_2 x_3 + b_{11} x_1^2 + b_{22} x_2^2 + b_{33} x_3^2. \quad (3.7)$$

де  $y$  – функція, що досліджується;

$b_0, b_1, b_2, b_3, b_{12}, b_{13}, b_{23}, b_{11}, b_{22}, b_{33}$  – вибіркові коефіцієнти рівняння регресії;  $x_1, x_2, x_3$  – незалежні змінні.

Для визначення адекватної моделі залежності максимального тиску пульсуючого струменя від конструктивних параметрів та режимів роботи приводу був реалізований центральний композиційний ротатабельний план другого порядку при сукупності трьох факторів ( $k = 3$ ). Рівні та інтервали варіювання незалежних змінних, а також робоча матриця плану проведення експериментів наведена в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1

## Фактори та рівні їх варіювання

Рівні варіювання досліджуваних факторів	Досліджувані фактори					
	рівень магнітної індукції, мТл		швидкості потоку рідини, м/с		відстані між постійними магнітами, мм	
	$x_1$	$x_1$	$x_2$	$x_2$	$x_3$	$x_3$
Зоряна точка $+a$		+1,682		+1,682		+1,682
Верхній рівень $X_{i\max}$	1200	+1	4	+1	35	+1
Нульовий рівень $X_{01}$	900	0	3	0	10	0
Нижній рівень $X_{i\min}$	600	-1	2	-1	25	-1
Зоряна точка $-a$		-1,682		-1,682		-1,682

Для симетричного ротатабельного композиційного плану для трьох факторів варіювання маємо:  $n_{\text{я}} = 8$ ;  $n_a = 6$ ;  $n_o = 6$ .

Кількість повторювань в одній серії експериментів приймемо рівною двом, тоді  $N = 34$ . Зоряне плече  $a = \pm 1,682$  [157-158].

Після обробки результатів дослідів знаходиться оцінка вільного члена лінійної моделі та середнє значення експериментальних даних отриманих у центрі плану:

$$b_0' = \frac{\sum_{u=1}^8 \bar{y}_u}{n_{\text{я}}}; \quad \bar{y}_0 = \frac{\sum_{i=1}^{n_0} y_{0i}}{n_0}, \quad (3.9)$$

де  $y_u$  – середні експериментальні дані в  $u$ - му рядку;

$y_0$  – середнє значення експериментальних даних у центрі плану;

$y_{0i}$  – значення експериментальних даних у центрі плану.

Дисперсія помилок спостереження визначена за результатами паралельних дослідів в центрі плану:

$$S_{n_0}^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n_0} (y_{0i} - \bar{y}_0)^2}{n_0 - 1}. \quad (3.10)$$

Число ступенів свободи дисперсії:

$$f_{n_0} = n_0 - 1. \quad (3.11)$$

При рівні значущості  $\alpha = 0,05$  і  $f_{n_0} = 5$  знаходиться табличне значення  $t_T$  критерію Стюдента  $t_T = 2,571$  [157-158].

Знаходиться значущість відмінності між завбаченим ( $b_0$ ) і спостережуваним ( $y_0$ ) значеннями функції відгуку в центрі плану, використовуючи залежність:

$$|\bar{y}_0 - b_0| \geq t_{TC} \cdot S_{n_0} \cdot \sqrt{\frac{(n_0 + n \cdot n_{\text{я}})}{n_0 \cdot n_{\text{я}}}}. \quad (3.12)$$

Якщо умова (3.9) виконується, відмінність вважається значущою. Це свідчить про істотний вплив на функцію відгуку ефектів при квадратичних членах і про необхідність постановки додаткових дослідів, щоб дістати квадратичну модель. Оскільки при розгляді експериментів умова (3.12) виконувалась, в подальшому були розглянуті досліді в зоряних точках.

План експерименту та результати дослідів показано в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2.

## План проведення експерименту

№	Матриця планування										$y_{i1}$	$y_{i2}$	$y_i$
	$x_0$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x^2_1$	$x^2_2$	$x^2_3$	$x$	$x$	$x$			
1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	$y_{11}$	$y_{12}$	$y_1$
2	+1	+1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	-1	+1	$y_{21}$	$y_{22}$	$y_2$
3	+1	-1	+1	-1	+1	+1	+1	-1	+1	-1	$y_{31}$	$y_{32}$	$y_3$
4	+1	+1	+1	-1	+1	+1	+1	+1	-1	-1	$y_{41}$	$y_{42}$	$y_4$
5	+1	-1	-1	+1	+1	+1	+1	+1	-1	-1	$y_{51}$	$y_{52}$	$y_5$
6	+1	+1	-1	+1	+1	+1	+1	-1	+1	-1	$y_{61}$	$y_{62}$	$y_6$
7	+1	-1	+1	+1	+1	+1	+1	-1	-1	+1	$y_{71}$	$y_{72}$	$y_7$
8	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	$y_{81}$	$y_{82}$	$y_8$
9	+1	+1,682	0	0	2,828	0	0	0	0	0	$y_{91}$	$y_{92}$	$y_9$
10	+1	-1,682	0	0	2,828	0	0	0	0	0	$y_{101}$	$y_{102}$	$y_{10}$
11	+1	0	+1,682	0	0	2,828	0	0	0	0	$y_{111}$	$y_{112}$	$y_{11}$
12	+1	0	-1,682	0	0	2,828	0	0	0	0	$y_{121}$	$y_{122}$	$y_{12}$
13	+1	0	0	+1,682	0	0	2,828	0	0	0	$y_{131}$	$y_{132}$	$y_{13}$
14	+1	0	0	-1,682	0	0	2,828	0	0	0	$y_{141}$	$y_{142}$	$y_{14}$
15	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	$y_{151}$	$y_{152}$	$y_{15}$
16	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	$y_{161}$	$y_{162}$	$y_{16}$
17	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	$y_{171}$	$y_{172}$	$y_{17}$
18	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	$y_{181}$	$y_{182}$	$y_{18}$
19	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	$y_{191}$	$y_{192}$	$y_{19}$
20	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	$y_{201}$	$y_{202}$	$y_{20}$

Коефіцієнти моделі другого порядку (3.4) визначаються за формулами [157-158]:

$$\begin{aligned}
 b_0 &= 0,166338 \sum_{u=1}^n y_u - 0,056791 \sum_{u=1}^n \sum_{i=1}^k x_{iu}^2 \cdot y_u; \\
 b_i &= 0,073224 \sum_{u=1}^n x_{iu} \cdot y_u; \\
 b_{ij} &= 0,1250 \sum_{u=1}^n x_{iu} \cdot x_{ju} \cdot y_u; \\
 b_{ii} &= 0,0625 \sum_{u=1}^n x_{iu}^2 \cdot y_u + 0,006889 \sum_{i=1}^k \sum_{u=1}^n x_{iu}^2 \cdot y_u - 0,056791 \sum_{u=1}^n y_u.
 \end{aligned} \tag{3.13}$$

де  $x_{iu}$  – значення кодової змінної у відповідному стовпці плану експерименту;

$y_u$  – середній результат  $u$ -го досліду;

$u$  – порядковий номер досліду;

$i$  – номер фактору;

$j, k$  – номер фактору, відмінного від  $i$ -го;

$N$  – кількість серій дослідів.

Щоб перевірити значущість коефіцієнтів, знаходяться їх дисперсії за формулами:

$$S_{b_0}^2 = a_8 \cdot S_n^2; \quad S_{b_i}^2 = a_9 \cdot S_n^2; \tag{3.14}$$

$$S_{b_{ij}}^2 = a_{10} \cdot S_n^2; \quad S_{b_{ii}}^2 = a_{11} \cdot S_n^2,$$

де  $S_n^2$  – дисперсія помилки досліду;

$a_8, a_9, a_{10}, a_{11}$ , – допоміжні константи, наведені у літературі [157-158].

Дисперсію помилки досліду знаходиться за формулою:

$$S_n^2 = \frac{\sum_{u=1}^{N-n_0+1} S_u^2}{N-n_0+1}, \quad (3.15)$$

де  $S_u^2$  – дисперсія помилки у рядках плану.

Дисперсію помилки у рядках плану знаходиться за формулою:

$$S_u^2 = \frac{\sum_{i=1}^u (y_{ui} - \bar{y}_u)^2}{n-1}, \quad (3.16)$$

де  $y_{ui}$  – паралельний результат  $u$ -го дослідження.

Також визначається надійні інтервали коефіцієнтів за залежностями:

$$\Delta b_0 = t_T \cdot S_{b_0}; \quad \Delta b_i = t_T \cdot S_{b_i}; \quad \Delta b_y = t_T \cdot S_{b_y}; \quad \Delta b_u = t_T \cdot S_{b_u},$$

де  $t_T$  – значення  $t$ -критерію Стьюдента, яке вибирається при заданому рівні значущості  $\alpha$  і числі ступенів свободи  $f_n$ .

Якщо виконується умова  $|b_i| \geq \Delta b_i$ , то коефіцієнти регресії вважаються значущими, тобто їх вплив на функцію відгуку перевищує похибки вимірювання.

Гіпотеза про адекватність отриманої математичної моделі перевіряється за допомогою критерію Фішера [157-158]:

$$F = \frac{S_n^2}{S_n^2}, \quad (3.17)$$

де  $S_n^2$  – дисперсія адекватності.

Дисперсія адекватності визначається за формулою:

$$S_H^2 = \frac{\sum_{u=1}^{N-n_0+1} n \cdot (\bar{y}_u - y_u)}{N - k' - (n_0 - 1)}, \quad (3.18)$$

де  $y_u$  – значення функції в  $u$ -му рядку, обчислене за знайденою математичною моделлю;

$k$  – кількість значущих коефіцієнтів рівняння регресії.

Якщо отриманий критерій Фішера є меншим табличного  $F < F_T$ , вибраного при знайденому значенні надійної ймовірності  $a$  і числа ступенів свободи  $f_H, f_n$ , то отримана модель вважається адекватною, її можна використовувати для опису процесу, що досліджується.

За результатами розрахунків можливо побудувати залежності двомірних перерізів поверхні відгуку для наочного зображення результатів проведених експериментальних досліджень.

### **3.7 Методика та прилади проведення досліджень структурного стану та визначення показників води**

Наступним етапом аналізу впливу кавітаційно-магнітного поля на структуру води було проведено кристало-оптичний аналіз вигляду осаду висушеної краплі води із застосування мікроскопа МІМ-10 з виводом зображення на персональний комп'ютер електронного зображення.

Спочатку було утворено краплю води без оброблення на прозорому склі, а потім утворено краплю води після оброблення протягом 15 хвилин. Вони були висушені в натуральних умовах при температурі 20°C.

Сутністю способу кристало-оптичного аналізу структурної будови води [159] є аналіз вигляду та розташування, розмірів та форми елементів структурних утворень осаду, висушеної краплі води, утвореної після незалежного способу активації води.

Одною з головних умов кристалізації є перенасичений стан розчину, який виникає при висушуванні краплі води. Унаслідок фазових перетворень формуються центри кристалізації, на яких і відбувається виділення речовини, що кристалізується. Таким чином, кінетика кристалізації визначається такими чинниками: перенасиченням, виникненням мінізародків (первинних аморфних часток), їхнім зростанням і, нарешті, утворенням центрів кристалізації.

Спочатку можуть формуватися короткі ланцюги або плоскі мономолекулярні шари. За цих умов відштовхуючі сили молекул (іонів) одна від одної виявляються меншими за сили їхнього взаємного притягання, й рівнодіюча цих сил призводить до агломерації цих молекул (іонів), до утворення ними елементів кристалічної ґратки.

Вода підлягала активації в обладнанні різними методами, як приклад, за допомогою віброкавітації з накладанням на немагнітний канал проходження води постійних магнітів.

Проводилося нанесення на чисте знежирене предметне скло краплі досліджуваної води та висушування її при кімнатній температурі до отримання осаду. Далі предметне скло, з осадом від краплі води, розташовувалось на столику мікроскопа (МБС-10) і структурні утворення осаду підлягали мікроскопіюванню з фіксацією на відеокамеру з подальшою передачею на персональний комп'ютер зі створенням фотографії цифрового зображення.

У дослідженнях стояло завдання визначення зміни показника рН води за часом при різних швидкостях проходження води крізь блок постійних магнітів та оцінювання зміни структурного стану води кристало-оптичним методом [159] з наступним аналізом термостатичного вимірювання температури кипіння води, обробленої кавітаційно-магнітним полем.

Для вимірювання параметрів води (стану рН, окислювального-відновлювального потенціалу, рівня загальної мінералізації) застосовувались прилади: рН Meter (рН-061), ORP TESTER 169B, TDS-3. Загальний вигляд приладів показано на рис. 3.13.

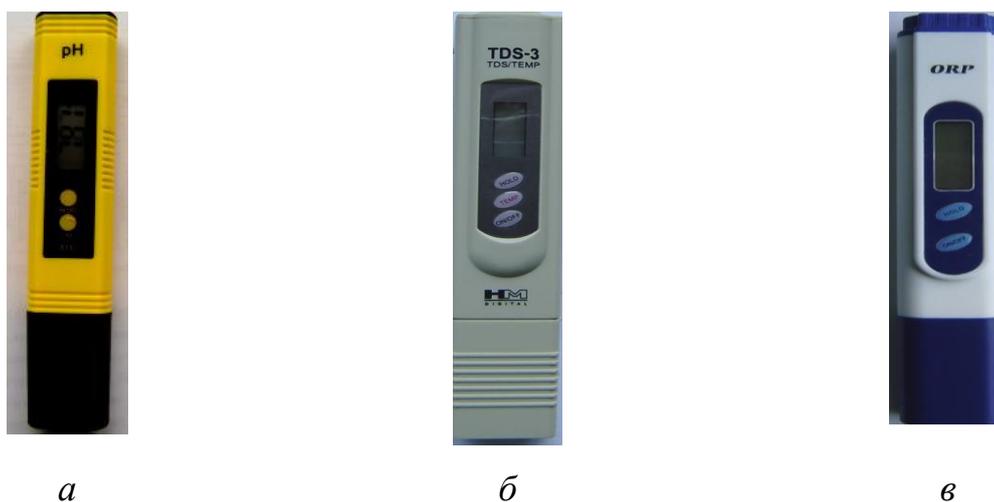


Рис. 3.13. Загальний вигляд вимірювальних приладів: *а* – рН Meter;  
*б* – TDS-3; *в* – ORP TESTER;

Вимірювання параметрів водного середовища проводилось до і після оброблення у дослідній установці для зміни властивостей водопровідної води шляхом відбору зразків води з бака об'ємом 100 мл та зануренням електродів приладів у ємність з відібраним зразком води з фіксацією показників на електронному табло.

### **3.8 Обробка експериментальних даних та оцінка точності отриманих результатів**

Для зниження випадкових помилок виконували контрольні вимірювання, а для усунення систематичних помилок усі вимірювальні прилади були калібровані та протаровані.

Ключові експерименти проводились як однофакторні, тобто змінювався лише один фактор, зберігаючи інші без змін. Кількість експериментів обиралася не менше п'яти згідно з рекомендаціями [158], а місця перегину кривих досліджувалися за допомогою ще п'яти експериментів.

Обробка результатів експерименту здійснювалась із використанням методів математичної статистики. Визначалося середнє арифметичне значення вимірювань:

$$\bar{X} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i, \quad (3.6)$$

де  $N$  – кількість вимірювань;

$x_i$  – значення величини, яка вимірюється в  $i$  - дослідженні.

Абсолютна похибка вимірювання обчислювалася за формулою:

$$\Delta X_i = X_i - \bar{X}. \quad (3.7)$$

Середнє значення відхилень змінної:

$$\delta = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N \Delta X_i^2}{N-1}}. \quad (3.8)$$

Величина стандартного відхилення середнього значення:

$$\delta_m = \frac{\delta}{N}.$$

Графічні залежності будували на основі середнього значення відповідних серій досліджень.

## РОЗДІЛ 4

### РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ, ОБГРУНТУВАННЯ КОНСТРУКТИВНИХ ПАРАМЕТРІВ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ВОДОПІДГОТОВКИ ТА МЕТОДИКА ПРОЄКТУВАННЯ

#### 4.1 Побудова аналітичної моделі роботи вібраційної машини для кавітаційної зміни складу та властивостей води

Аналітичні моделі являють собою явні вирази вихідних параметрів як функцій вхідних і внутрішніх параметрів. Такі моделі характеризуються високою економічністю, однак отримання їх вдається, як правило, при прийнятті суттєвих припущень і обмежень, що знижують точність і звужують область адекватності моделі.

Розглянемо роботу конструктивної моделі вібраційної машини для здійснення кавітаційного впливу на властивості води та зміни її сольового складу. Вібраційна машина працює (рис. 4.1) таким чином: у бак заливається вода, відкривається кран випуску повітря і вода заливається у циліндричну камеру пульсації вібраційної машини, кран закривається. Включається електродвигун і ексцентриковий вібратор приводить у зворотно-поступальний рух поршень. Зміна параметрів приводу проводилася таким чином: частота коливань змінювалася зміною напруги на двигуні постійного струму, а регулювання амплітуди виконувалося ступенево — заміною ексцентрика.

При ході поршня вниз рідина стискається та виштовхується у бак, а при ході вгору рідина втягується у циліндричну ємність – камеру пульсації. Після проведення оброблення кавітацією вода зливається у накопичувальний бак відстою.

З попередніх експериментальних досліджень [29-31] встановлено, що величина максимального миттєвого тиску у камері пульсації залежить від режимів роботи приводу та інших конструктивних параметрів: амплітуди  $A$  та

частоти коливань поршня  $f$  і, відповідно, від співвідношення діаметра поршня  $D$  до діаметра насадка  $d$ .

Так як головний фактор в утворенні кавітаційного процесу – це величина перепаду максимального миттєвого тиску у камері пульсації, тому було застосовано диференціальне рівняння руху ідеальної рідини у вібраційній машині в сталому режимі.

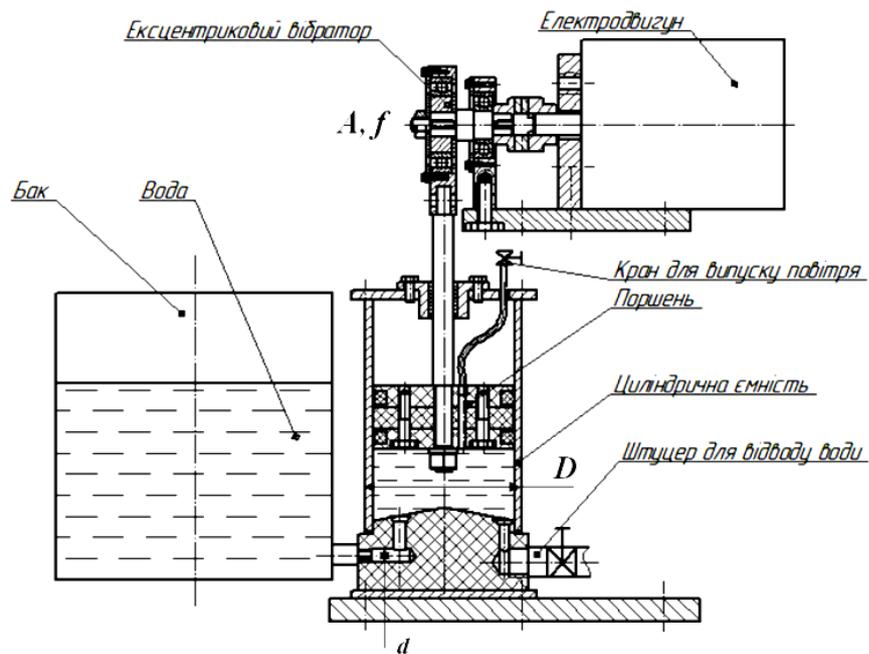


Рис. 4.1 Принципова схема вібраційної машини кавітаційної підготовки води для тепломереж:  $A$  – амплітуда коливань приводу;  $f$  – частота коливань приводу;  $D$  – діаметр камери пульсації;  $d$  – діаметр насадка

Для схеми вібраційної машини кавітаційної підготовки води для тепломереж (рис. 4.1) побудуємо аналітичну модель у момент стиску ідеальної рідини (ходу поршня униз), яка описується рівнянням:

$$m\ddot{x} + k\dot{x} + cx = F, \quad (4.1)$$

де  $\ddot{x} = \frac{\varepsilon D_k^2 \cdot A_k \cdot f^2}{d_H^2}$  – прискорення рухомих частин та приєднаної

маси рідини;

$\dot{x} = \frac{\varepsilon D_k^2 \cdot A_k \cdot f}{d_H^2}$  – швидкість руху рідини;

$x = 2A_k$  – величина переміщення поршня;

$F$  – сила, яка діє на поршень,  $F = \Delta P \frac{\pi D_k^2}{4}$  ;

$C$  – швидкість розповсюдження ударної хвилі (1350 м/с.);

$m$  – маса поршня зі штоком;

$$k = \frac{8\pi \cdot D_k^4 \cdot \eta \cdot l}{d_H^2 \cdot N},$$

$k$  – демпфуюча здатність поршня з рідиною та отвором

де  $\eta$  – динамічний коефіцієнт в'язкості,  $\eta = 0,898$  Мпа/с;

$l$  – довжина отвору,  $l = 0,05$ м;

$N$  – кількість отворів,  $N = 1$ ;

$\varepsilon$  – коефіцієнт звуження потоку у насадку,  $\varepsilon = 0,8$ .

Провівши підстановку у ф. 4.1 відповідних значень отримаємо таку залежність:

$$\frac{\varepsilon D_k^2 A_k}{d_H^2} m f^2 + k \frac{\varepsilon D_k^2 A_k}{d_H^2} f + c \cdot 2A_k = \Delta P \frac{\pi D_k^2}{4}. \quad (4.2)$$

Провівши перетворення, отримаємо залежність максимального миттєвого тиску у камері пульсації від параметрів приводу та інших конструктивних параметрів:

$$\frac{4\varepsilon A_k}{\pi d_n^2} m f^2 + k \frac{4\varepsilon A_k}{\pi d_n^2} f + c \frac{8 A_k}{\pi D_k^2} = \Delta P. \quad (4.3)$$

Згідно з рівнянням (4.3) проведено розрахунок тиску  $\Delta P$  за допомогою MathCad при зміні частоти коливань та різних діаметрів насадків і побудовано залежності, які представлені на рис. 4.2.

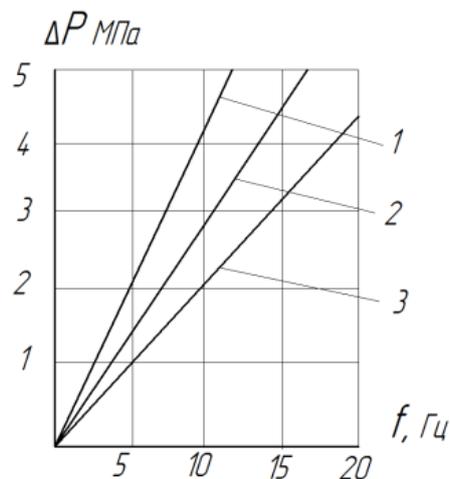


Рис. 4.2 Графік зміни розрахункового максимального миттєвого тиску для ідеальної рідини у камері пульсації від частоти при різних діаметрах насадка: 1 – 6 мм; 2 – 10 мм; 3 – 12 мм; при амплітуді коливань  $A = 0,002$  м

У результаті проведених розрахунків [162-163] встановлено, що на максимальний миттєвий тиск ідеальної рідини у камері пульсації впливає як частота коливань приводу, так і розмір насадка при незмінному діаметрі камери пульсації. Збільшення діаметра насадка призводить до зменшення максимального миттєвого тиску.

Тому для отримання ефективної продуктивності та необхідного об'єму витоку рідини прийнято насадок 10 мм при збереженні значного тиску у камері пульсації.

Слід зауважити, що розрахунковий максимальний миттєвий тиск отримано для ідеальної рідини без урахування виникнення кавітаційних пухирців.

#### **4.2 Дослідження впливу конструктивних параметрів та режимів роботи приводу обладнання для отримання максимальної продуктивності**

З попередніх досліджень [29-31] відомо, що продуктивність вібраційної машини залежить від тиску, який виникає у камері пульсації, та величини тиску струменя з насадка  $d$ , а також від режимів роботи вібраційного приводу амплітуди і частоти та співвідношення конструктивних параметрів і є функцією цих параметрів за часом.

$$Q = Ft\left(\Delta P; \frac{d^2}{D^2}; A; f; P\right), \quad (4.4)$$

де  $Q$  – продуктивність;

$\Delta P$  – зміна тиску у камері пульсації;

$\frac{d^2}{D^2}$  – співвідношення діаметру насадка та діаметра камери пульсації;

$A$  – амплітуда коливання поршня;

$f$  – частота коливання поршня;

$P$  – максимальний миттєвий тиск струменя з насадка.

Експериментальне дослідження зміни максимального миттєвого тиску  $\Delta P$  в камері пульсації для реальної рідини (рис. 4.3) залежно від різних параметрів було проведено за допомогою датчика тиску MPM489 та USB-

осцилографу VM8020. Результати фіксували на персональному комп'ютері із застосуванням програмного забезпечення «DiSCO» (рис. 4.4).

Оброблені результати експериментальних досліджень з вимірювання максимального миттєвого тиску для реальної рідини представлені на рис. 4.3. Дані максимального миттєвого тиску отримані з урахуванням кавітаційних процесів у насадку та камері пульсації [170].

Тому для використання аналітичної залежності 4.3. необхідно ввести коригувальний коефіцієнт.

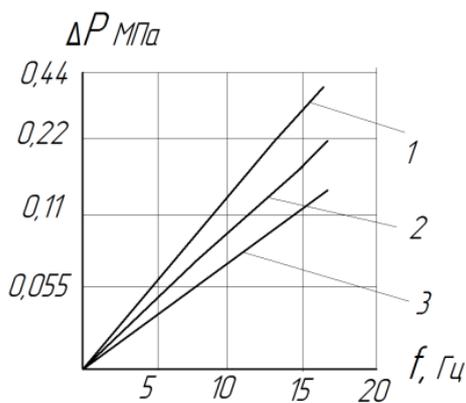


Рис. 4.3 Результати

експериментального визначення зміни тиску у камері пульсації від частоти при різних діаметрах насадка: 1 – 6 мм; 2 – 10 мм; 3 – 12 мм при амплітуді коливань  $A = 0,002$  м

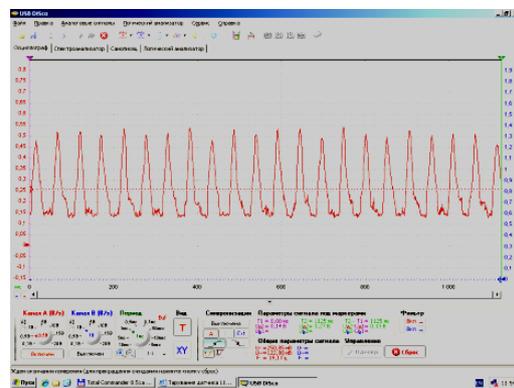


Рис. 4.4 Скріншот осцилограми з екрана монітора зміни тиску у камері пульсації

Провівши порівняння значень тиску для ідеальної рідини (рис. 4.2) із значеннями тиску для реальної рідини (рис. 4.3), встановлено розбіжність результатів. Пояснити це можливо аналізом припущень, закладених у рівняння (4.2), а саме: швидкість поширення ударної хвилі прийнято для гідроудару – 1350 м/с, або можливо вона залежить від швидкості зростання тиску при коливанні поршня за цикл коливання та неможливістю врахування виникнення рою кавітаційних пухирців, що збільшують пружність середовища. Тому для

практичного користування у розрахунках при проєктуванні вібраційних машин введемо коригувальний коефіцієнт  $\delta = 0,04 - 0,07$  [162-163]. Отримаємо рівняння для визначення тиску у камері пульсації для реальної рідини.

$$\frac{4\varepsilon A_k}{\pi d_H^2} m f^2 + k \frac{4\varepsilon A_k}{\pi d_H^2} f + c \frac{8 A_k}{\pi D_k^2} = \delta \Delta P, \quad (4.5)$$

де  $\delta$  – коригувальний коефіцієнт.

### 4.3 Визначення параметрів приводу вібраційної машини для отримання оптимальної продуктивності

Об'єм для ідеальної рідини, що виштовхується з насадка за цикл коливання, визначається за формулою:

$$U = 2A_k \frac{\pi D_k^2}{4} \quad (4.6)$$

Але для реальної рідини, під час руху поршня вгору, рідина проходить крізь насадок із виникненням кавітаційних процесів, у камері пульсації і виникає її розрив з утворенням кавітаційних пухирців, які у свою чергу зменшують об'єм рідини, який втягується у камеру пульсації, і, відповідно, при стисканні такої суміші проходить сплескування пухирців і витискається менший об'єм рідини, що призводить до зменшення продуктивності роботи вібраційної машини.

Для визначення динамічного напору  $P$  струменя для реальної рідини з насадку було застосовано мембранний датчик тиску, розташований на зрізі насадка на відстані 15 мм та підключений до апаратури, яка реєструє зміну величини тиску струменя від частоти у вигляді осцилограми (рис. 4.5).



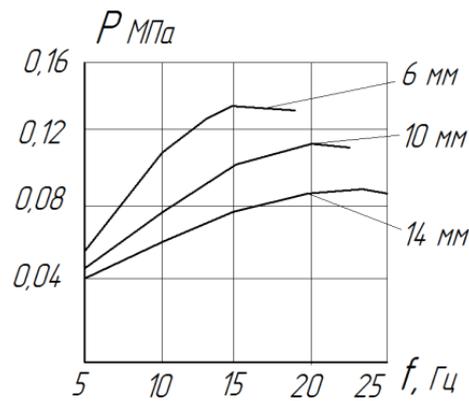


Рис. 4.6. Графік залежності величини максимального динамічного напору струменя з отвору від діаметра насадка при зміні частоти  $f$  при ході поршня униз: при амплітуді коливань приводу  $A = 0,002$  м;  $D_n = 100$  мм

Провівши дослідження з вимірювання величини динамічного напору з насадка при різних частотах коливання поршня встановлено, що зі збільшенням частоти коливань величина динамічного напору струменя з насадка має нелінійний характер внаслідок виникнення у камері пульсації кавітаційних пухирців (зі зміною їхніх розмірів від частоти пульсації), які, у свою чергу, зменшують об'єм рідини, який втягується у камеру пульсації і, відповідно, при стисканні такої суміші проходить сплескування пухирців і витискається менший об'єм рідини з меншою швидкістю і, відповідно, з меншим тиском, що призводить до зменшення продуктивності роботи вібраційної машини.

Для запропонованих режимів роботи приводу та прийнятих конструктивних розмірів визначено максимальну продуктивність вібраційної машини для зміни складу та властивостей води при наступних параметрах, що отримані при дослідженнях [162-163], за умови виштовхування об'єму рідини за одиницю часу (година):

$$Q = \frac{\pi D^2}{4} 2A \cdot f \cdot 3600 = \frac{3,14 \cdot 0,1^2}{2} 0,002 \cdot 20 \cdot 3600 = 2,26 \frac{\text{м}^3}{\text{год}}. \quad (4.7)$$

#### 4.4 Результати моделювання та аналіз кавітаційних процесів у статичних кавітаторах для зміни складу та властивостей води

Для визначення конструктивних параметрів статичного кавітатора було запропоновано провести моделювання кавітаційних процесів у SOLIDWORKS у різних за конструктивними особливостями статичних кавітаторів [166-167].

В умовах турбулентного і кавітаційного режимів у системі відрізняється її енергетичний розподіл. У першому випадку введення в рідину енергії викликає її турбулентне перемішування і характеризується нерівномірною зміною швидкості з часом, що супроводжується інтенсивним перемішуванням рідини з пульсаціями швидкостей та тисків, спостерігаються поперечні переміщення та обертальні рухи окремих об'ємів рідини.

Гідродинаміка у кавітаційному режимі є складнішою. При цьому режимі поряд із утворенням у рідині великомасштабних пульсацій, як при турбулентному режимі, одночасно відбуваються дрібномасштабні пульсації, утворення і сплескування кавітаційних бульбашок, виникнення кумулятивних мікроструменів, зміна тисків і температур та інші кавітаційні ефекти.

Розрахунок числа  $Re$  для руху потоку через насадок дає можливість оцінити значення величини швидкостей і ступеня турбулізації. Зі збільшенням діаметру насадка від 0,004 м до 0,012 м швидкість потоку зменшується, а число Рейнольдса збільшується.

Подальше збільшення діаметру сопла призводить до поступового зменшення числа  $Re$ . Вважається, що чим вищим є число Рейнольда, тим меншим є розмір утворених кавітаційних пухирців і процес відбувається більш ефективно. Таким чином, збільшення діаметру сопла понад 0,012 м є недоцільним [47].

Тому для досліджень було проаналізовано насадки з внутрішнім діаметром насадка 0,002 м та 0,006 м. Було визначено число Рейнольда, яке характеризує виток рідини при даних умовах  $Re = 33707$ , згідно з яким можна

зробити висновок, що режим течії турбулентний ( $Re < 2320$  режим вважається ламінарним, при  $Re > 2320$  – турбулентним).

Для конструкції гідродинамічного кавітаційного реактора статичного типу важливо зафіксувати параметри роботи: швидкість, тиск та число кавітації, що впливають на процес.

Виникнення та ступінь кавітації через насадки, які вказані вище, прогнозується за допомогою безрозмірного числа, яке називається числом кавітації  $\chi$ , на яке сильно впливають характеристики кавітаційного насадка, включаючи діаметр, коефіцієнт тиску та його геометрію.

Виходячи з аналізу літературних джерел, для досліджень було визначено та застосовано найбільш прийнятні для здійснення процесу основні конфігурації конструкції статичних кавітаторів за технологічністю їх виготовлення та процесами, які в них виникають. 7. Для проведення моделювання кавітаційних процесів було вибрано такі конструкції статичних кавітаторів: ступеневий на вході та виході; конфузорний на вході та ступеневий на виході; конфузорно-дифузорний, які представлені на рис. 4.7.

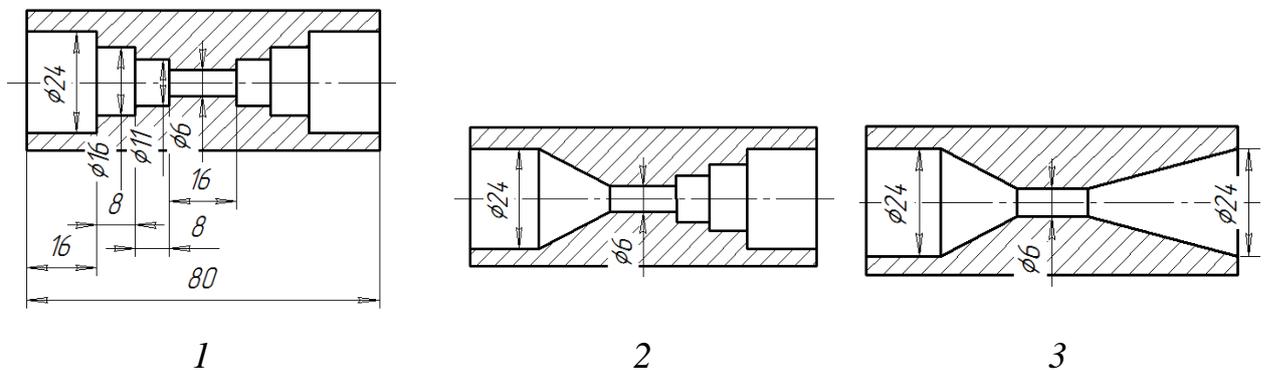


Рис. 4.7. Конструкції кавітаторів: 1 – ступеневий на вході та виході;  
2 – конфузорний на вході та ступеневий на виході;  
3 – конфузорно-дифузорний

У результаті проведених досліджень моделювання кавітаційних процесів у SOLIDWORKS [166-167] в різних за конструктивними особливостями статичних кавітаторів було отримано траєкторії руху шарів рідини при

проходженні крізь кавітатори та картину розподілу величини тиску у різних точках кавітаторів. Усі результати представлені на рис 4.8 - 4.12.

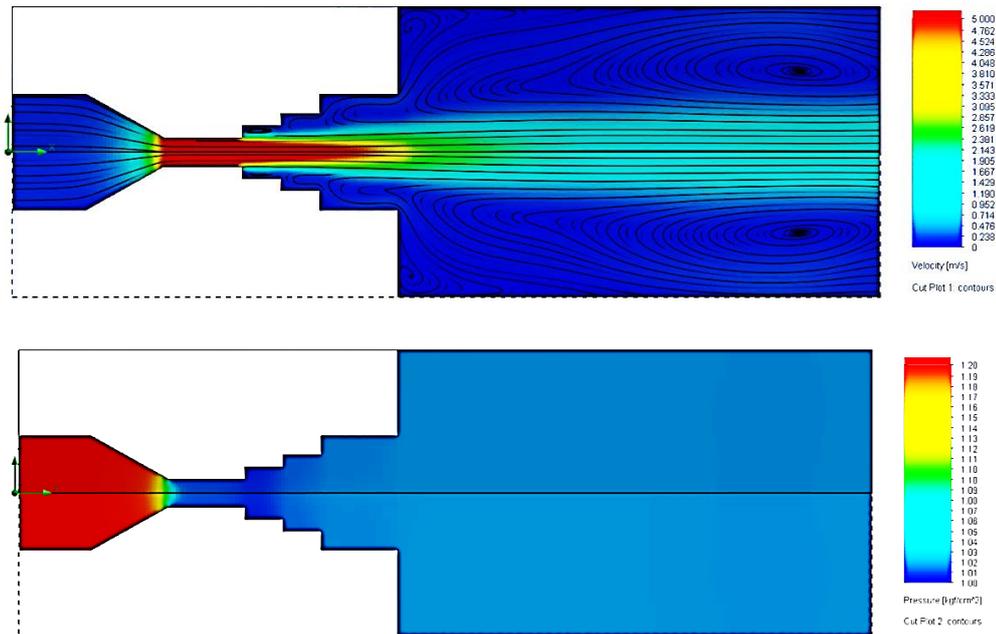


Рис. 4.8. Результати моделювання течії рідини крізь насадки конфузорний на вході та ступеневий на виході  $d = 6$  мм при вхідному тиску 0,12 МПа: *a* – траєкторії руху шарів рідини; *б* – картина розподілу величини тиску

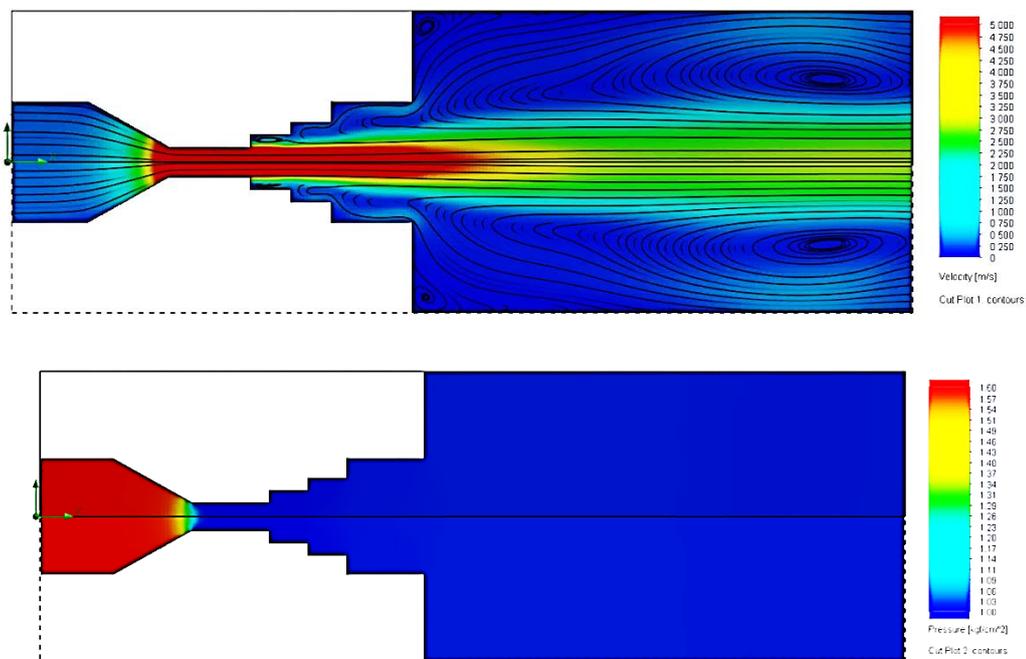


Рис. 4.9. Результати моделювання течії рідини крізь насадки конфузорний на вході та ступеневий на виході  $d = 6$  мм при вхідному тиску 0,16 МПа: *a* – траєкторії руху шарів рідини; *б* – картина розподілу величини тиску

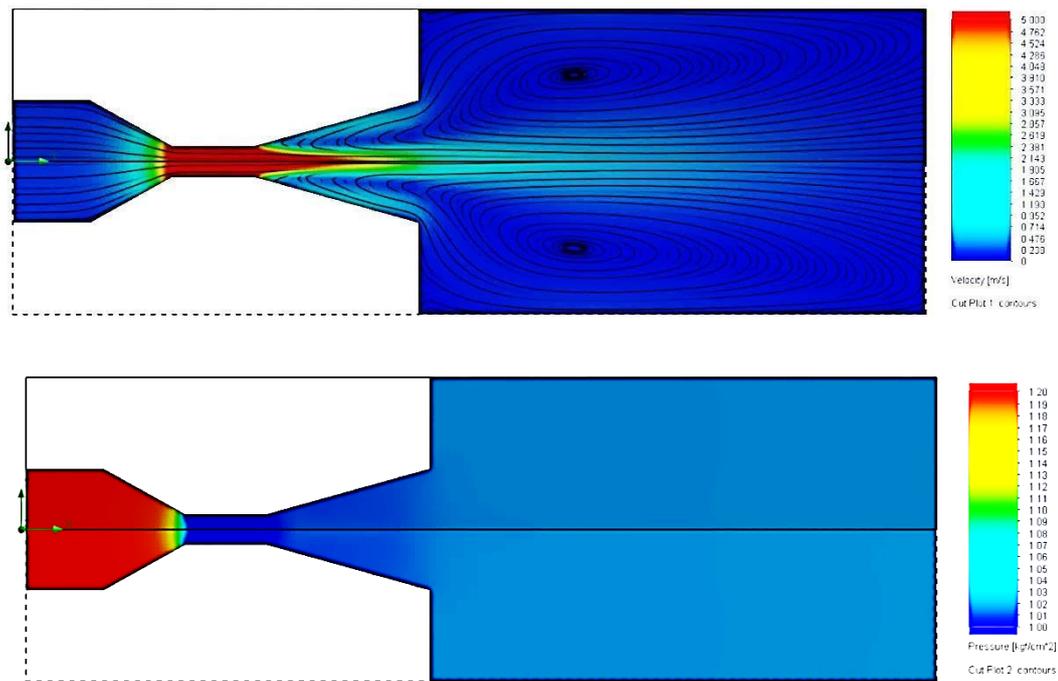


Рис. 4.10. Результати моделювання течії рідини крізь насадки конфузорно-дифузорний  $d = 6$  мм при вхідному тиску 0,12 МПа: *a* – траєкторії руху шарів рідини; *б* – картина розподілу величини тиску

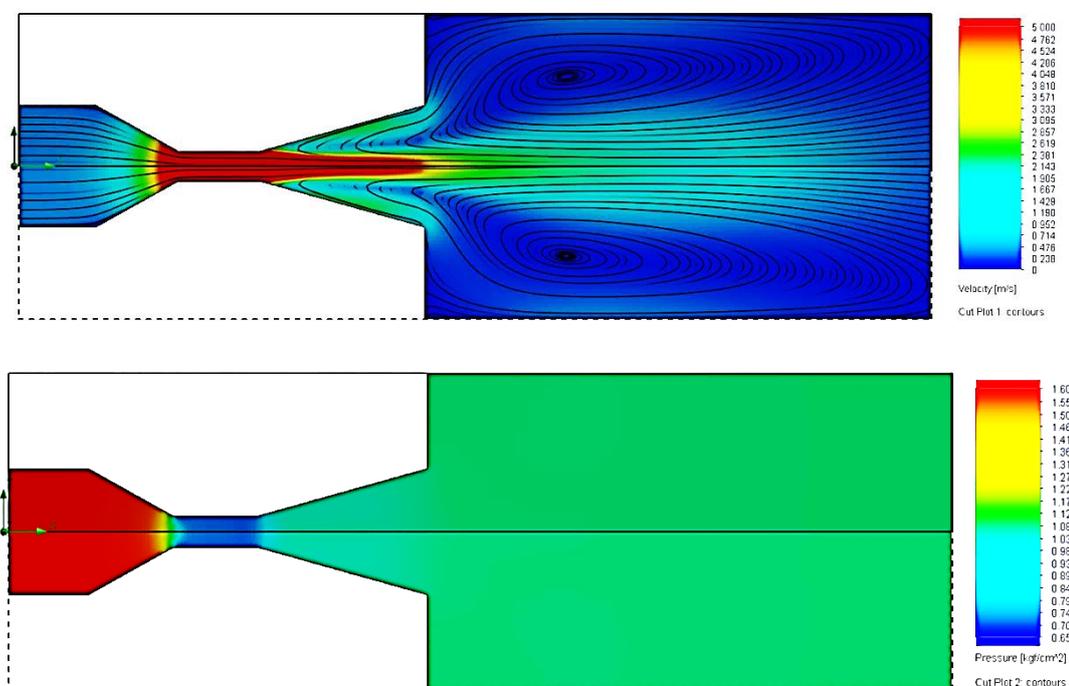


Рис. 4.11. Результати моделювання течії рідини крізь насадки конфузорно-дифузорний  $d = 6$  мм при вхідному тиску 0,16 МПа: *a* – траєкторії руху шарів рідини; *б* – картина розподілу величини тиску

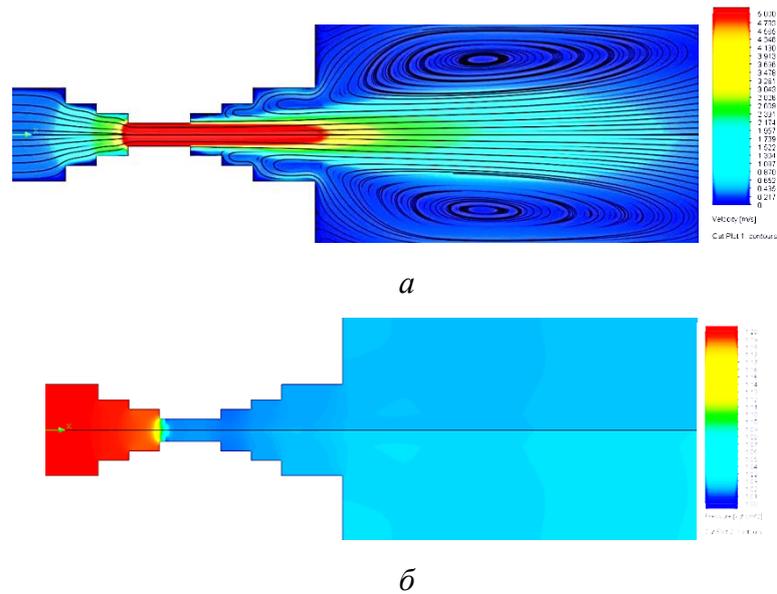


Рис. 4.12. Результати моделювання течії рідини крізь насадки ступеневого на вході та виході при вхідному тиску 0,12 МПа: *a* – траєкторії руху шарів рідини; *б* – картина розподілу величини тиску

Проведений аналіз розподілу швидкостей у насадку ступеневого на вході та виході при зміні вхідного тиску показав, що збільшення вхідного тиску призводить до збільшення швидкості у центральній зоні потоку та збільшення довжини струменя із зберіганням максимальної швидкості (рис. 4.13) та виникненням зон активного перемішування рідини на виході з насадка [166-167].

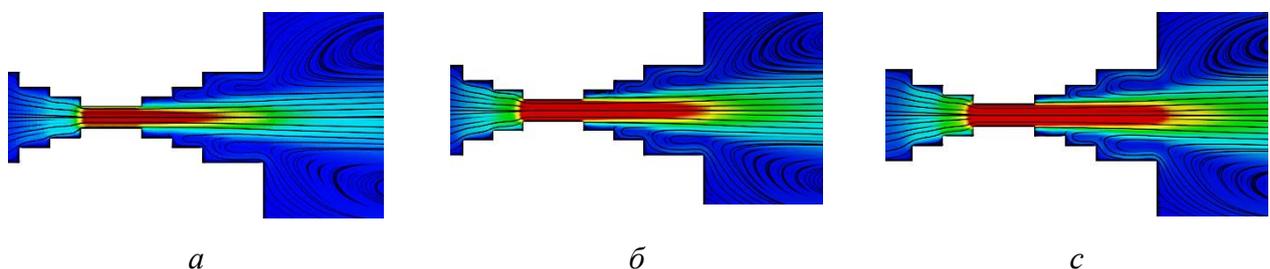


Рис. 4.13. Результати моделювання течії рідини крізь насадки ступеневого на вході та виході при зміні вхідному тиску: *a* – траєкторії руху шарів рідини при тиску 0,12 МПа; *б* – траєкторії руху шарів рідини при тиску 0,14 МПа; *с* – траєкторії руху шарів рідини при тиску 0,16 МПа

На рис. 4.14 показано у збільшеному форматі зміну тиску у різних зонах насадку та картину коливань тиску по довжині насадка. На вході у насадок при його звуженні йде падіння швидкості потоку та спостерігається зона пониженого тиску 3, де виникають кавітаційні пухирці та пульсації тиску по каналу насадка 4, що говорить про турбулентну течію потоку рідини.

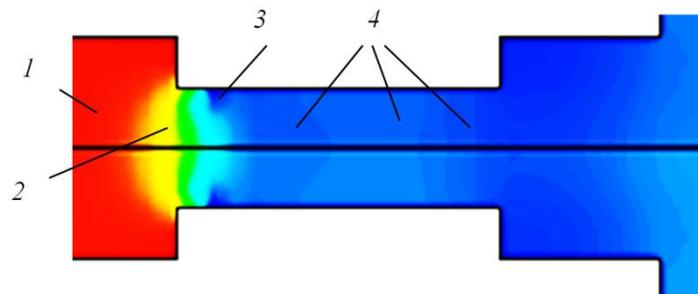


Рис. 4.14. Результати моделювання течії рідини крізь насадок: 1 – вихідний тиск 0,12 МПа; 2 – тиск на вході у насадок 0,118 МПа; 3 – тиск у кавітаційній каверні 0,01 МПа; 4 – пульсації тиску

На рис. 4.15 наведено результати моделювання руху рідини крізь насадок конфузорний на вході та ступеневий на виході, а на рис. 4.16 конфузорно-дифузорний.

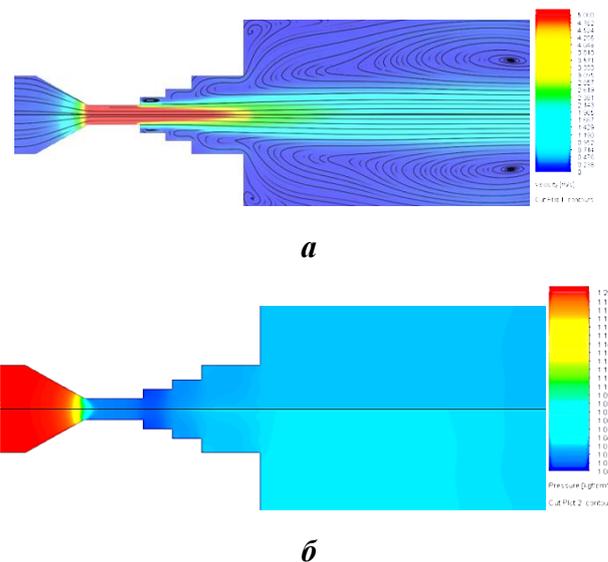


Рис. 4.15. Результати моделювання течії рідини крізь насадок конфузорний на вході та ступеневий на виході при вхідному тиску 0,12 МПа: *a* – траєкторії руху шарів рідини; *б* – картина розподілу величини тиску

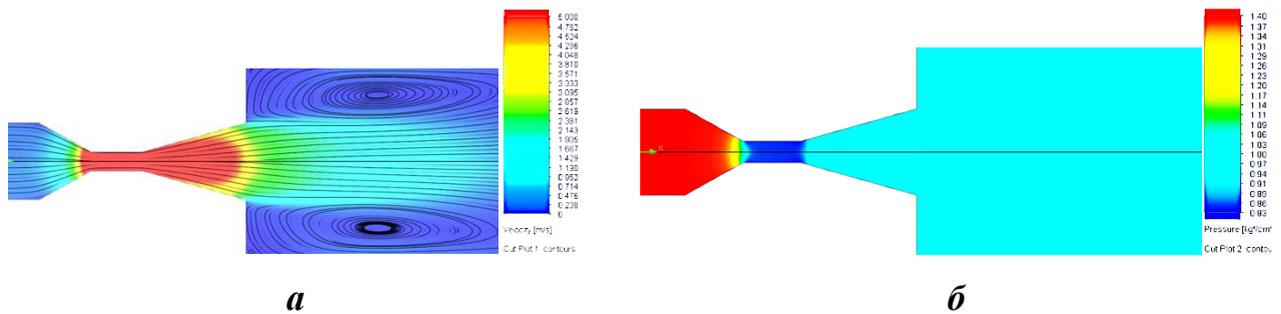


Рис. 4.16. Результати моделювання течії рідини крізь насадки конфузорно-дифузорний при вхідному тиску 0,12 МПа: *a* – траєкторії руху шарів рідини; *б* – картина розподілу величини тиску

У результаті аналізу картини швидкостей та розподілу тиску у насадках конфузорного на вході та ступеневого на виході і конфузорно-дифузорного встановлено, що траєкторії руху шарів рідини дають значно менший ефект перемішування рідини, тим самим зменшують дифузію радикалів у потоці рідини та активних газів [166-167]. Результати моделювання кавітаційних процесів у інших насадках при зміні вхідного тиску наведено у Додатку Г.

У результаті проведених досліджень впливу величини вхідного тиску на характеристики кавітаційних явищ у насадках було побудовано графік (рис. 4.17) залежності числа кавітації для досліджуваних насадків від тиску на вході.

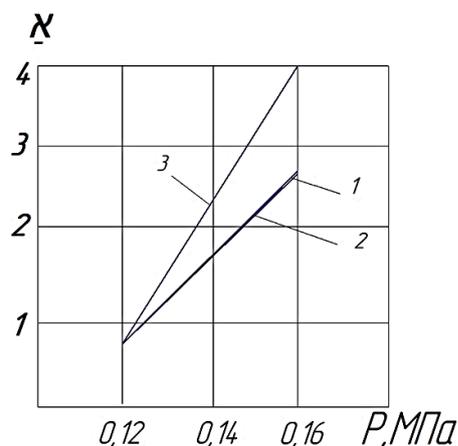


Рис. 4.17. Результати залежності числа кавітації для досліджуваних насадків від тиску на вході: *1* – ступеневий на вході та виході; *2* – конфузорний на вході та ступеневий на виході; *3* – конфузорно-дифузорний

З отриманих результатів моделювання течії рідини крізь насадку встановлено, що найбільший кавітаційний вплив здійснюється згідно з розрахунковим числом кавітації (рис. 4.18) при вхідному тиску 0,12 МПа [166-167].

У результаті аналізу отриманих результатів моделювання найкращий ефект перемішування рідини на виході з насадка та найбільший кавітаційний вплив на рідину отримано у насадку ступеневому на вході та виході і в насадку конфузорному на вході та ступеневому на виході.

З точки зору технології виготовлення більш технологічним за виготовленням є насадок ступеневий на вході та виході, який рекомендовано до застосування в експериментальному обладнанні для котелень з метою зміни складу та властивостей вхідної води (рис. 4.7 поз.1).

#### **4.5 Дослідження процесів кавітації за допомогою швидкісної зйомки процесу проходження рідини крізь насадок**

З метою визначення характеру зміни параметрів кавітаційного процесу, що виникають у вібраційній машині при циклічному проходженні реальної рідини крізь насадок, а саме частоти коливань поршня та амплітуди, було запропоновано провести дослідження візуальної картини при змінних параметрах роботи приводу [162-163].

Дослідження проводились при амплітуді коливань 2 мм тому, що при збільшенні амплітуди призводило до виникнення значних інерційних коливань та зменшення частоти роботи приводу, що у свою чергу знижувало продуктивність процесу. Швидкісна відеозйомка картини руху робочого середовища проводилась на дослідницькій установці (рис. 3.12, розділ 3) із застосуванням відеокамери та подальшою обробкою на персональному комп'ютері. Застосувавши програмне забезпечення «Light Alloy 2.7», була проведена зупинка кадрів комп'ютерного відео записаного циклу: втягування рідини крізь насадок у камеру пульсації та виштовхування її з неї.

На рис. 4.18 *a* представлено знімок початку руху рідини з кавітаційними пухирцями в камері пульсації, які збільшуються у розмірі з початком падіння тиску, а також знімок руху рідини з кавітаційними пухирцями при досягненні мінімального тиску в камері пульсації (рис. 4.18 *б*).

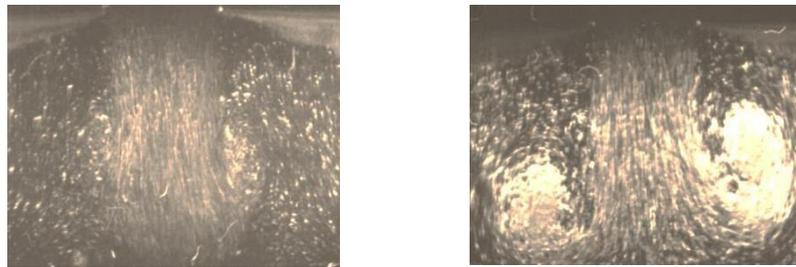
*a**б*

Рис. 4.18 – Кадрова зупинка періоду втягуванні рідини крізь насадок у камеру пульсації вібраційної машини; *a* – початок втягування, *б* – закінчення втягування

Для візуального визначення частотних границь роботи приводу для отримання оптимальної продуктивності вібраційної машини для зміни властивостей води було проведено дослідження спостереження картини руху рідини крізь насадок та її поведінки при зміні частоти у камері пульсації за допомогою швидкісної відеоз'ємки (рис. 4.19).

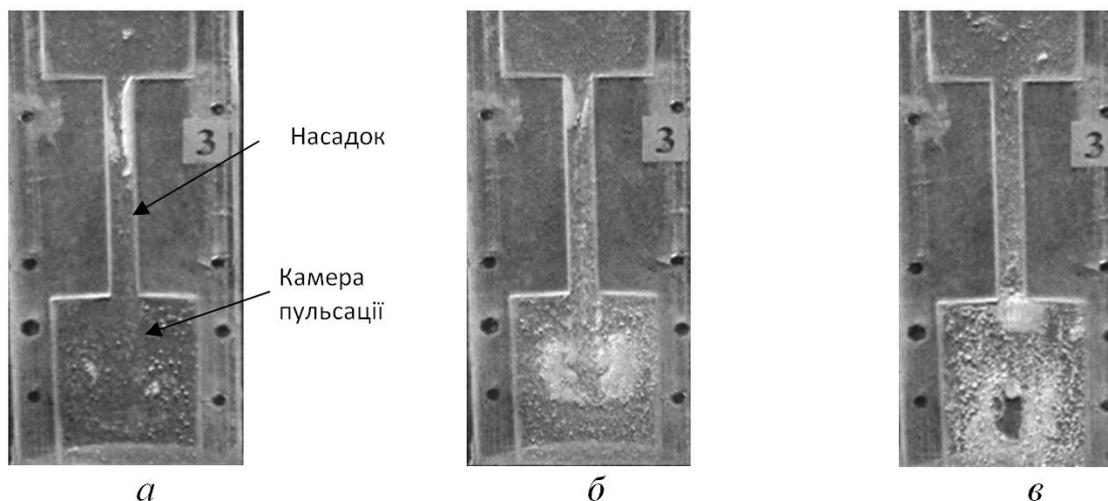
*a**б**в*

Рис. 4.19. Скріншоти проходження рідини крізь насадок у камеру пульсації при різних частотах коливань віброприводу: *a* – частота 5 Гц; *б* – частота 15 Гц; *в* – частота 23 Гц

Як видно з скріншотів (рис. 4.19, а) при частоті коливань приводу 5 Гц у насадку виникає кавітаційна каверна, а у камері пульсації зароджуються кавітаційні пухирці. При збільшенні частоти коливань до 15 Гц (рис. 4.19, б) утворюється рій кавітаційних пухирців зі зривом каверни, а при частоті 23 Гц виникає великий деформований пухирець (рис. 4.19, в) та рух рідини крізь насадок сповільнюється. Це пояснює залежність зміни максимального тиску реальної рідини з насадка, які показані на рис. 4.6 і, відповідно, зміни величини об'єму, що виштовхується з меншою швидкістю.

Виходячи з отриманих результатів [162-163], формування кавітаційного процесу у камері пульсації з насадком вібраційної машини для зміни властивостей води можна зробити висновок, що за умови найбільшої швидкості циркуляції рідини крізь насадок за один цикл коливань зі збереженням розвинутого кавітаційного процесу бажано приймати режими роботи вібраційного приводу у межах від 14 до 16 Гц. Візуально процес проходження рідини крізь насадок у камеру пульсації при частоті коливань віброприводу 15 Гц представлено на рис. 4.20.

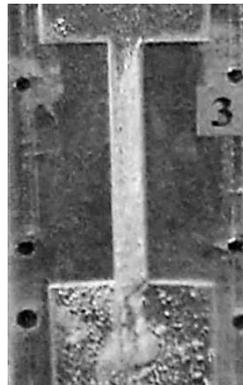


Рис. 4.20. Скріншот проходження рідини крізь насадок у камеру пульсації при частоті коливань віброприводу 15 Гц

#### **4.6 Експериментальні дослідження зміни рН водного середовища при кавітаційному та комплексному кавітаційно-магнітному впливі**

Загалом практика показує, що саме спосіб магнітної обробки води є дешевим, простим та ефективним. Він не потребує значних капіталовкладень в

порівнянні з встановленням хімічної водоочистки та є перспективним методом в енергетиці.

Магнітна обробка водного середовища має ряд переваг відносно інших фізичних способів: діє на всі групи домішок; впливає як на хімічні, так і на фізичні процеси в водному середовищі; призводить до вивільнення внутрішньої енергії середовища внаслідок руйнування електромагнітних зв'язків між молекулами рідини та домішок, активізує водне середовище.

Головною перевагою при очищенні водного середовища від іонів домішок є можливість керування рухом іонів в магнітному полі, а отже безпосереднє видалення іонів домішок з потоку. Магнітна обробка водного середовища знайшла своє застосування в багатьох галузях промисловості, що, в свою чергу, підтверджує ефективність таких пристроїв.

Вода визначається кількома параметрами, наприклад: рН, окислювально-відновним потенціалом (ОВП) та концентрацією розчиненого кисню (РК), які є важливими для контролю якості води та процесів очищення води.

Показник рН, окисно-відновний потенціал (ОВП), вміст загальної мінералізації є важливими параметрами для контролю та очищення якості води. Зміни цих параметрів пов'язані з електронною густиною у воді.

Процеси, що відбуваються всередині обладнання при кавітаційно-магнітній обробці води, зводяться до утворення нерозчинних у воді карбонатів  $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{MgCO}_3$ , оксикарбонатів  $\text{Mg}_2(\text{OH})_2\text{CO}_3$  і гідроксидів  $\text{Fe}(\text{OH})_2$ , які з часом утворюються і випадають в осад, зменшуючи таким чином загальну концентрацію розчинених речовин.

Проведено дослідження зміни рН в процесі кавітаційної обробки води у вібраційній машині [162]. Результати досліджень показали збільшення показника рН з 7,4 до 8,3 од., що говорить про покращення характеристик води (рис. 4.21).

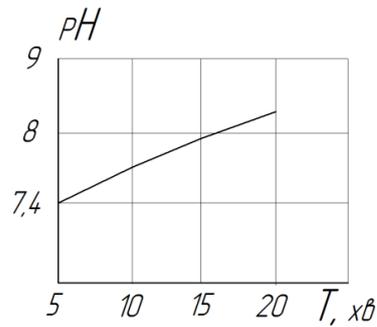


Рис. 4.21. Графік зміни показника рН після оброблення кавітацією водопровідної води у вібраційній машині з часом: при амплітуді  $A = 2$  мм; діаметрі поршня  $D_n = 100$  мм та діаметрі насадка  $d = 10$  мм; частоті коливань приводу 20 Гц

Проведено дослідження зміни рН в процесі кавітаційної обробки води при застосуванні статичного кавітатора та омагнічуванням статичним магнітним полем з градієнтом напруженості вздовж потоку рідини та комплексна обробка вібраційною машиною. Результати зміни показника показані на рис. 4.22.

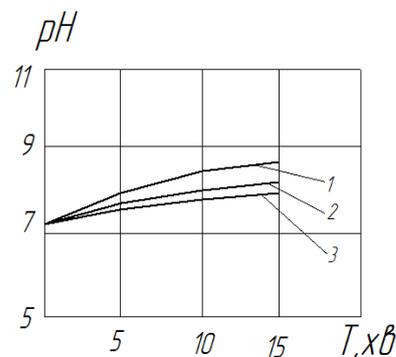


Рис. 4.22. Графік залежності показника рН водопровідної води за часом оброблення: 1 – комплексна дія гідрокавітації у статичному кавітаторі та вібраційному кавітаторі з омагнічуванням потоку статичним магнітним полем з градієнтом напруженості вздовж потоку рідини; 2 – гідрокавітація у статичному кавітаторі; 3 – омагнічування статичним магнітним полем з градієнтом напруженості вздовж потоку рідини

Отримані результати (рис. 4.22) показують, що вплив гідрокавітації у статичному кавітаторі та вплив магнітного поля мають окрему дію на молекули води. Відомі гіпотези [41] стверджують, що омагнічування постійним магнітним полем з градієнтом напруженості вздовж потоку призводить до зміни кута нахилу водневих зв'язків. А кавітаційний вплив призводить до їх розриву з виділенням активних газів  $O_2$  і  $H_2$ , які призводять до хімічних реакцій з іонами заліза, кальцію та магнію.

#### **4.7 Результати багатofакторного експериментального дослідження визначення зміни показника рН води при кавітаційно-магнітній обробці**

У дослідженнях вирішувалося завдання визначення впливу різних параметрів запропонованого обладнання кавітаційно-магнітної обробки на зміну показника рН води.

На основі методики (розділ 3) планування багатofакторного експерименту були проведені експериментальні дослідження з встановлення залежності зміни показника рН водного середовища при одночасному впливу кавітації, величини магнітної індукції магнітного поля та відстані між постійними магнітами.

Значення верхнього, нижнього і основного рівнів становили для магнітної індукції відповідно 0, 600 і 1200 мТл, для швидкості руху води – 0,2, 0,3 і 0,4 м/с, відстань між постійними магнітами – 15, 25, 35 мм, яким присвоювали кодовані значення відповідно  $X_1$ ,  $X_2$  та  $X_3$ .

При проведенні досліджень визначалося значення рН водного середовища залежно від трьох основних факторів. Для побудови математичної моделі застосовано експериментальний масив даних результатів досліджень.

Виконавши кодування факторів, проведено експерименти за робочою матрицею (глава 3, табл. 3.2). Визначено коефіцієнти регресії квадратичного полінома (3.7) за формулами (3.13). Отримано значення коефіцієнтів регресії та їх надійні інтервали.

Після оброблення отриманих результатів рівняння регресії зміни показника рН водного середовища у кодованих величинах має вигляд:

$$y = 0,2728 + 0,067x_1 + 0,009x_2 - 0,052x_3 - 0,016x_1x_2 - 0,0756x_1x_3 - (4.8) \\ - 0,0007x_2x_3 - 0,034x_1^2 - 0,00225x_2^2 - 0,0203x_3^2.$$

де  $x_1$  – рівень магнітної індукції;

$x_2$  – швидкість потоку рідини;

$x_3$  – відстань між постійними магнітами.

Оцінку статистичної значущості коефіцієнтів рівняння регресії та перевірку адекватності (відповідності) отриманого теоретичного розподілу випадкових величин рівняння регресії (4.8) до реального експериментального процесу проводили згідно з методикою, яка наведена у розділі 3.

Таким чином, після здійснених розрахунків коефіцієнтів рівнянь регресії для коефіцієнтів  $b_{23}$ ,  $b_{33}$ , умова їх значущості не виконана, оскільки їхня величина була меншою за довірчі інтервали.

Тоді кінцеве рівняння регресії, що відображає функціональну залежність у кодованих величинах має вигляд:

$$y = 0,2728 + 0,067x_1 + 0,0091x_2 - 0,052x_3 - 0,0156x_1x_2 - 0,0756x_1x_3 - (4.9) \\ - 0,0339x_1^2 - 0,00225x_2^2 - 0,0203x_3^2.$$

Згодом здійснено перевірку адекватності отриманої моделі за критерієм Фішера.

В результаті за значимістю були відкинуті певні складові регресії, а складові рівняння регресії (4.9) перекладено у реальні величини; після трансформації та спрощення виразів рівняння регресії отримає остаточний вигляд:

$$pH = 6,6 + 0,007B + 0,06V + 0,018l - 0,00007BV - 0,00013Bl - \\ - 0,0000009B^2 - 0,002V^2. (4.10)$$

Отримане рівняння регресії може бути використане для визначення зміни показника рН водного середовища кавітаційно-магнітним способом залежно від рівня магнітної індукції, швидкості проходження потоку рідини по трубопроводу та відстані між постійними магнітами, які його охоплюють, у таких межах зміни вхідних факторів:

$$600 \text{ мТл} \leq (B) \leq 1200 \text{ (мТл)}; \quad 2 \leq V \leq 4 \text{ (м/с)}; \quad 15 \leq l \leq 35 \text{ (мм)}.$$

Для визначення впливу основних складових показників (змінних факторів) на параметр рН використано програмне забезпечення Microsoft Office Excel 16 та за допомогою якого побудовано графічне відтворення залежності досліджуваних факторів від величини показника рН.

Результати аналізу даних експериментальних досліджень зміни показника рН водного середовища від різних параметрів представлено в графічній формі на рис. 4.23 - 4.25. Графіки побудовано за допомогою програми Microsoft Office Excel 16.

На рис. 4.23 зображено двомірний переріз поверхні відгуку, яка показує вплив на показник рН водного середовища при зміні рівня магнітної індукції. Встановлено, що при постійній швидкості потоку та відстані між магнітами 25 мм найбільший вплив отримано при 900 мТл.

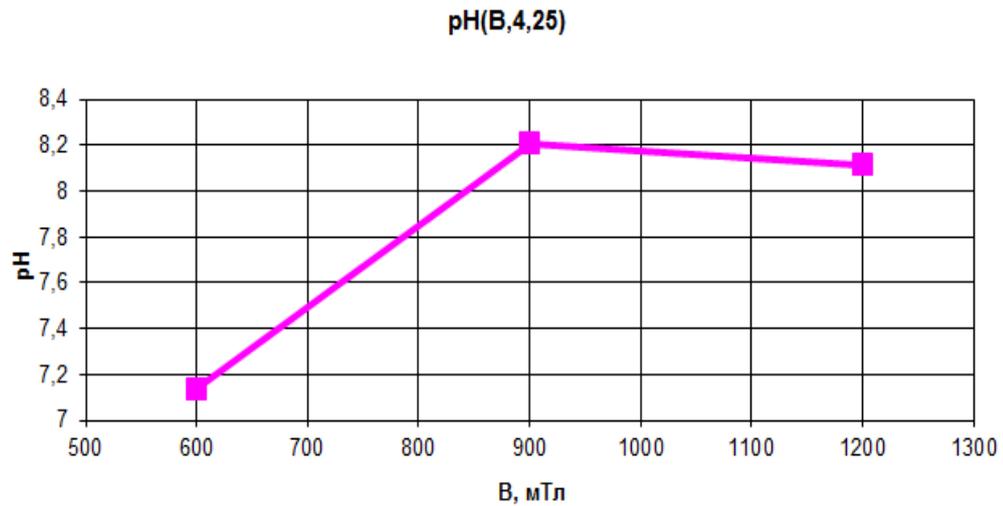


Рис. 4.23. Поверхня відгуку залежності показника рН водного середовища при зміні рівня магнітної індукції

На рис. 4.24 зображено двомірний переріз поверхні відгуку, яка показує вплив на показник рН водного середовища при зміні швидкості потоку рідини.

Встановлено, що при постійному рівні магнітної індукції 900 мТл та відстані між магнітами 25 мм найбільший вплив отримано при швидкостях від 3 до 4 м/с.

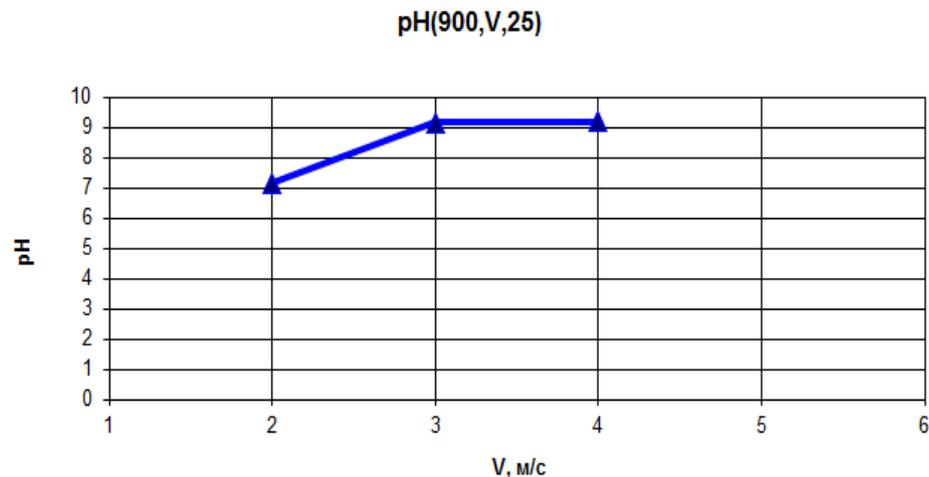


Рис. 4.24. Поверхня відгуку залежності показника рН водного середовища при зміні швидкості потоку рідини

На рис. 4.25 зображено двомірний переріз поверхні відгуку, яка показує вплив на показник рН водного середовища при зміні відстані між магнітами.

Встановлено, що при постійному рівні магнітної індукції 900 мТл та швидкості водного потоку 3 м/с найбільший вплив отримано при відстані між магнітами 25 мм.

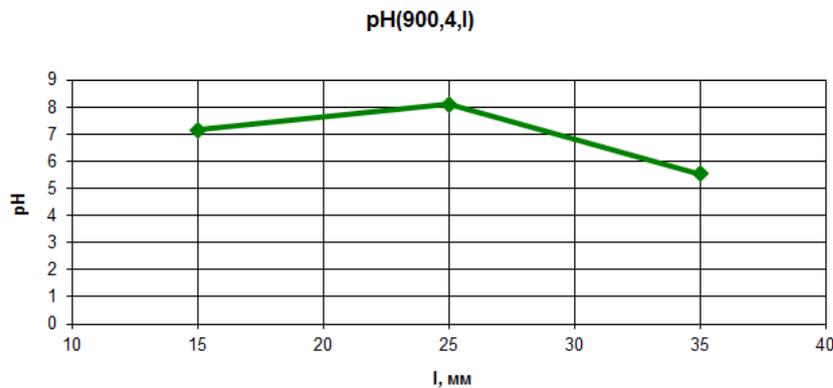


Рис. 4.25. Поверхня відгуку залежності показника рН водного середовища при зміні відстані між магнітами

За результатами проведеного багатofакторного експериментального дослідження визначення зміни показника рН води при кавітаційно-магнітній обробці встановлено, що при збільшенні рівня магнітної індукції показник рН зменшується до 8,1 од., при збільшенні швидкості проходження потоку рідини від 3 до 4 м/с показник рН не змінюється та зі зміною відстані між магнітами від 15 до 35 мм спостерігається максимум збільшення рН при відстані 25 мм. Рекомендовані параметри кавітаційного та магнітного блоків такі: рівень магнітної індукції 900 мТ; швидкість потоку рідини 3 м/с; оптимальна відстань між магнітами становить 25 мм.

#### **4.8 Експериментальні дослідження зміни структури води та визначення показників води при магнітно-кавітаційному обробленні**

Для визначення зміни складу та властивостей води з джерела під час комплексного кавітаційно-магнітного оброблення та після оброблення відбиралися проби із загального об'єму обробленої води у кількості 300 мл, які

відстоювали 3 доби. Результати зміни показників TDS та ORP води за період оброблення та після відстоювання показані на рис. 4.26 та рис. 4.27.

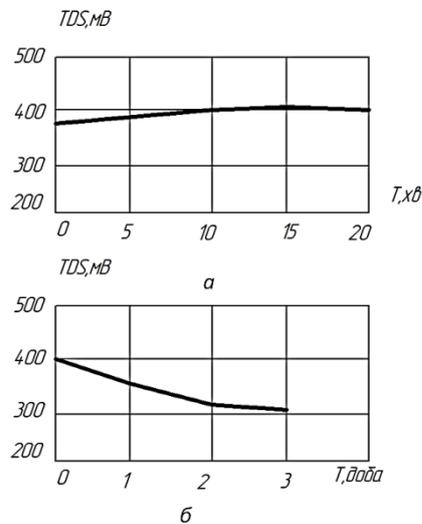


Рис. 4.26. Графік залежності зміни показника TDS води з джерела за часом:

*a* – в процесі оброблення; *б* – в процесі відстоювання

У результаті проведення експериментальних досліджень [166] вимірювання приладами (рис. 3.15, розділ 3) встановлено, що в процесі комплексного кавітаційно-магнітного оброблення до 20 хвилин показник TDS зростає від 380 до 400 мВ (рис.4.26 *a*). Тобто у водному середовищі проходять реакції окиснення вільних радикалів до утворення нерозчинних у воді карбонатів  $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{MgCO}_3$ , оксикарбонатів  $\text{Mg}_2(\text{OH})_2\text{CO}_3$  і гідроксидів  $\text{Fe}(\text{OH})_2$ , які потім з часом відстоювання випадають у осад, що демонструє графік рис. 4.26 *б* та відбувається зниження показника TDS від 400 до 300 мВ.

У результаті проведення експериментальних досліджень вимірювання приладами (рис. 3.15, розділ 3) встановлено, що в процесі комплексного кавітаційно-магнітного оброблення до 20 хвилин показник ORP падає від 300 до 180 мВ (рис.4.27 *a*), що говорить про насичення водного середовища  $\text{O}_2$  (рис. 4.27 *a*). У процесі відстоювання до трьох діб показник ORP збільшується від 180 до 240 мВ, що засвідчує дифузію  $\text{O}_2$  з водного середовища, але до певного значення 240 мВ, що менше вихідного стану.

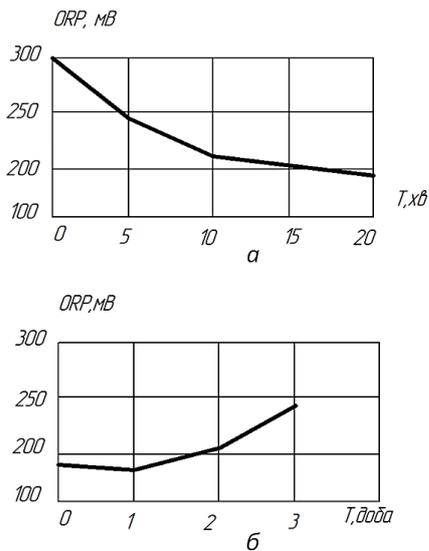


Рис. 4.27. Графік залежності зміни показника ORP води з джерела за часом:  
*a* – в процесі оброблення; *б* – в процесі відстоювання

Для візуального визначення зміни складу водопровідної води після оброблення були взяті проби із загального об'єму обробленої води у кількості 300 мл, які відстоювали три доби. Результати зміни складу водопровідної води після оброблення показані на рис. 4.28. Встановлено, що окислені іони кальцію та магнію сплили на поверхню, а окислені іони заліза випали у осад на дно у вигляді пластівців, що підтверджує результати зменшення показника TDS.



Рис. 4.28. Результати комплексної дії гідрокавітації та омагнічування на зміну складу водопровідної води після відстоювання: *1* – кристали окислів кальцію та магнію, що сплили на поверхню; *2* – осад окислених іонів заліза у вигляді пластівців, осіли на дно ємності

Наступним етапом аналізу кавітаційно–магнітного впливу на структуру води був проведений кристало–оптичний аналіз вигляду осаду висушеної краплі води за допомогою мікроскопа МР–10 з передачею зображення на персональний комп’ютер. Спочатку була створена крапля води без кавітаційно–магнітної обробки на прозорому склі, а потім – крапля води після 15–хвилинної кавітаційно–магнітної обробки. Вони були висушені при природних умовах.

Структуру висушених крапель досліджено мікроскопом, сфотографовано і збережено у електронному файлі на комп’ютері (рис. 4.29).

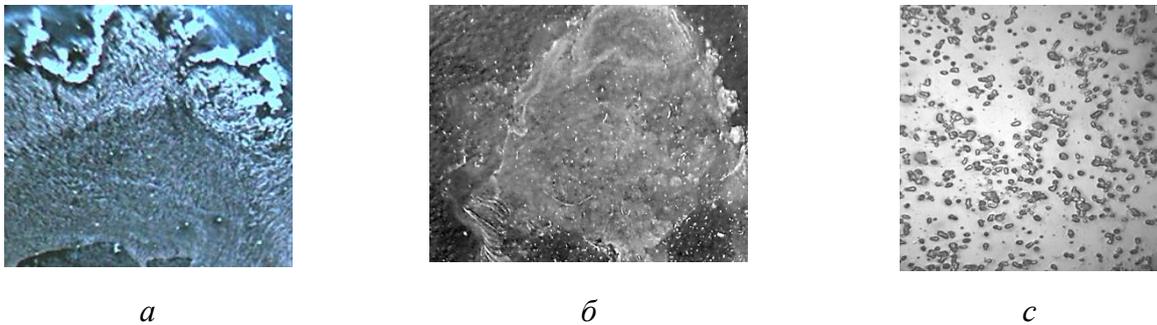


Рис. 4.29. Фотографії структурної будови кристалів на різних ділянках осаду висухої краплі водопровідної води: *a* – необробленої магнітним полем (збільшення у 20 разів); *б* – після 15 хвилин оброблення (збільшення у 10 разів); *с* – після 15 хвилин оброблення (збільшення у 1 см = 15 мкм)

На фотографії осаду краплі води рис. 4.29 *a* спостерігається нерівномірне розташування осаду солей карбонатів  $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{MgCO}_3$ , оксикарбонатів  $\text{Mg}_2(\text{OH})_2 \text{CO}_3$  і гідроокисів  $\text{Fe}(\text{OH})_2$  по поверхні. Це пояснюється тим, що необроблена водопровідна має кластерний нерівноважений енергетичний стан, високий коефіцієнт поверхневого натягу, що при висиханні стягує солі у крайову зону краплі при її осушенні.

На фотографії осаду краплі води рис. 4.29 *б* та на фотографії рис. 4.29 *с* у збільшеному масштабі спостерігається рівномірне вільне розтікання рідини з утворенням більш рівномірно утвореного осаду, що говорить про зменшення поверхневого натягу та рівномірний розподіл кристалів осаду карбонатів  $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{MgCO}_3$ , оксикарбонатів  $\text{Mg}_2(\text{OH})_2 \text{CO}_3$  і гідроокисів  $\text{Fe}(\text{OH})_2$  по

поверхні. Це пояснюється структуризацією води: подрібненням її кластерної структури та відсутністю росту дендритних структур [166].

Також було проведено термостатичні дослідження вимірювання кипіння дистильованої води, обробленої кавітаційно-магнітним полем. Прямі термостатичні вимірювання, проведені з точністю до  $0,1^{\circ}\text{C}$ , показали, що оброблена кавітаційно-магнітним впливом дистильована вода, на відміну від звичайної, не має строго певної температури кипіння. Відхилення від прямої лінії починаються вище  $80^{\circ}\text{C}$  (рис. 4.30, крива 2). Це свідчить про порушення нерівноцінності водневих зв'язків між молекулами води після кавітаційно-магнітним обробки [165].

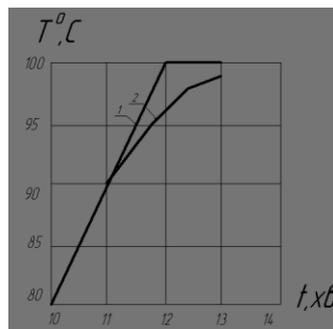


Рис. 4.30. Графіки нагрівання дистильованої води: 1 – без кавітаційно-магнітної обробки; 2 – після обробленої кавітаційно-магнітної обробки

#### **4.9 Техніко-функціональний аналіз та методологія проектування конструкції обладнання для зміни складу та властивостей води для котелень**

У результаті проведених експериментальних досліджень запропоновано схему обладнання для водопідготовки котелень, яка показана на рис. 4.31.

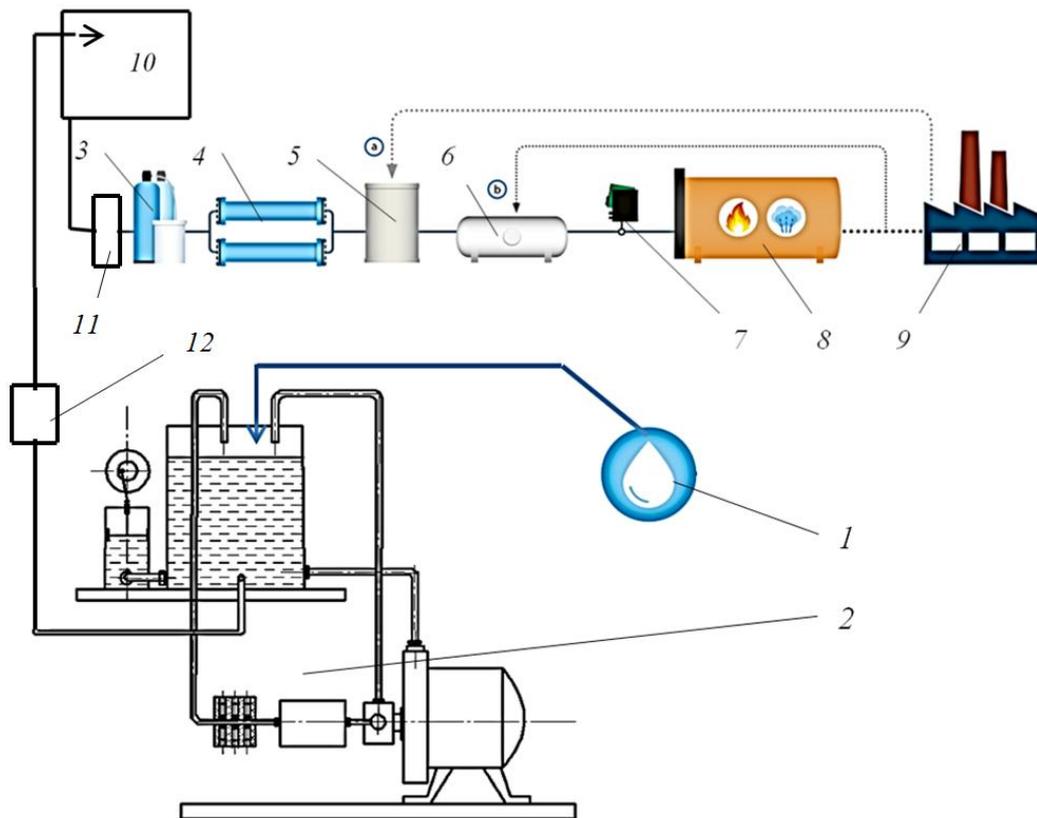


Рис. 4.31. Схема запропонованого обладнання для водопідготовки:

1 – вихідна вода; 2 – обладнання попередньої очистки та зміни властивостей води; 3 – пом'якшення іонним обміном; 4 – демінералізація води методом зворотного осмосу; 5 – бак для зберігання демінералізованої води; 6 – видалення газів термічним деаератором; 7 – насос для дозування хімікатів для підтримки роботи котла; 8 – котел; 9 – котельня; 10 – бак відстоювання; 11 – фільтр; 12 – насос; *a* – оборотна вода; *б* – розігрів деаератора

Обладнання працює таким чином (рис. 4.31). Вихідна вода 1 подається в установку попередньої очистки та зміни властивостей води 2, де підлягає кавітаційно-магнітному впливу за допомогою статичного кавітатора та вібраційної машини з проходженням крізь блок постійних магнітів. Після 15 хвилин циклічного оброблення вода насосом 12 подається у накопичувальний бак для відстоювання 10. Після двох діб відстоювання з поверхні рідини у баку збирають осад солей карбонатів  $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{MgCO}_3$ , що сплили на поверхню.

Вода подається крізь фільтр 11, що очищує від гідроксидів  $\text{Fe}(\text{OH})_2$  та фільтрується під тиском 3. Проводиться додаткове пом'якшення іонним обміном 4 видаляються іони кальцію ( $\text{Ca}^{++}$ ) магнію ( $\text{Mg}^{++}$ ). Проводиться демінералізація 5 зворотної води після роботи у котлі 9 та зберігається у резервуарі для води 6.

Особливості конструкції основних вузлів обладнання такі. У результаті проведених досліджень з моделювання форми статичного кавітатора встановлено з картини швидкостей та розподілу тиску у насадку ступеневого на вході та на виході, що траєкторії руху шарів рідини дають значний ефект перемішування рідини і тим самим збільшують дифузію радикалів у потоці рідини та активних газів. Тому запропоновано використовувати його конструкцію, показану на рис.4 32.

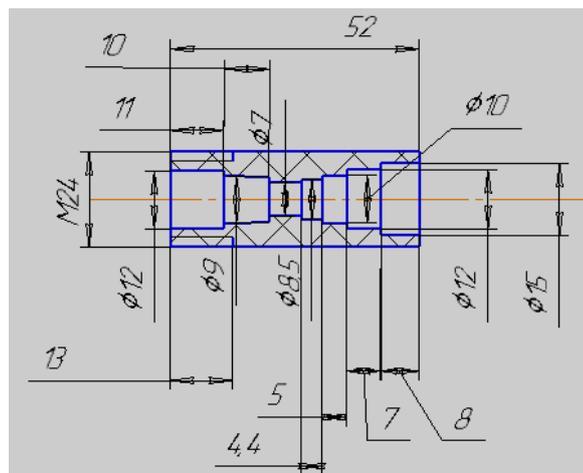


Рис. 4.32. Схема запропонованого кавітаційного статичного насадка

Виходячи з результатів проведених досліджень з магнітного впливу на воду, для запропонованого обладнання водопідготовки застосовано блок омагнічування водного потоку (рис.4.33) з шагом розташування постійних магнітів 25 мм.

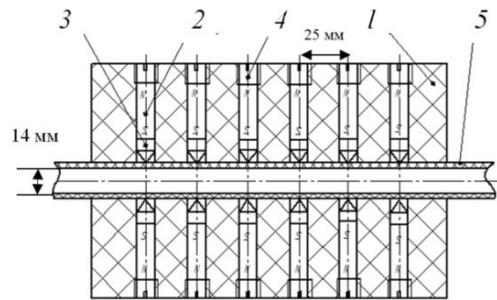


Рис. 4.33. Схема конструкції встановлення постійних магнітів: 1 – немагнітний корпус; 2 – постійний магніт; 3 – конусна вставка; 4 – заглушка; 5 – немагнітна трубка зливного трубопроводу

Особливості методології проектування основних вузлів вібраційної машини такі. Перед початком роботи обладнання вода заливається у бак. Для заповнення циліндричної ємності вібраційної машини відкривається кран випуску повітря (рис. 4.34), який після заповнення системи водою перекривається.

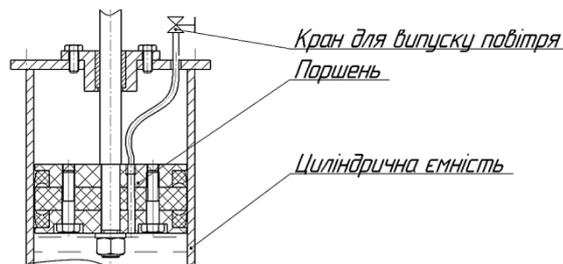


Рис. 4.34. Схема запропонованого вузла для зворотно-поступальних коливань поршня вібраційної машини

За результатами проведених досліджень приймаємо параметри приводу вібраційної машини: частоту коливання поршня 15 Гц, що відповідає електродвигуну з числом обертів 900 об/хв та потужністю 300 Вт. Амплітуда коливань 2 мм. Співвідношення діаметра поршня 100 мм до діаметра насадка 10.

Одним з важливих з'єднань є вузол тертя штока у втулці. Для його роботи без заїдання та заклинювання необхідно витримувати певні конструктивні взаємозв'язки між діаметром штока  $d$  та довжиною втулки  $l$  (рис. 4.35)

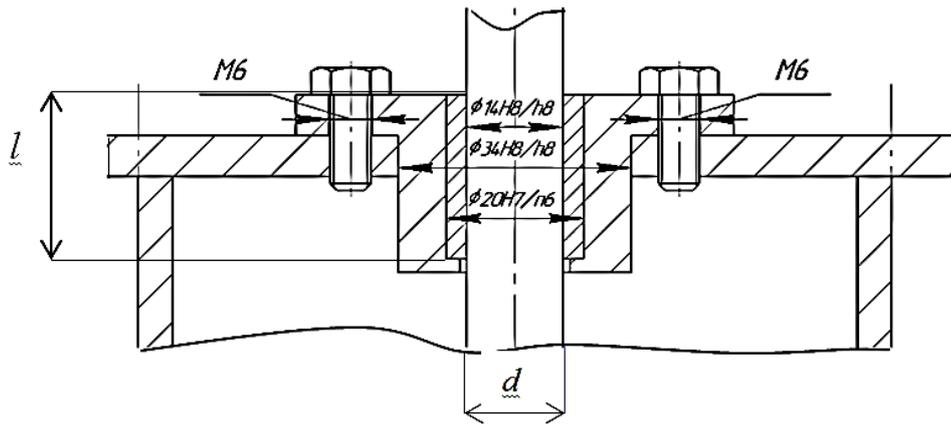


Рис. 4.35. Схема вузла ковзання штока вібраційної машини

Щоб визначити довжину втулки повзуна, залежно від розміру повзуна, скористаємося схемою сил, які діють у вузлі ковзання (4. 36) та наведеними нижче співвідношеннями.

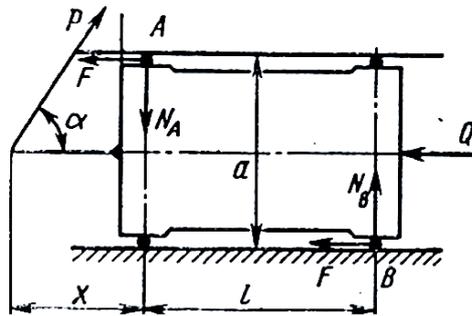


Рис. 4.36. Схема дії сил для визначення діаметра втулки залежно від розмірів поверхні штока

У поступальній парі результуюча сила тертя  $F$  залежить не лише від матеріалів тертьових поверхонь, що враховуються через коефіцієнт тертя, але також від точки прикладання, напрямку сили та геометричних параметрів поверхні у втулці. Під час впливу на повзун сили опору  $Q$ , сила переміщення  $P$ , яка утворює з віссю повзуна певний кут (рис. 4.33), розраховується за такою формулою [171]:

$$P = \frac{Q}{\cos\lambda - \mu \cdot \sin\lambda \left(1 + \frac{2x - f \cdot d}{L}\right)} \quad (4.11)$$

Якщо будуть виконуватися умови:

$$\operatorname{tg} \lambda \geq \frac{1}{f \left( 1 + \frac{2x - f \cdot d}{l} \right)} \quad \text{або} \quad x \geq \frac{1}{2} \left( \frac{1}{f \cdot \operatorname{tg} \lambda} - 1 + \frac{f \cdot d}{l} \right), \quad (4.12)$$

то повзун отримає заклинивання.

Розрахуємо розміри довжини втулки  $l = 0,04$  м, при таких параметрах: діаметр повзуна  $d = 0,02$  м, кут прикладання сили, яка зсовує  $\lambda = 10^\circ$ . Проведемо перевірку умови заклинювання:

$$\operatorname{tg} \lambda \geq \frac{1}{\mu \left( 1 + \frac{2x - \mu \cdot d}{l} \right)} = \frac{1}{0,16 \left( 1 + \frac{2 \cdot 0,02 - 0,16 \cdot 0,02}{0,04} \right)} = 3,2.$$

$$\operatorname{tg} \lambda = 0,182.$$

З розрахунку виходить, що  $\operatorname{tg} \lambda = 0,182 < 3,2$ , тому заклинювання не відбудеться.

Другим важливим елементом конструкції вібраційної машини є з'єднання корпусу підшипника, де встановлено ексцентрик зі штоком (рис. 4. 37).

Під час виготовлення цього з'єднання необхідно для зменшення шумових характеристик роботи шатунного механізму під час проходження крайніх «мертвих точок» виконувати отвір сумісно у двох деталях свердлуванням, а потім зенкеруванням.

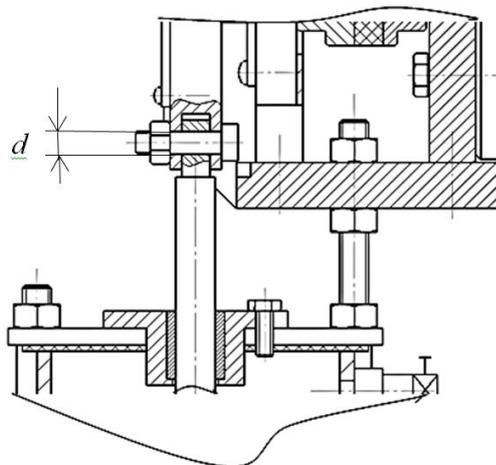


Рис. 4.37. Схема вузла з'єднання штока вібраційної машини з корпусом підшипника

Особливості виготовлення вузла полягають у такому: вісь необхідно точити начисто під попередньо оброблений разом розмір отвору кінця штока та отвору корпусу підшипника зенкеруванням і гартувати кінець штока з отвором та отвір корпусу підшипника струмом СВЧ.

#### **4.9.1 Визначення енергетичних витрат запропонованого обладнання для зміни складу та властивостей води для котелень**

Обладнання для зміни складу та властивостей води для котелень працює від електродвигунів. Один у вібраційній машині потужністю 200 Вт, другий у приводі насоса потужністю 300 Вт. Виходячи з результатів проведених досліджень, для оброблення 100 літрів води необхідно витратити 60 хвилин.

Розрахунок енергетичних витрат запропонованого обладнання проведемо за формулою:

$$E = N \cdot t = 0,5 \cdot 60 = 30 = 0,3 \text{ кВт/час}, \quad (4.13)$$

де  $N$  – споживана потужність електродвигунів;

$t$  – час проведення процесу зміни складу та властивостей води.

З проведеного розрахунку видно, що енерговитрати на проведення процесу зміни складу та властивостей води незначні.

#### **Висновки до розділу 4**

1. Отриману аналітичну залежність максимального тиску у камері пульсації вібраційної машини з коригувальним коефіцієнтом застосовано для визначення її продуктивності.

2. На основі аналізу результатів моделювання процесу гідродинамічної кавітації були виготовлено і досліджено кавітаційні насадки: ступеневий на

вході та виході, конфузорний на вході та ступеневий на виході, конфузорно-дифузорний з такими геометричними параметрами: довжина горловини сопла – 20 мм, діаметр горловини насадка в кавітаційних реакторах – 6 мм.

3. На основі експериментальних даних було встановлено, що майже для всіх виготовлених зразків кавітаційних насадків характерно виникнення газової гідродинамічної кавітації та першої стадії паро-газової. Про це свідчать високі значення числа Рейнольдса і низькі значення числа кавітації. Найбільш раціональним є використання кавітаційного насадка ступеневого на вході та виході з діаметром горловини сопла 6 мм, який також показав найбільшу здатність перемішування потоку рідини на виході з нього при вхідному тиску 0,12 МПа при числі кавітації  $\chi > 1$ .

4. Експериментальний статичний кавітаційний насадок, ступеневий на вході та виході, дозволяє ефективно перемішувати шари рідини та отримати руйнування структурних і міжмолекулярних зв'язків, зміну її властивостей та складу, що підтвердили експериментальні дослідження його застосування.

5. У результаті застосування комплексної дії гідрокавітації у статичному кавітаторі та вібраційному кавітаторі з омагнічуванням потоку статичним магнітним полем з градієнтом напруженості вздовж потоку рідини отримано створення інтенсивних умов проведення окислювальних та водневих реакцій у реальних режимах роботи обладнання водопідготовки, що показали зміни параметрів окислювального відновлювального потенціалу за часом оброблення та зміною показника вмісту загальної мінералізації за часом, а також показник рН водопровідної води за часом оброблення.

6. Дослідження за допомогою відеофіксації формування кавітаційних процесів у камері пульсації поршневого кавітатора – вібраційної машини – дало можливість визначити реальні параметри роботи вібраційного приводу, а саме частотний діапазон коливань поршня, який знаходиться від 14 до 16 Гц при амплітуді 2 мм та діаметрі камери пульсації 100 мм.

7. Отримано рівняння регресії залежності показника рН водного середовища від рівня магнітної індукції, швидкості проходження потоку рідини

по трубопроводу та відстані між постійними магнітами, які його охоплюють. Використання отриманої залежності дає можливість визначати оптимальні параметри запропонованого обладнання від їх зміни в межах : $600 \text{ мТл} \leq (B) \leq 1200 \text{ (мТл)}$ ;  $2 \leq V \leq 4 \text{ (м/с)}$ ;  $15 \leq l \leq 35 \text{ (мм)}$ .

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. На основі аналізу джерел з виникнення кавітаційних процесів у статичних кавітаторах та вібраційних машинах зміни складу та властивостей води, застосування магнітного поля сформовано достатнє уявлення про область досліджень і розробок для по кавітаційно-магнітному впливу на стан води та визначити напрямки досліджень.

2. Розроблено фізичну модель поршневого кавітатора – вібраційної машини та побудовано математичну модель руху середовища у поршковому кавітаторі – вібраційній машині, що дало можливість визначити її максимальну продуктивність при зміні максимального тиску у камері пульсації від режимів роботи приводу. Отриману аналітичну залежність максимального тиску у камері пульсації вібраційної машини з коригувальним коефіцієнтом застосовано для визначення її продуктивності.

3. Сформовано методику проведення експериментальних досліджень динамічних параметрів роботи поршневого кавітатора – вібраційної машини – для визначення впливу режимів приводу машини на процес очищення та зміни властивостей води.

4. Дослідження за допомогою відеофіксації формування кавітаційних процесів у камері пульсації поршневого кавітатора (вібраційної машини) при застосуванні низькочастотних вібрацій дозволило визначити реальні параметри роботи вібраційного приводу, а саме: частотний діапазон коливань поршня, який знаходиться від 14 до 16 Гц при амплітуді 2 мм та діаметрі камери пульсації 100 мм.

5. Проведено дослідження динамічних та конструктивних параметрів насадків статичного кавітатора методом моделювання кавітаційних процесів у SolidWorks Flow Simulation. У результаті проведених досліджень моделювання кавітаційних процесів у SolidWorks в різних за конструктивними особливостями статичних кавітаторів було отримано траєкторії руху шарів рідини при проходженні крізь кавітатори та картину розподілу величини тиску

у різних точках кавітаторів, що дало можливість визначити оптимальну конструкцію статичного кавітатора – ступінчастого на вході та виході та режими його роботи: тиск на вході 0,12 МПа при числі кавітації  $\chi = 1$ .

6. Проведено експериментальні дослідження працездатності кавітаційно-магнітного обладнання з вібраційною машиною для очищення та зміни властивостей води. Експериментальні дослідження зміни структури води кристало-оптичним методом показали, що після оброблення води в кавітаційно-магнітному обладнанні спостерігається рівномірне вільне розтікання рідини з утворенням більш рівномірно утвореного осаду, що говорить про зменшення поверхневого натягу та рівномірний розподіл кристалів осаду карбонатів  $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{MgCO}_3$ , оксикарбонатів  $\text{Mg}_2(\text{OH})_2\text{CO}_3$  і гідроокисів  $\text{Fe}(\text{OH})_2$  по поверхні. Це пояснюється структуризацією води – подрібненням її кластерної структури, відсутністю росту дендритних структур та отримано створення інтенсивних умов проведення окислювальних та водневих реакцій у реальних режимах роботи обладнання водопідготовки, які показали зміни параметрів окислювального відновлювального потенціалу водного середовища за часом оброблення та зміною показника вмісту загальної мінералізації за часом, а також показника рН води за часом оброблення, спостерігається збільшення показника рН з 7,4 до 8,3 од., що говорить про покращення якості водного середовища.

7. Проведено експериментальні дослідження зміни рН водного середовища при кавітаційному та комплексному кавітаційно-магнітному впливі. За результатами проведеного багатофакторного експериментального дослідження визначення зміни показника рН води при кавітаційно-магнітній обробці встановлено, що при збільшенні рівня магнітної індукції показник рН зменшується до 8,1 од., при збільшенні швидкості проходження потоку рідини від 3 до 4 м/с показник рН не змінюється та зі зміною відстані між магнітами від 15 до 35 мм спостерігається максимум збільшення рН при відстані 25 мм. Рекомендовані параметри кавітаційного та магнітного блоків такі: рівень

магнітної індукції 900 мТ; швидкість потоку рідини 3 м/с; оптимальна відстань між магнітами становить 25 мм.

8. Використання отриманого рівняння регресії залежності показника рН водного середовища від рівня магнітної індукції  $B$ , швидкості проходження потоку рідини по трубопроводу  $V$  та відстані між магнітами  $l$  дає можливість визначати оптимальні параметри запропонованого обладнання від їх зміни в межах:  $600 \text{ мТл} \leq (B) \leq 1200 \text{ (мТл)}$ ;  $2 \leq V \leq 4 \text{ (м/с)}$ ;  $15 \leq l \leq 35 \text{ (мм)}$ .

9. Прямі термостатичні вимірювання кипіння дистильованої води, обробленої кавітаційно-магнітним полем, показали, що оброблена кавітаційно-магнітним впливом дистильована вода, на відміну від звичайної, не має строго певної температури кипіння. Відхилення від прямої лінії починаються вище  $80^\circ\text{C}$ . Це свідчить про порушення нерівноцінності водневих зв'язків між молекулами води після кавітаційно-магнітним обробки.

10. Сформовано прикладну методологію проектування обладнання, розроблено рекомендації щодо використання та передано на виробництво матеріали експериментально-промислової моделі кавітаційно-магнітного обладнання очищення та зміни властивостей води для котелень.

11. Одержані результати були використані у розробленні рекомендацій для проектування ефективного обладнання водопідготовки для тепломреж на першому етапі, що дасть можливість зменшити навантаження на обладнання при застосуванні мембранних технологій – зворотного осмосу та ультрафільтрації на другому етапі. Застосування запропонованого обладнання попередньої кавітаційно-магнітної водопідготовки дає можливість знизити навантаження на блоки очищення, іонного обміну, деаерацію води, та підвищити якість водопідготовки, зменшити осідання на металевих стінках обладнання кірку, що знижує його тепловіддачу, дозволяє виключити ймовірність аварій і виходу обладнання з ладу через утворення накипу.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Хомутецька Т., Хоружий В. Оптимізація роботи установок при знезалізненні підземних і доочищенні стічних вод. *Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки*. К.: КНУБА, 2022, вип. 38, С. 50–55.
2. Кравченко О., Хоружий В. Особливості експлуатації систем питного водопостачання в умовах воєнного часу. *Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки*. К.: КНУБА, 2022, вип. 38, С. 18–37.
3. Хомутецька Т., Аргатенко Т. Дослідження зміни показників якості підземних вод за час експлуатації водозабірної свердловини. *Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки*. К.: КНУБА, 2022, вип. 39. С. 71–80.
4. Павлов Є., Ліфанов О. Зміна якості питної води і опору трубопроводу при транспортуванні її по водопровідних трубах. *Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки*. К.: КНУБА, 2022, вип. 38, С. 50–54.
5. Gogate, P. R.; Pandit, A. B. A Review and Assessment of Hydrodynamic Cavitation as a Technology for the Future. *Ultrason. Sonochem.* 2005, 12, С. 21–27.
6. Badmus K. O., Irakoze N., Adeniyi O. R., Petrik L. Synergistic Advance Fenton Oxidation and Hydrodynamic Cavitation Treatment of Persistent Organic Dyes in Textile Wastewater. *J. Environ. Chem. Eng.* 2020, 8, 103521.
7. Thanekar P., Panda M., Gogate P.R. Degradation of Carbamazepine Using Hydrodynamic Cavitation Combined with Advanced Oxidation Processes. *Ultrason. Sonochem.* 2018, 40, С. 567–576.
8. Joshi S. M., Gogate P. R. Intensification of Industrial Wastewater Treatment Using Hydrodynamic Cavitation Combined with Advanced Oxidation at Operating Capacity of 70 L. *Ultrason. Sonochem.* 2019, 52, С. 375–381.
9. Thanekar P., Gogate P. R., Znak Z., Sukhatskiy Y., Mnykh R. Degradation of Benzene Present in Wastewater Using Hydrodynamic Cavitation in Combination with Air. *Ultrason. Sonochem.* 2021, 70, 105296.

10. Yi C., Lu Q., Wang Y., Wang Y., Yang B. Degradation of Organic Wastewater by Hydrodynamic Cavitation Combined with Acoustic Cavitation. *Ultrason. Sonochem.* 2018, 43, C. 156–165.
11. Kovačič A., Škufca D., Zupanc M., Gostiša J., Bizjan B., Krištofelc N., Dolenc M. S. Heath E. The Removal of Bisphenols and Other Contaminants of Emerging Concern by Hydrodynamic Cavitation: From Lab-Scale to Pilot-Scale. *Sci. Total Environ.* 2020, 743, 140724.
12. Wang J., Chen H., Yuan R., Wang F., Ma F. Zhou B. Intensified Degradation of Textile Wastewater Using a Novel Treatment of Hydrodynamic Cavitation with the Combination of Ozone. *J. Environ. Chem. Eng.* 2020, 8, 103959.
13. Abramov V. O., Abramova A. V., Cravotto G., Nikonov R. V., Fedulov I. S., Ivanov V. K. Flow-Mode Water Treatment under Simultaneous Hydrodynamic Cavitation and Plasma. *Ultrason. Sonochem.* 2021, 70, 105323.
14. Wang B., Su H., Zhang B. Hydrodynamic Cavitation as a Promising Route for Wastewater Treatment—A Review. *Chem. Eng. J.* 2021, 412, 128685.
15. Terán H. R., Medeiros D. R., Sánchez M. S., Aline P. C., de Sousa Júnior R., da Silva S. S., Santos J. C. Hydrodynamic Cavitation-Assisted Continuous Pre-Treatment of Sugarcane Bagasse for Ethanol Production: Effects of Geometric Parameters of the Cavitation Device. *Ultrason. Sonochem.* 2020, 63, 104931.
16. Zsirai T., Al-Jaml A. K., Qiblawey H., Al-Marri M., Ahmed A., Bach S., Watson S. Judd S. Ceramic Membrane Filtration of Produced Water: Impact of Membrane Module. *Sep. Purif. Technol.* 2016, 165, C. 214–221.
17. Goswami K. P., Pugazhenti G. Treatment of Poultry Slaughterhouse Wastewater Using Tubular Microfiltration Membrane with Fly Ash as Key Precursor. *J. Water Process Eng.* 2020, 37, 101361.
18. Solmaz A., Işık M. Optimization of Membrane Photobioreactor; the Effect of Hydraulic Retention Time on Biomass Production and Nutrient Removal by Mixed Microalgae Culture. *Biomass Bioenergy.* 2020, 142, 105809.
19. Terán Hilares R., Garcia Bustos K. A., Sanchez Vera F. P., Colina Andrade G. J., Pacheco Tanaka D. A. Acid Precipitation Followed by Microalgae

(*Chlorella vulgaris*) Cultivation as a New Approach for Poultry Slaughterhouse Wastewater Treatment. *Bioresour. Technol.* 2021, 335, 125284.

20. Gałol M., Przyjazny A., Boczkaj G. Wastewater Treatment by Means of Advanced Oxidation Processes Based on Cavitation—A Review. *Chem. Eng. J.* 2018, 338, C. 599–627.

21. Gogate P. R. Cavitation: An Auxiliary Technique in Wastewater Treatment Schemes. *Adv. Environ. Res.* 2002, 6, 335–358.

22. Thanekar P., Lakshmi N. J., Shah M., Gogate P. R., Znak Z., Sukhatskiy Y., Mnykh R. Degradation of Dimethoate Using Combined Approaches Based on Hydrodynamic Cavitation and Advanced Oxidation Processes. *Process Saf. Environ. Prot.* 2020, 143, C. 222–230.

23. Montalvo Andia J. P., Ticona Cayte A. E., Illachura Rodriguez J. M., López Belón L., Cárdenas Málaga, M. A., Teixeira L. A. C. Combined Treatment Based on Synergism between Hydrodynamic Cavitation and H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> for Degradation of Cyanide in Effluents. *Miner. Eng.* 2021, 171, 107119.

24. Fedorov K., Sun X., Boczkaj G. Combination of Hydrodynamic Cavitation and SR-AOPs for Simultaneous Degradation of BTEX in Water. *Chem. Eng. J.* 2021, 417, 128081.

25. Kadam S. R., Jadhav N. L., Pandit A. B., Pejaver M. K. Degradation Kinetics and Mechanism of Hazardous Metribuzin Herbicide Using Advanced Oxidation Processes (HC & HC+ H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>). *Chem. Eng. Process.-Process Intensif.* 2021, 166, 108486.

26. Petkovšek M., Mlakar M., Levstek M., Stražar M., Širok B., Dular M. A Novel Rotation Generator of Hydrodynamic Cavitation for Waste-Activated Sludge Disintegration. *Ultrason. Sonochem.* 2015, 26, pp. 408–414.

27. Sun X., You W. B., Xuan X. X., Ji L., Xu X., Wang G.C., Zhao S., Boczkaj G., Yoon J. Y., Chen S. Y. Effect of the cavitation generation unit structure on the performance of an advanced hydrodynamic cavitation reactor for process intensifications. *Chem. Eng. J.* 2021, 412, 15.

28. Вібраційні машини для знезаражування та зміни властивостей води / Гордєєв А. І., Ганзюк А. Л., Костюк Н. О., та ін. Хмельницький: ФОП «Мельник», 2021. 168 с.

29. Гордєєв А. І., Вібраційні машини для знезаражування, зміни властивостей та складу водного середовища гідрокавітацією. *Наука і техніка сьогодні* (Серія «Фізико-математичні науки»): журнал. 2022. № 6(6) 2022. С. 427–439.

30. Nazar Kostyuk, Anatoliy Hordieiev, Algimantas Bubulis, Oleksii Hordieiev. Dynamic processes in the pulsation chamber vibration machine for disinfection of water. *Journal of Vibroengineering - Mechanical vibrations and applications*. Vol. 23. Is.4. 2021. pp.799–809.

31. Костюк Н. О., Гордєєв А. І., Гордєєв О. А. Обґрунтування динамічних та конструктивних параметрів вібраційної машини для знезаражування та зміни властивостей води. *Вісник ХНУ. Технічні науки*. №6. 2019. С. 40–47.

32. Долінський. А. А., Авдєєва Л. Ю., Жукоцький Е. К., Макаренко А. А. Застосування кавітаційних технологій при обробці рідких гетерогенних систем. *Наукові праці*. Одеська національна академія харчових технологій, вип. 45 (3). 2014. С. 9–13.

33. Fabio P., Sánchez Vera Gilberto J., Colina Andrade Kevin, Tejada Meza, Jaime Cárdenas García, David Alfredo, Pacheco Tanaka. Continuous Cultivation of Microalgae in Cattle Slaughterhouse Wastewater Treated with Hydrodynamic Cavitation. *Water*. 2022, 14(8), 1288; <https://doi.org/10.3390/w14081288>.

34 Гідродинамічний кавітаційний реактор / В. М. Кравчук, Є. Ю. Романов: пат. на корисну модель 26547 Україна: МПК С02F 1/34. № u200705623: заяв. 22.05.2007; опубл. 25.09.2007, Бюл. №15.

35 Промтов, М. А., Степанов А. Ю. Критериальные зависимости для расчета процесса экстрагирования гуминовых кислот из торфа и биогумуса в роторном импульсном аппарате. *Вестник ТГУ*. 2021. Т. 27, № 2. С. 263–274. DOI10.17277/vestnik.2021.02.pp.263-274.

36. Промтов, М. А., Степанов А. Ю. Кинетика совмещенных процессов диспергирования и экстракции гуминовых и фульвовых кислот из торфа и биогумуса в роторном импульсном. *Химия растительного сырья*. 2019. № 2. С. 261–269. DOI 10.14258/jcprtm.2019024536

37. Ушаков О. В. Соколин В. М., Костенко М. Ю. Снижение абразивного износа на технологических линиях по производству гуминовых препаратов из торфа. *Вестник РГАТУ*. 2016. № 1(29). С. 86–90.

38. Гіодинамічний струменевий кавітатор / В. Т. Яворський, З.О. Знак, Ю. В. Сухацький, Р. В. Мних, Р. Р. Оленич, О. Г. Курилець: пат. на корисну модель 101525 Україна: МПК В01F 3/00 В01J 14/00. № u201501762: заяв. 27.02.2015; опубл. 25.09.2015, Бюл. № 18.

39. Шевчук Л. І., Афтаназів І. С., Строган О. І. Магнітно-кавітаційне знезаражування води. *Восточно-Европейский журнал передових технологій*. № 5/6 (53). 2011. С. 7–11.

40. Pang X. F., Deng B. The changes of macroscopic features and microscopic structures of water under influence of magnetic field *Phys B Condensed Matter*, 403 (19–20) (2008), pp. 3571–3577.

41. Han X., Peng Y., Ma Z. Effect of magnetic field on optical features of water and KCl solutions *Optik-Int. J Light Electron Optics*, 127 (16) (2016), pp. 6371–6376.

42. Holysz L., Szczes A., Chibowski E. Effects of a static magnetic field on water and electrolyte solutions. *J Colloid Interface Sci*, 316 (2) (2007), p. 996.

43. Amiri M. C., Dadkhah A. A. On reduction in the surface tension of water due to magnetic treatment. *Colloids Surf A*, 278 (1) (2006), pp. 252–255.

44. Wang Y., Zhang B., Gong Z., *et al.* The effect of a static magnetic field on the hydrogen bonding in water using frictional experiments. *J Mol Struct*, 1052 (11) (2013), pp. 102–104.

45. Cai R., Yang H., He J., *et al.* The effects of magnetic fields on water molecular hydrogen bonds. *J Mol Struct*, 938 (1–3) (2009), pp. 15–19.

46. Toledo E. J. L., Ramalho T. C., Magriotis Z. M. Influence of magnetic field on physical–chemical properties of the liquid water: insights from experimental and theoretical models. *J Mol Struct*, 888 (1–3) (2008), pp. 409–415.

47. Chang K. T., Weng C. I. The effect of an external magnetic field on the structure of liquid water using molecular dynamics simulation. *J Appl Phys*, 100 (2006), p. 043917.

48. Баран Б. А. Влияние переменного магнитного поля на скорость окислительно-восстановительных реакций. *Укр. Хим. Журн.* 1999. Т.65, №7. С. 27–30.

49. Баран Б. А. Швидкість хімічних процесів в попередньо омагніченій воді. *Вестник Харьковського гос. политех. ун-та.* 1999. вып. 56. С. 19–24.

50. Баран Б. А., Дроздовський В. Б. Вплив конфігурації магнітного поля на іонний обмін. Частина III. *Вісник технологічного університету Поділля.* 1999. № 6. С. 174–177.

51. Пат. 32362 Україна, МПК С02F1/48. Экспрес-метод контролю магнітної водопідготовки / Баран Б. А. №99042305; Заявл. 23.04.1999; Опубл. 15.12.2000, Бюл. № 7–11.

52. Спосіб підготовки води. № 12958 МПК С02F 1/48; u200506933 Прибильський В. Л., Остапенко В. В., Костюк О. М., Костюк І. О., Адаменко О. А.. Заявл. 14.07.2005; Опубл. 15.03.2006, Бюл. № 3.

53. Пристрій для магнітного очищення рідини. №44324. МПК С02F 1/48; u200905451. Терентьев О. М., Можаровська О. А., Ворфоломеев А. В.. Заявл. 25.09.2009; Опубл. 25.09.2009, Бюл. № 18.

54. А. с. 958324 СССР, МКИЗ С 02 F 1/48. Устройство для магнитной обработки жидкости / Душкин С. С., Омельченко Е. М., Беляев В. И., Брацун А. Я., Ерина И. Н., Курский И. А., Сухинин В. И., Сырова В. А. ; Харьков. ин-т инж. коммун. стр-ва, Произв. упр. водопровод.-канализ. хоз-ва. № 3240378/23-26; Заявл. 02.02.81; Опубл. 15.09.82, Бюл. № 34.

55. А. с. 1403007 СССР, МКИЗ С02F 1/48. Устройство для магнитной обработки жидкости / Душкин С. С., Омельченко Е. М., Беляев В. И., Конев И.

Д., Бондаренко В. В., Дегтярєв В. А., Косарев А. В.; Харьков. ин-т инж. коммун. стр-ва, Харьков. произв.-техн. предпр. Треста «Укрэнергочермет». № 3616320/24-26; Заявл. 06.07.83 ; Опубл. 15.06.88, Бюл. № 22.

56. Пат. 37414 А Україна МПК С02F1/48. Пристрій для обробки водних розчинів магнітним полем / Баран Б. А., Дроздовський В. Б. №980951558; Опубл. 15.05.2001. Бюл. №4.

57. Пат. 32362 Україна, МПК С02F1/48. Експрес-метод контролю магнітної водопідготовки / Баран Б. А. №99042305; Заявл. 23.04.1999; Опубл. 15.12.2000, Бюл. № 7-11.

58. Спосіб підготовки води. № 12958 МПК С02F 1/48; u200506933 Прибильський В. Л., Остапенко В. В., Костюк О. М., Костюк І. О., Адаменко О. А.. Заявл. 14.07.2005; Опубл. 15.03.2006, Бюл. № 3.

59. Пристрій для магнітного очищення рідини. №44324. МПК С02F 1/48; u200905451. Терентьев О. М., Можаровська О. А., Ворфоломеев А. В.. Заявл. 25.09.2009; Опубл. 25.09.2009, Бюл.№ 18.

60. Пристрій для магнітної обробки рідини. № 53027. МПК 7С02F1/48; u 2002020999; Боровікова Н. О., Бурняпн В. О., Григоренко С. А., Кислая Л. В., Попова В. М., Фефелов О. О. Заявл. 07 02 2002; Опубл. 15 01 2003, Бюл № 1.

61. Спосіб магнітного очищення рідини. №63071 МПК С02F 1/48; u201102539 Терентьев О. М., Можаровська О. А., Ворфоломеев А. В.. Заявл. 03.03.2011. Опубл. 26.09.2011, Бюл.№ 18.

62. Спосіб реструктуризації та очищення рідини. №123178 МПК С02F 1/36; u 2017 09677; Терентьев О. М., Можаровська О. А.. Заявл. 03.10.2017. Опубл. 12.02.2018, Бюл.№ 3.

63. Пристрій для магнітної обробки рідини. № 53027. МПК 7С02F1/48 2002020999. Заявл. 07 02 2002; Опубл. 15 01 2003, Бюл. № 1.

64. Спосіб магнітного очищення рідини. №63071 МПК С02F 1/48; u201102539. Заявл. 03.03.2011. Опубл. 26.09.2011, Бюл. № 18.

30. Спосіб реструктуризації та очищення рідини. №123178 МПК С02F 1/36 u 2017 09677. Заявл. 03.10.2017. Опубл. 12.02.2018, Бюл.№ 3.

65. Пристрій для магнітної обробки рідини. № 53027. МПК 7C02F1/48; u 2002020999 Боровікова Н. О., Бурнян В. О., Григоренко С. А., Кислая Л. В., Попова В. М., Фефелов О. О. Заявл. 07 02 2002; Опубл. 15 01 2003, Бюл № 1.
66. Спосіб магнітного очищення рідини. №63071 МПК C02F 1/48; u201102539 Терентьев О. М., Можаровська О. А., Ворфоломеев А. В.. Заявл. 03.03.2011. Опубл. 26.09.2011, Бюл. № 18.
67. Спосіб реструктуризації та очищення рідини. №123178 МПК C02F 1/36; u 2017 09677; Терентьев О. М., Можаровська О. А.. Заявл. 03.10.2017. Опубл. 12.02.2018, Бюл.№ 3.
68. Кавітаціо-магнітний пристрій зміни властивостей та складу води для котелень. №161692. МПК F25B 15/02 / Душенко О. С., Ткачук В. П. u202406294. Заявл.30.12.24. Опубл. 02.10.25.
69. Курта С. А. Будова речовини, навчально-методичний посібник. ВДВ ЦІТ Прикарпатського національного університету імені Василя Стефаника м.Івано-Франківськ-Калуш. 2007.162 с.
70. Зацепина Г. Н. Свойства и структура воды. Изд-во МГУ,1998. 48 с.
71. Хорн Р. Морская химия. Пер. с англ. "Мир", 1972. 399 с.
72. Баран Б. А. Вплив магнітного поля на фармакодинаміку деяких сполук. *Науковий вісник Ужгородського ун-ту*. 1999. Вип.4. С. 154–156.
73. Баран Б. А. Влияние магнитного поля на кинетику химических реакций. *Укр. хим. журнал*. 1998. Т.64, №4. С. 26–29.
74. Баран. Б. А. Роль водневих зв'язків при дії магнітного поля на воду. *Вісник технологічного ун-ту Поділля*. 1999. №2. С. 113–115.
75. Долінський А. А., Авдєєва Л. І., Макаренко А. А. Кавітаційні технології виробництва нанопрепаратів. Київ: Наук. Думка. 2020. 112 с.
76. Adrien M., Bronson V. M., Xu Zh., Liu Q. Study of Venturi tube geometry on the hydrodynamic cavitation for the generation of microbubbles. *Minerals Engineering*. V.132, 2019. pp. 268–274.
77. Авдєєва Л. Ю., Павлик В. Ю. Дослідження впливу ефектів гідродинамічної кавітації на властивості складних багатокомпонентних систем. *Теплофізика та теплоенергетика*, 2022, т. 44, №2. С. 21–28.

78. Carpenter J., Badve M., Rajoriya S., George S., Saharan V. K., & Pandit A. B. Hydrodynamic cavitation: an emerging technology for the intensification of various chemical and physical processes in a chemical process industry. *Reviews in Chemical Engineering*, 33(5). 2017. pp.433–468.

79. Кавітаційний змішувач: пат. 99791 Україна, МПК В01F 3/00. № u201413909; заявл 25.12.2014; опубл. 25.06.2015, бюл. № 12.

80. Кавітаційний змішувач: пат. 99790 Україна, МПК В01F 3/00, С12М 1/00, С12М 1/33 (2006.01). № u201413908; заявл 25.12.2014; опубл. 25.06.2015, бюл. № 12.

81. Кавітаційний апарат: пат. 51798 Україна, МПК В01F 3/00, D21В 1/00. № u201003840; заявл 02.04.2010; опубл. 26.07.2010, бюл. № 14.

82. Кавітаційний змішувач: пат. 52855 Україна, МПК В01F 5/00. № 2000031295; заявл. 06.03.2000; опубл. 15.01.2003, бюл. № 1.

83. Спосіб керування процесом кавітаційного змішування і кавітаційний змішувач: пат. 52856 Україна, МПК В01F 5/00. № 2000031296; заявл. 06.03.2000; опубл. 15.01.2003, бюл. № 1.

84. Кавітаційний змішувач: пат. 41126 Україна, МПК В01F 5/00. №u200812866; заявл. 04.11.2008; опубл. 12.05.2009, бюл. № 9.

85. Кавітаційний змішувач: пат. 31086 Україна, МПК В01F 5/00. № u200713165; заявл. 27.11.2007; опубл. 25.03.2008, бюл. № 6.

86. Кавітаційний змішувач проточного типу: пат. 11842 Україна, МПК В01F 5/00. № u200506265; заявл. 24.06.2005; опубл. 16.01.2006, бюл. № 1.

87. Cavitating jet: pat. US 2003/0047622 A1 USA, Int. Cl. B05B 1/26. № 10/220,005, 26.01.2001; 13.03.2003.

88. Кавітаційний змішувач: пат. 54917 Україна, МПК(2009) В01F 3/00, С12М 1/00, С12М 1/33. № u201007155; заявл. 09.06.2010; опубл. 25.11.2010, бюл. № 22.

89. Кавітаційний змішувач: пат. 1398 Україна, МПК В01F 5/00. № 93250341; заявл. 02.02.1993; опубл. 25.03.1994, бюл. № 1.

90. Кавітаційний змішувач: пат. 108597 Україна, МПК В01F 3/00, В01F 5/00. № u201600326; заявл. 15.01.2016; опубл. 25.07.2016, бюл. № 14.

91. Кавітаційний змішувач: пат. 68821 Україна, МПК В01F 3/0. № u201111923; заявл. 11.10.2011; опубл. 10.04.2012, бюл. № 7.

92. Кавітаційний змішувач: пат. 106510 Україна, МПК В01F 3/00. №u201511177; заявл. 13.11.2015; опубл. 25.04.2016, бюл. № 8.
93. Кавітаційний змішувач: пат. 50231 Україна, МПК В01F 5/00. №u200913413; заявл. 23.12.2009; опубл. 25.05.2010, бюл. № 10.
94. Кавітаційний змішувач: пат. 1399 Україна, МПК В01F 5/00. №93250342; заявл. 08.02.1993; опубл. 25.03.1994, бюл. № 1.
95. Кавітаційний змішувач: пат. 1017 Україна, МПК В01F 5/00, D21B 1/00. № 93230168; заявл. 08.02.1993; опубл. 30.12.1993, бюл. № 3.
96. Кавітаційний змішувач: пат. 69124 Україна, МПК В01F 5/00, D21B 1/00. № 20031211178; заявл. 16.08.2004; опубл. 16.08.2004, бюл. № 8.
97. Кавітаційний змішувач: пат. 1397 Україна, МПК В01F 5/00. №93250340; заявл. 02.02.1993; опубл. 25.03.1994, бюл. № 1.
98. Кавітаційний апарат: пат. 52910 Україна, МПК В01F 3/00. № u201004377; заявл. 14.04.2010; опубл. 10.09.2010, бюл. № 17.
99. Кавітаційний змішувач: пат. 70660 Україна, МПК В01F 5/00. №u201112959; заявл. 04.11.2011; опубл. 25.06.2012, бюл. № 12.5.
100. Кавітаційний змішувач: пат. 30486 Україна, МПК В01F 5/00. № 98052486; заявл. 13.05.1998; опубл. 15.11.2000, бюл. № 6.
101. Cavitation mixer: pat. US 2003/0147303 A1 USA, Int. Cl. B05B 5/08 №10/220,097, 28.02.2001; Pub. date 07.08.2003.
102. Multi-chamber supercavitation reactor: pat. US 2007/0189114 A1 USA, Int. Cl. B01F 5/08, B01J 19/26. № 11/679,665, 27.02.2007; Pub, date 16.08.2007.
103. Cavitation mixer or stabilizer: pat. US 2007/0041266 A1 USA, Int. Cl. B01F 3/08, B01F 5/04. № 11/499,453, 04.08.2006; Pub. date 22.02.2007.
104. Проточно-кавітаційний змішувач: пат. 44179 Україна, МПК В01F 5/00, B01F 7/04, B01B 1/36. № 2001064151; заявл. 15.06.2001; опубл. 15.01.2002, бюл. № 1.
105. Генератор кавітації: пат. 64225 Україна, МПК F02M 33/00. № 2003043076; заявл. 08.04.2003; опубл. 16.02.2004, бюл. № 2.
106. Yunhua, J., Tao B., Ye G. Formation and steady flow characteristics of ventilated supercavity with gas jet cavitator. *Ocean Engineering*. 2017. Vol. 142. pp. 87–93.

107. Byoung-Kwon, Ahn., Tae-Kwon Lee, Hyoung-Tae Kim, Chang-Sup. Lee Experimental investigation of supercavitating flows. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*. 2012. Vol. 4, iss. 2. pp. 123 – 131.
108. Pendar M., Roohi E. Investigation of cavitation around 3D hemispherical head-form body and conical cavitators using different turbulence and cavitation models. *Ocean Engineering*. 2016. Vol. 112. Pp. 287–306.
109. Ye-jun, G., Jie-min Zh., Tian-zeng L. Numerical investigation of the effect of rotation on cavitating flows over axisymmetric cavitators. *Journal of hydrodynamics*. 2016. Vol. 28, iss. 3. pp. 431 – 441.
110. Ebrahim, K., Erfan K., Khodayar J., Seyyed Morteza J. The investigation of natural super-cavitation flow behind three- dimensional cavitators: Full Cavitation Model. *Applied Mathematical Modelling*. 2017. Vol. 45. pp. 165 –178.
111. Young Kyun Kwack, Kyun Kwack, Sung Ho Ko. Numerical analysis for supercavitating flows around axisymmetric cavitators. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*. 2013. Vol. 5, iss. 3. pp. 325 – 332.
112. Badve, M. P., Alpar, T., Pandit, A. B., Gogate, P. R., & Csoka, L. Modeling the shear rate and pressure drop in a hydrodynamic cavitation reactor with experimental validation based on KI decomposition studies. *Ultrasonics & Sonochemistry*, 22. 2015. pp. 272–277.
113. Інноваційні нанотехнології активації і знезаражування води та вібраційне обладнання [Р. І. Сілін, А. І. Гордєєв, Г. Б. Параска, В. Д. Пархоменко, В. В. Кравчук] Хмельницький: ХмЦНП, 2013. 252 с., іл.
114. Музыкин Ю. Д., Попова И. М., Дмитриев Ф. А. Термодинамические условия перехода газа из растворенного состояния в нерастворенное в рабочих жидкостях гидросистем. *Труды МИИЖТ*. 1980. №669. С. 58–66.
115. Wei YG, Jiao YS, An D, Li DL, Li WS, Wei Q. Review of dissolved oxygen detection technology: from laboratory analysis to online intelligent detection. *Sensors-Basel*. 2019;19:3995.
116. Арзуманов Э. С. Кавитация в местных гидравлических сопротивлениях. *Энергия*, 1978. 304 с.
117. Говорков В. М., Шабалин К. Н. Влияние вибраций на выделение газа из жидкой фазы. *ИФИ*. 1964. №2. С. 15–20.
118. Маргулис М. А. Звукохимические реакции и сонолюминесценция. *Химия*, 1986. 288 с.

119. М. А. Маргуліс, І. М. Маргуліс. Динаміка ансамблю бульбашок у кавітуючій рідині. *Журнал фізичної хімії*, т. 81, 12, 2007, С. 2290–2295.
120. Душкин С. С. Улучшение технологии очистки природных и сточных вод магнитным полем. Харків. Вища шк., 1988. 146 с.
121. Миненко В. И. Электромагнитная обработка воды в теплоэнергетике. Харьков: Изд. ХГУ, 1981. С. 30–52.
122. Семихина Л. П., Киселев В. Ф. Влияние слабых магнитных полей на свойства воды и льда. *Изв. вузов. Физика*. 1988. №5. С. 13–17.
123. Калінський, Є. О., Бордюк О. Ю., Єрмаков С. О. Вплив електромагнітного випромінювання на біологічні властивості води. *Харчова промисловість*. 2004. Вип. 3. С. 98–99.
124. Перспективы развития фундаментальных и прикладных исследований в области физики, химии и биологии воды / под ред. В. В. Гончарука. Киев : Наук. думка, 2011. 407 с.
125. Вплив механічної і магнітної обробки на фізико-хімічні показники води [В. В. Остапенко, В. Л. Прибильський, І. О. Костюк, О. М. Костюк] *Харчова промисловість*. 2007. Вип. 5. С. 45–47.
126. Чеботарева Р. Д., Наниева А. В., Ремез С. В. Особенности магнитной обработки вод кальциево-гидрокарбонатного класса. *Химия и технология воды*. 2020. Т. 42, № 5 (277). С. 490–498.
127. Терентьев О. М., Ворфоломеев А. В. Знезалізнення води осесиметричним сфокусованим магнітним полем [Електронний ресурс] *Вода і водоочисні технології. Науково-технічні вісті*. 2014. № 1. С. 35–46.
128. Дослідження впливу сили електромагнітного поля на якість очистки води від важких металів методом феритизації. [Ємчура Б. М., Пахомов Д. В., Кочетов Г. М., Самченко Д. В.] *Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки*. К.: КНУБА, 2021, вип. 35. С. 4–10.
129. Пахомов Д. В., Кочетов Г. М., Самченко Д. В. Феритизаційна очистка стічних вод від сполук хрому (VI) з використанням електромагнітної імпульсної активації. *Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки*.

К.: КНУБА, 2021, вип. 37. С. 65–74.

130. Гаращенко О. В., Гаращенко В. І. Ресурсозберігаюча технологія магнітного очищення водних середовищ [Електронний ресурс] *Наукові праці Одеської національної академії харчових технологій*. 2015. Вип. 47 (2). С. 105–108.

131. Holysz L., Szczes A., Chibowski E. Effects of a static magnetic field on water and electrolyte solutions. *J Colloid Interface Sci.* 2007;316(2):996. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2007.08.026>.

132. Amiri M. C., Dadkhah A. A. On reduction in the surface tension of water due to magnetic treatment. *Colloids Surf A.* 2006;278(1):252–5. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2005.12.046>.

133. Cai R., Yang H., He J., et al. The effects of magnetic fields on water molecular hydrogen bonds. *J Mol Struct.* 2009;938(1–3). pp. 15–9. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2009.08.037>.

134. Toledo E. J. L, Ramalho T. C, Magriotis Z. M. Influence of magnetic field on physical–chemical properties of the liquid water: insights from experimental and theoretical models. *J Mol Struct.* 2008;888(1–3). pp. 409–415. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2008.01.010>.

135. Chang K. T., Weng C. I. The effect of an external magnetic field on the structure of liquid water using molecular dynamics simulation. *J Appl Phys.* 2006;100:043917. <https://doi.org/10.1063/1.2335971>.

136. Liu B., Gao B., Xu X., et al. The combined use of magnetic field and iron-based complex in advanced treatment of pulp and paper wastewater. *Chem Eng J.* 2011;178(1). pp. 232–238. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2011.10.058>.

137. Kobe S., Drazic G., McGuinness P. J., et al. The influence of the magnetic field on the crystallisation form of calcium carbonate and the testing of a magnetic water-treatment device. *J Magn Magn Mater.* 2001; 236(1–2). pp. 71–6. [https://doi.org/10.1016/S0304-8853\(01\)00432-2](https://doi.org/10.1016/S0304-8853(01)00432-2).

138. Maffei M. E. Magnetic field effects on plant growth, development, and evolution. *Front Plant Sci.* 2014;5(1) pp.1–15. , <http://orcid.org/0000-0001-6814-2353>.
139. Wei H., Wang Y., Luo J. Influence of magnetic water on early-age shrinkage cracking of concrete. *Constr Build Mater.* 2017;147(1). pp. 91–100. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.140>.
140. Баран Б. А. Інструментальні методи дослідження ред-окс-реакцій в умовах магнітного поля. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах.* 1997. №2. С. 181–183.
141. Баран Б. А., Дроздовський В. Б., Квашенко А. П. Кондуктометричне та потенціометричне вимірювання швидкості фізико-хімічних процесів в магнітному полі. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах.* 1998. №1. С. 68–70.
142. Баран Б. А. Влияние переменного магнитного поля на скорость окислительно-восстановительных реакций. *Укр. Хим. Журн.* 1999. Т.65, №7. С. 27–30.
143. Баран Б. А. Швидкість хімічних процесів в попередньо омагніченій воді. *Вестник Харьковского гос. политех. ун-та.* 1999. вып. 56. С. 19–24.
144. Баран. Б. А. Роль водневих зв'язків при дії магнітного поля на воду. *Вісник технологічного ун-ту Поділля.* 1999. №2. С. 113–115.
145. Баран. Б. А. Фотометрическое исследование химических реакций в условиях магнитного поля. *Вісник Дніпропетровського ун-ту.* 2000. вып. 5. С. 91–96.
146. Миненко В. И. О природе процессов и некоторых особенностях применения магнитной обработки водно-дисперсных систем. *Вопросы теории и практики магнитной обработки воды и водных систем.* Цветметинформация. 1971. С. 17–25.
147. О влиянии магнитного воздействия на физико-химические свойства водно-электролитных и биологических систем. [В. В. Королев, Н. И. Дюповкин, Л. Н. Савина, Д. А. Шмелева и др.]. *ЖФХ.* 1995. Т.69, №1. С. 521–524.

148. Татаринов Б. П., Ктиторов В. И. Исследование эффективности магнитной обработки воды. *Передовой науч.-техн. и производ. Опыт*. 1963. №23. 63-387/6. С. 11–14.

149. Шахов А. И., Душкин С. С., Ткачев В. А. Выбор и обоснование оптимальных режимов магнитной обработки. *Изв. вузов. Энергетика*. 1975. №8. С. 142–145.

150. Youkai Wang, Huinan Wei, Zhuangwen Li. Effect of magnetic field on the physical properties of water. *Results in Physics*. Volume 8, March 2018, pp. 262–267.

151. Fathi Alimi, Mohamed Tlili, Mohamed Ben Amor, Claude Gabrielli, George Maurin, Add to Mendeley. Influence of magnetic field on calcium carbonate precipitation. *Desalination*. Volume 206, Issues 1-3, 5 February 2007, pp. 163–168.

152. Малкін Ю. С., Журавська Н. Й., Коваленко Н. О. Процес обробки води в магнітних полях. *Вентиляція, освітлення та водопостачання*, вип. 18, 2015. С. 70 – 74.

153. Малкін Ю. С., Фуртат І. Є., Журавська Н. Й., Усачов В. П. (2014). Перспективи створення ресурсозберігаючих технологій шляхом магнітної обробки води та водних розчинів. *Вентиляція, освітлення та водопостачання*, 17, 2014. С. 120 – 127.

154. Wang Y., Zhang B, Gong Z, Gao K., Ou Y., Zhang J. The effect of a static magnetic field on the hydrogen bonding in water using frictional experiments. *Journal of Molecular Structure*. 2013. Vol. 1052. pp. 102–104.

155. Cai R., Yang H., He J., Zhu W. The effects of magnetic fields on water molecular hydrogen bonds. *Journal of Molecular Structure*. 2009. Vol. 938. Iss. 1–3. pp. 15–19.

156. Toledo E. J. L, Ramalho T. C, Magriotis Z. M. Influence of magnetic field on physical–chemical properties of the liquid water: insights from experimental and theoretical models. *Journal of Molecular Structure*. 2008. Vol. 888. Iss. 1–3. pp. 409–415.

157. Адлер Ю. П., Маркова Е. В., Грабовский Ю. В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. Наука, 1976. 279 с.
158. Душинський В. В. Основи наукових досліджень. Теорія і практикум з програмним забезпеченням. К. НТУУ «КПІ», 1988. 408 с.
159. 34. Пат. на корисну модель №128630 України. МПК G01N 21/79 Спосіб кристалооптичного аналізу структурної будови води та ступеню її активації і забруднення біологічними рештками / А.Л. Ганзюк, В.П. Олександренко, А.І. Гордєєв, Н.О. Костюк; – № u201804393; заяв. 20.04.2018; опубл. 25.09.2018, Бюл. №18.
160. Душенко О. С., Ткачук В. П. Обладнання вхідної магнітно-кавітаційної підготовки води для тепломереж. *Вісник Хмельницького національного університету, Технічні науки*. №3, Т.2. 2024 С. 73–80.
161. Душенко О. С., Ткачук В. П. Обладнання зміни властивостей та складу води для тепломереж. Proceedings of the 10th International Scientific and Practical Conference «X Ukrainian-Polish scientific dialogues» Actual problem of modern science. (June 11-15, 2024). Khmelnytsky - Bydgoszcz. С. 145–149.
162. Душенко О. С., Ткачук В. П. Обґрунтування параметрів продуктивності вібраційної машини зміни складу та властивостей води для тепломереж. *Вісник Хмельницького національного університету, Технічні науки*. №6, Т.1. 2024 С. 340–347.
163. Душенко О. С., Ткачук В. П. Дослідження параметрів вібраційної машини для підготовки води для котелень. Матеріали VIII Міжнародної науково-практичної конференції: "Сучасні технології промислового комплексу" (17-19 вересня 2024 року). Херсон- Хмельницький. С. 143–148.
164. Душенко О. С., Ткачук В. П. Дослідження впливу магнітного поля із змінною індукцією по довжині осі потоку на склад та властивості води для тепломереж. *Вісник Хмельницького національного університету, Технічні науки*. №5, Т.1. 2025 С. 272–280.
165. Душенко О. С., Ткачук В. П. Вплив магнітного поля змінної індукції по довжині осі потоку на склад та властивості води для тепломереж. II

International scientific conference of students and young scientists «Problems and innovations in the development of engineering, technologies and transport» : Collection of scientific works of the International Scientific Conference of Students and Young Scientists, April 24-26, 2025 – Khmelnytskyi: KhNU, 2025. С.135–146.

166. Душенко О. С., Ткачук В. П., Марченко М. В. Дослідження конструктивних параметрів кавітаційних насадків та режимів роботи обладнання водопідготовки для тепломереж у Solidworks і практичне використання. *Вісник Хмельницького національного університету, Технічні науки*. №6, Т.2. 2025. С. 286–297.

167. Душенко О. С., Ткачук В. П. Моделювання кавітаційних процесів у насадках в обладнанні водопідготовки для тепломереж у SOLIDWORKS FLOW SIMULATION International Scientific and Practical Conference “*Current Issues and Prospects for the Development of Science, Education, Technology and Society in the Era of Digital Transformations*”: Conference Proceedings (Austin, USA, July 31, 2025). Austin, USA: Golden Quill Publishing, 2025, pp. 99–104.

168. Душенко О. С., Ткачук В. П. Обладнання зміни властивостей та складу води для тепломереж. Abstracts of the conference 10th International Scientific and Practical Conference «*X Ukrainian-Polish scientific dialogues*» Actual problem of modern science. (June 11-15, 2024). Khmelnytsky – Bydgoszcz. P. 25.

169. Ткачук В. П. Душенко О. С. Конструкція обладнання вхідної підготовки води для тепломереж. Proceedings of the IVth International Scientific and Practical Conference. «*Diversity and inclusion in scientific area*» (Marh 28-29, 2024). Warchav. Poland. С. 417–422.

170. **Визначення параметрів продуктивності вібраційної машини зміни складу та властивостей води для тепломереж. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір №**

171. Кожевников С. Н., Есипенко Я. И., Раскин Я. М. Механизмы : справочник / под ред. С. Н. Кожевникова. Изд. 4-е, перераб. и доп. Машиностроение, 1976. 784 с.

## СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

**Статті у журналах, що включені до переліку фахових видань України:**

1. Душенко О. С., Ткачук В. П. Обладнання вхідної магнітно-кавітаційної підготовки води для тепломереж. *Вісник Хмельницького національного університету, Технічні науки*. №3, Т.2. 2024 С. 73-80.

2. Душенко О. С., Ткачук В. П. Обґрунтування параметрів продуктивності вібраційної машини зміни складу та властивостей води для тепломереж. *Вісник Хмельницького національного університету, Технічні науки*. №6, Т.1. 2024 С. 340-347.

3. Душенко О. С., Ткачук В. П. Дослідження впливу магнітного поля із змінною індукцією по довжині осі потоку на склад та властивості води для тепломереж. *Вісник Хмельницького національного університету, Технічні науки*. №5, Т.1 (339). 2025 С. 272-280.

4. Душенко О. С., Ткачук В. П., Марченко М. В. Дослідження конструктивних параметрів кавітаційних насадків та режимів роботи обладнання водопідготовки для тепломереж у Solidworks і практичне використання. *Вісник Хмельницького національного університету, Технічні науки*. №6.2, 2025. С. 286-297.

**Патент України на корисну модель:**

5. Кавітаціо-магнітний пристрій зміни властивостей та складу води для котелень. №161692. МПК F25B 15/02 / Душенко О. С., Ткачук В. П. u202406294. Заявл.30.12.24. Опубл. 02.10.25.

**Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір:**

6. Визначення параметрів продуктивності вібраційної машини зміни складу та властивостей води для тепломереж. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір №

**Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:**

7. Душенко О. С., Ткачук В. П. Обладнання зміни властивостей та складу води для тепломереж. Proceedings of the 10th International Scientific and Practical Conference «X Ukrainian-Polish scientific dialogues» Actual problem of modern science. (June 11-15, 2024). Khmelnytsky - Bydgoszcz. С. 145-149.

8. Душенко О. С., Ткачук В. П. Обладнання зміни властивостей та складу води для тепломереж. Abstracts of the conference 10th International Scientific and Practical Conference «X Ukrainian-Polish scientific dialogues» Actual problem of modern science. (June 11-15, 2024). Khmelnytsky – Bydgoszcz. P. 26.

9. Ткачук В. П. Душенко О. С. Конструкція обладнання вхідної підготовки води для тепломереж. Proceedings of the IVth International Scientific and Practical Conference. «Diversity and inclusion in scientific area» (Marh 28-29, 2024). Warchav. Poland. С. 417-422.

10. Душенко О. С., Ткачук В. П. Дослідження параметрів вібраційної машини для підготовки води для котелень. Матеріали VIII Міжнародної науково-практичної конференції: "Сучасні технології промислового комплексу" (17-19 вересня 2024 року). Херсон- Хмельницький. С. 143-148.

11. Душенко О. С., Ткачук В. П. Вплив магнітного поля змінної індукції по довжині осі потоку на склад та властивості води для тепломереж. II International scientific conference of students and young scientists «problems and innovations in the development of engineering, technologies and transport». : Collection of scientific works of the International Scientific Conference of Students and Young Scientists, April 24-26, 2025 – Khmelnytskyi: KhNU, 2025. С.135-146.

12. Душенко О. С., Ткачук В. П. Моделювання кавітаційних процесів у насадках в обладнанні водопідготовки для тепломереж у SOLIDWORKS FLOW SIMULATION. International Scientific and Practical Conference “Current Issues and Prospects for the Development of Science, Education, Technology and Society in the Era of Digital Transformations”: Conference Proceedings (Austin, USA, July 31, 2025). Austin, USA: Golden Quill Publishing, 2025. P. 99-104.

## АКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ



«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Головний інженер КП «Тепловик»

Віктор КОБЗЄВ

«23» грудня 2025 р.

## АКТ

передачі результатів дисертаційної роботи здобувача ступеня доктора філософії Душенко Олександра Сергійовича

Комісія у складі: голови – Головного інженера КП «Тепловик» Кобзєва Віктора Валерьевича; членів комісії: начальника дільниці Лактіонова Дмитра Олександровича, майстр ХВО Аркатова Людмила Володимірівна, склала цей акт про те, що результати наукових досліджень дисертації доктора філософії Душенко О. С. за темою «Обґрунтування параметрів кавітаційно-магнітного обладнання для водопідготовки котелень» передані КП «Тепловик» і прийняті для використання та впровадження.

Зокрема із теоретичних та практичних результатів роботи було використано:

- результати аналізу аналітичної моделі для визначення максимального тиску у камері пульсації, що дало можливість визначити продуктивність вібраційної машини в залежності від конструктивних параметрів та режимів роботи приводу.
- результати проведених досліджень із застосуванням швидкісної відеоз'ємки дозволили визначити реальні режими роботи вібраційної машини, що дозволило встановити оптимальну продуктивність вібраційної машини очищення та зміни властивостей води, яка знаходиться при наступних параметрах роботи приводу та конструктивних співвідношеннях: частота коливань приводу 19-21 Гц при амплітуді  $A = 2$  мм; діаметрі поршня  $D_p = 100$  мм та діаметрі насадка 10 мм.;
- методологію проектування основних вузлів конструкції вібраційної машини і обладнання для зміни складу та властивостей води для котелень.

Рекомендації по проектуванню ефективного обладнання водопідготовки для тепломереж дадуть можливість зменшити навантаження на обладнання мембранної технології – зворотного осмосу та ультрафільтрації, зменшенню накипоутворення в мережі.

Голова комісії

Віктор КОБЗЄВ

Члени комісії:

Дмитро ЛАКТІОНОВ

  
Людмила АРКАТОВА



АКТ

**про впровадження у навчальний процес в Хмельницькому національному університеті результатів дисертації доктора філософії Душенко О. С. за темою «Обґрунтування параметрів кавітаційно-магнітного обладнання для водопідготовки котелень»**

Даний акт складений про те, що в навчальному процесі на кафедрі технології машинобудування при викладанні дисциплін «Інженерне моделювання та проектування технологічних процесів та конструкцій в машинобудуванні», «Наукові інновації в технології машинобудування» впроваджені і використовуються наступні результати дисертації доктора філософії Душенко О. С., а саме:

- побудовано аналітичну модель для визначення максимального тиску у камері пульсації, що дало можливість визначити продуктивність вібраційної машини в залежності від конструктивних параметрів та режимів роботи приводу;

- проведені дослідження динамічних та конструктивних параметрів насадків статичного кавітатора методом моделювання кавітаційних процесів у SolidWorks дозволили визначити оптимальну його конструкцію;

- результати проведених досліджень із застосуванням швидкісної відеоз'ємки дозволили визначити реальні режими роботи вібраційної машини, що дозволило встановити оптимальну продуктивність вібраційної машини очищення та зміни властивостей води яка знаходиться при наступних параметрах роботи приводу та конструктивних співвідношеннях: частота коливань приводу 19-21 Гц при амплітуді  $A = 2$  мм; діаметрі поршня 100 мм та діаметрі насадка 10 мм;

- одержав подальший розвиток метод оцінки зміни основних властивостей води та експериментально підтверджено, що магнітні і кавітаційні процеси у статичному кавітаторі та вібраційній машині покращують основні характеристики водного середовища, а саме: зростає рН, зменшується коефіцієнт поверхневого натягу, зменшується вміст розчинених солей.

Впровадження цих результатів в навчальний процес сприяє ширшому ознайомленню студентів та аспірантів з проблемами моделювання технологічних процесів і конструкцій в машинобудуванні, забезпечує підвищення теоретичного та практичного рівня підготовки магістрів та аспірантів за напрямом «Інженерна механіка».

Декан факультету інженерії, транспорту та архітектури  
Хмельницького національного університету,  
д-р техн. наук, професор

Олег ПОЛЩУК

Завідувач кафедри технології машинобудування  
Хмельницького національного університету,  
канд. техн. наук, доцент

Віталій ТКАЧУК



**БДЖІЛКА ПЕКФ**  
обладнання для лиття пластмас

м. Хмельницький, вул. 3-я Нова, 70/1  
www.gesal.com.ua

бух. № 6  
в.ч. 12.01.26

**ЗАТВЕРДЖУЮ**  
Директор приватної виробничо-комерційної фірми «БДЖІЛКА»



Микола ГЕСАЛЬ  
січня 2026 р.

м. Хмельницький

передачі результатів дисертаційної роботи здобувача ступеня доктора філософії Душенко Олександра Сергійовича

Комісія у складі: голови – директора приватно-виробничої фірми «БДЖІЛКА» М.В. ГЕСАЛЯ; членів комісії: директора з виробництва А. П. СЛЮСАРЯ, склала цей акт про те, що результати наукових досліджень дисертації доктора філософії Душенко О. С. за темою «Обґрунтування параметрів кавітаційно-магнітного обладнання для водопідготовки котельень» передані фірмі «БДЖІЛКА» і прийняти для використання та впровадження.

Зокрема із теоретичних та практичних результатів роботи було використано:

- результати аналізу аналітичної моделі для визначення максимального тиску у камері пульсації, що дало можливість визначати продуктивність вібраційної машини в залежності від конструктивних параметрів та режимів роботи приводу.
- технічну документацію на конструкцію вібраційної машини і обладнання для зміни складу та властивостей води та технологію підготовки води для покращення її якості, що входить до складу МОР для механічної обробки.

Рекомендації по отриманню кавітаційно-магнітного очищення води дадуть можливість підвищити якість підготовки складу МОР та ефективному застосуванню її у виробничому процесі.

Голова комісії

Члени комісії:

М.В. ГЕСАЛЬ

А.П. СЛЮСАР

| Комерційний відділ

| Реквізити

тел/факс: +38 0382 78-51-85  
e-mail: бух\_bjilka@ukr.net

р/р: UA473052990000026009046001302  
в АТ КБ "ПРИВАТБАНК"  
ІПН 213423822258, Код ЄДРПОУ 21342383

## Додаток В





УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **160692** (13) **U**  
 (51) МПК  
*F25B 15/02* (2006.01)

НАЦІОНАЛЬНИЙ ОРГАН  
 ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ВЛАСНОСТІ  
 ДЕРЖАВНА ОРГАНІЗАЦІЯ  
 "УКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ  
 ОФІС ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ  
 ВЛАСНОСТІ ТА ІННОВАЦІЙ"

## (12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

(21) Номер заявки: **u 2024 06293**  
 (22) Дата подання заявки: **30.12.2024**  
 (24) Дата, з якої є чинними  
 права інтелектуальної  
 власності: **02.10.2025**  
 (46) Публікація відомостей  
 про державну  
 реєстрацію: **01.10.2025, Бюл.№ 40**

(72) Винахідник(и):  
**Душенко Олександр Сергійович (UA),  
 Ткачук Віталій Павлович (UA)**  
 (73) Володілець (володільці):  
**Душенко Олександр Сергійович,  
 вул. Ессенська, 6, кв. 292,  
 м. Староконстянтинів, Хмельницька обл.,  
 31100 (UA),  
 Ткачук Віталій Павлович,  
 вул. Зарічанська, 11в, кв. 52, м.  
 Хмельницький, 20017 (UA)**

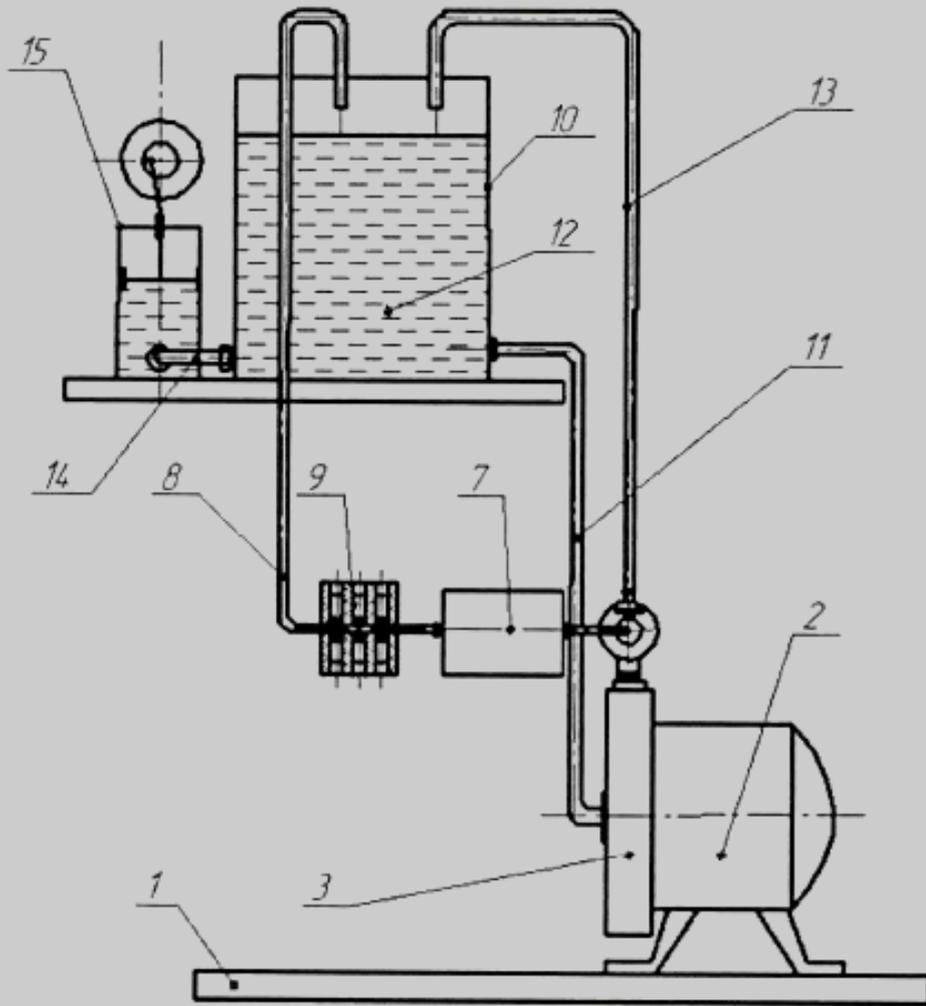
## (54) КАВІТАЦІЙНО-МАГНІТНИЙ ПРИСТРІЙ ЗМІНИ ВЛАСТИВОСТЕЙ ТА СКЛАДУ ВОДИ ДЛЯ КОТЕЛЕНЬ

### (57) Реферат:

Кавітаційно-магнітний пристрій зміни властивостей та складу води для котелень містить немагнітний корпус з постійними магнітами, ємність з трубопроводами для подачі та відводу води, насос з електродвигуном. До ємності трубопроводом приєднано поршневий кавітор з насадкою, у корпусі з постійними магнітами, які розміщено на трубопроводі з кроком 25 мм, встановлено конусні магнітопроводи, орієнтовані своєю вершиною до немагнітного трубопроводу, а статичний кавітатор виконано із соплом ступеневої форми.

**U**  
**UA 160692**

UA 160692 U



Фиг. 1

## UA 160692 U

Корисна модель належить до галузі обробки води, зокрема до пристроїв водоочищення у комунальній, хімічній, аграрній та інших галузях промисловості, де необхідна очистка рідинного середовища від домішок, зміна властивостей та зменшення складу радикалів солей та заліза.

5 Термін служби обладнання котельень багато в чому залежить від фізичних і хімічних властивостей води. Низька якість води, а також відсутність необхідного контролю та корекції хімічного складу води в теплових мережах, пароконденсатних трактах і котлах сприяють утворенню накипу, кисневої та вуглекислотної корозії. В результаті відбувається зниження теплопередачі, забивання устаткування і зменшення терміну його служби, зниження рентабельності і навантаження, збільшення частоти простоїв. Тому попередня підготовка води із застосуванням кавітаційно-магнітного впливу зменшує склад радикалів солей та заліза у  
10 води, підвищує показник Рн, розбиває кластерну структуру води на молекули. [Сілін Р. І., Баран Б. А., Гордєєв А. І. Властивості води та сучасні способи її очищення: монографія. Хмельницький: ХНУ, 2009. 254 с].

Відомий гідродинамічний струменевий кавітатор [Гідродинамічний струменевий кавітатор / В.Т. Яворський, З.О. Знак, Ю.В. Сухацький, Р.В. Мних, Р.Р. Оленіч, О.Г. Курилець; пат. на корисну модель 101525 Україна: МПК В01F 3/00 В01J 14/00. № U201501762; заяв. 27.02.2015; опубл. 25.09.2015, Бюл. № 18.], у якому рідкофазне середовище під тиском подають через патрубок подачі у простір між обоймою і вставкою. Потік за допомогою конуса вставки рівномірно розподіляється січенням цього простору і надходить у сопла. На виході із кожного  
20 сопла формується струмінь. Під час зіткнення струменів на деякій відстані від соплів у рідкофазному середовищі збуджується кавітація і формується область кавітації в середині корпусу.

Недоліком даного пристрою є слабкий ефект виникнення кавітаційного процесу під час зіткнення струменів за рахунок вимоги більшого витoku рідини на виході з корпусу, чим на вході, якщо не буде витримана ця умова, то струмені рідини опиняться у затопленому середовищі, що  
25 приведе до зниження їх швидкості та зменшення ефективності кавітаційного процесу.

Відомий поршневий кавітатор [Патент на корисну модель. №94358 України, МПК В01F 5/00. Вібраційний кавітатор поршневого типу для активації рідини та її знезаражування / Сілін Р.С., Гордєєв А.І., Колицяк О.А. (Україна); заявник і патентовласник Хмельницький нац. ун-т. - у 2014  
30 05860. Заяв. 30.05.2014. Опубл. 10.11.2014. Бюл. № 21].

Кавітаційний вплив на рідину отримується за рахунок зворотно-поступального руху поршня, розташованого в циліндричній ємності з водою, у якому є отвори. Недоліком даного пристрою є періодичність оброблення дискретних об'ємів рідини та неможливість його встановлення у систему прохідного типу.  
35

Відомий пристрій для магнітної обробки рідини [Патент України на корисну модель. Пристрій для магнітної обробки рідини. № 53027. МПК 7С02F1/48; u 2002020999. Заявл. 07. 02. 2002. Опубл. 15.01.2003, Бюл. № 1], який має діамагнітний циліндричний корпус з патрубками для вводу та виводу оброблюваної рідини, в якому розташована магнітна система постійних магнітів, встановлених паралельно осі пристрою різнойменними полюсами один до одного та орієнтовані радіально.  
40

Недоліками даного пристрою є складна кінематика потоку рідини, його розділення, високі гідравлічні втрати та складність зборки.

Як найближчий аналог вибрано [Патент України на корисну модель. Пристрій для магнітного очищення рідини. №44324. МПК С02F 1/48 U200905451. Заявл. 25.09.2009. Опубл. 25.09.2009,  
45 Бюл. № 18].

У пристрої для магнітної обробки забруднених вод, а також підвищення його ступеня очищення, що досягається шляхом створення аксіально-симетричного постійного магнітного поля зі змінним градієнтом, яке забезпечує уловлення іонів домішок в об'ємі пристрою без зміни напрямку руху рідини, пристрій для магнітного очищення рідини містить трубу, на яку встановлено немагнітний корпус з закріпленими секційно електромагнітами, та ємність з ввідним та вивідним патрубками, крізь які за допомогою насоса з електродвигуном подається вода.  
50

Недоліком даного пристрою, завдяки близькому розміщенню постійних магнітів на корпусі з трубою, є створення незначного градієнту напруженості магнітного поля в напрямку, перпендикулярному до напрямку руху водної системи.  
55

В основу корисної моделі поставлено задачу створення конструкції кавітаційно-магнітного пристрою зміни властивостей та складу води для котельень, у якому, завдяки встановленню в трубопроводі подачі води у бак статичного кавітатора з соплом ступеневої форми та блоку з постійними магнітами, встановленим на немагнітний трубопровід, а також поршневого кавітатора, приєднаного трубопроводом до бака з водою, виникає кавітаційний процес із  
60

## UA 160692 U

розщепленням молекул води на активні радикали  $H^{\bullet}$ ,  $OH^{\bullet}$  та здійснюється додатковий вплив на їх розщеплення магнітним полем із значним градієнтом напруженості від постійних магнітів, що розташовані на зовнішніх стінках немагнітного трубопроводу.

5 Поставлена задача вирішується тим, що до ємності трубопроводом приєднано поршневий кавітатор з насадкою, у корпусі з постійними магнітами, які розміщено на трубопроводі з кроком 25 мм, встановлено конусні магнітопроводи, орієнтовані своєю вершиною до немагнітного трубопроводу, а статичний кавітатор виконано із соплом ступеневої форми.

Таким чином нові конструктивні рішення дозволяють отримати очікуваний технічний результат.

10 Приклад конкретної реалізації кавітаційно-магнітного пристрою зміни властивостей та складу води для котелень проілюстровано кресленнями, де на Фіг.1 зображено схему кавітаційно-магнітного пристрою зміни властивостей та складу води для котелень. На Фіг. 2 зображено схему вигляду зверху розводки трубопроводів та регулюючих кранів. На Фіг. 3 зображено схему блоку постійних магнітів встановлених на трубопроводі. На Фіг. 4 зображено  
15 схему статичного кавітатора із соплом ступеневої форми. На Фіг. 5 зображено схему поршневого кавітатора з насадкою.

Кавітаційно-магнітний пристрій зміни властивостей та складу води для котелень (Фіг. 1) містить: основу 1 на якій встановлено електродвигун 2 з насосом 3. На виході з насоса 3 (Фіг. 2) встановлено трійник 4 на який вкручено кулькові крани 5, 6 для регулювання процесу виникнення кавітації у статичному кавітаторі 7. На (Фіг. 3) зображено статичний кавітатор 7, який містить корпус 7.1, закритий кришкою 7.2, закріпленою болтами 7.3, у яку загвинчено сопло ступеневої форми 7.4 та у корпус 7.1 встановлено вихідний штуцер 7.6, а у кришку 7.2 встановлено вхідний штуцер 7.5. На трубопроводі 8, який з'єднаний з баком 10, встановлено блок омагнічування 9, який містить корпус 9.1 з постійними магнітами 9.2, виконаний з немагнітного матеріалу. Постійні магніти 9.2 встановлені у корпус 9.1, дотикаються до немагнітного трубопроводу 8 крізь металеві конусні вставки 9.3 та закріплені гвинтами 9.4 (Фіг. 4). Трубопровід 11 з'єднаний з баком 10 та входить у насос 3 і призначений для забору води 12 з бака 10. Трубопровід 13 з'єднано через трійник 4 та кран 6 з баком 10 для зливу надлишків  
20 води 12 та регулювання швидкості руху рідини у кавітаторі 7. До баку 10 у нижній частині за допомогою трубопроводу 14 приєднано поршневий кавітатор 15 (фіг. 5). На (фіг. 5) зображено поршневий кавітатор 15, який містить циліндричний корпус 15.1, у який встановлено поршень 15.2, шток 15.3 якого з'єднано з кривошипно-шатунним приводом 15.4. На корпус 15.1 знизу встановлено насадку 15.5, який трубопроводом 14 з'єднано з баком 10.

Кавітаційно-магнітний пристрій зміни властивостей та складу води для котелень працює наступним чином. Вода 12 заливається у бак 10, після чого включається електродвигун 2, який приводить у дію насос 3. Вода 12 крізь трійник 4 надходить у трубопроводи 8 і 13, де її швидкість протікання регулюється кранами 5, 6, для досягнення кавітаційного процесу у статичному кавітаторі 7, перетікаючи по трубопроводу 8 крізь блок омагнічування 9 з постійними магнітами 9.2 де, завдяки створенню значного градієнту напруженості магнітного поля в напрямку перпендикулярному до напрямку руху водної системи, здійснюється розрив водневих зв'язків та трубопроводом 8 подається у бак 10. Надлишок води 12 крізь трубопровід 13 вертається у бак 10. Також при включенні вібраційного поршневого кавітатора 15 вода 12 додатково підлягає кавітаційному впливу при зворотно-поступальному руху рідини крізь насадку 15.5, у якому виникає кавітаційний процес, та циклічно подається крізь трубопровід 14 у бак 10.

45 Таким чином, вода 12 з бака 10 проходить багаторазово крізь блок омагнічування 9 та статичний кавітатор 7 і додатково підлягає кавітаційному обробленню у поршковому кавітаторі 15, де також виникає кавітаційний процес із розщепленням молекул води на активні радикали  $H^{\bullet}$ ,  $OH^{\bullet}$  та здійснюється додатковий вплив розриву водневих зв'язків магнітним полем.

Після 15-20 хвилин оброблення води за допомогою працюючого насоса 3 та з перекриттям  
50 крану 5 по трубопроводу 13 вода зливається у окрему ємність для відстоювання протягом 2-3 діб.

Процеси гідрокавітаційної та магнітної обробки, які проходять в пристрої кавітаційно-магнітної зміни властивостей та складу води для котелень, зводяться до утворення нерозчинних у воді карбонатів  $CaCO_3$ ,  $MgCO_3$ , оксикарбонатів  $Mg_2(OH)_2CO_3$ , які спливають на поверхню ємності, і гідрокислів  $Fe(OH)_3$ , які з часом випадають в осад на дно ємності, і тому зменшується загальна концентрація вмісту розчинених речовин, зростає показник рН за період оброблення, що говорить про розрив водневих зв'язків у молекулах води, зменшується коефіцієнт поверхневого натягу. Після відстоювання води забруднення у вигляді шлам  
55 карбонатів, які спливають, збираються з поверхні ємності, а краном біля дна ємності зливається

UA 160692 U

вода до рівня знаходження колоїду  $\text{Fe}(\text{OH})_2$  і надалі подається на інші системи очищення та дегазації.

#### ФОРМУЛА КОРИСНОЇ МОДЕЛІ

5

Кавітаційно-магнітний пристрій зміни властивостей та складу води для котельнь, що містить немагнітний корпус з постійними магнітами, ємність з трубопроводами для подачі та відводу води, насос з електродвигуном, який відрізняється тим, що до ємності трубопроводом приєднано поршневий кавітатор з насадком, у корпусі з постійними магнітами, які розміщено на трубопроводі з кроком 25 мм, встановлено конусні магнітопроводи, орієнтовані своєю вершиною до немагнітного трубопроводу, а статичний кавітатор виконано із соплом ступеневої форми.

10

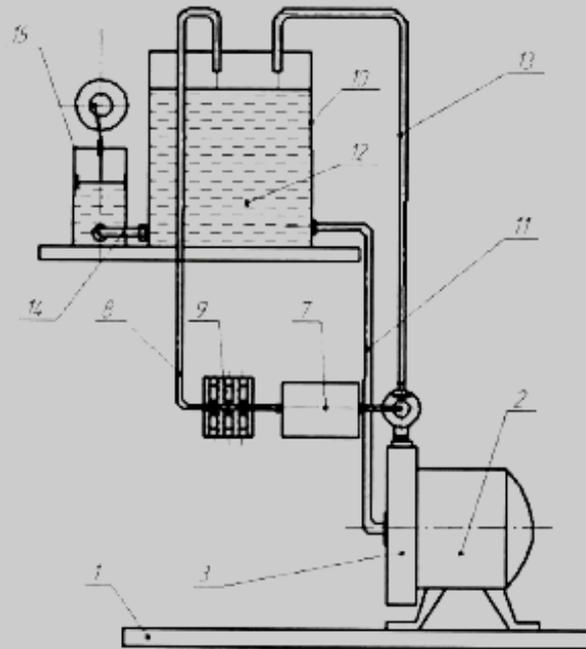
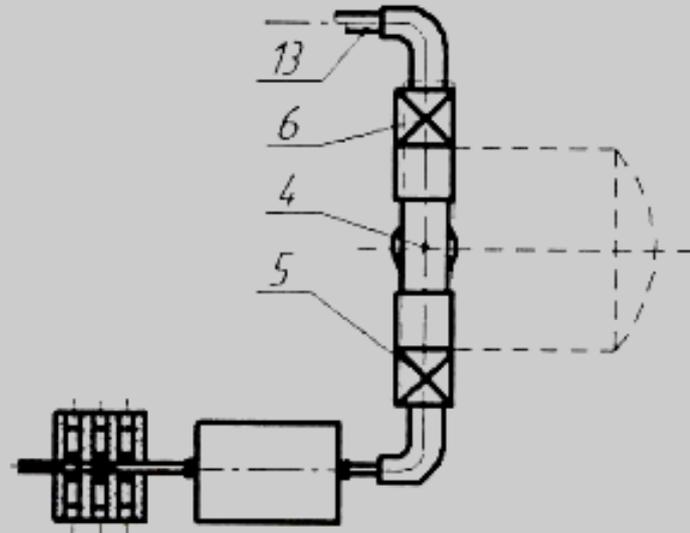
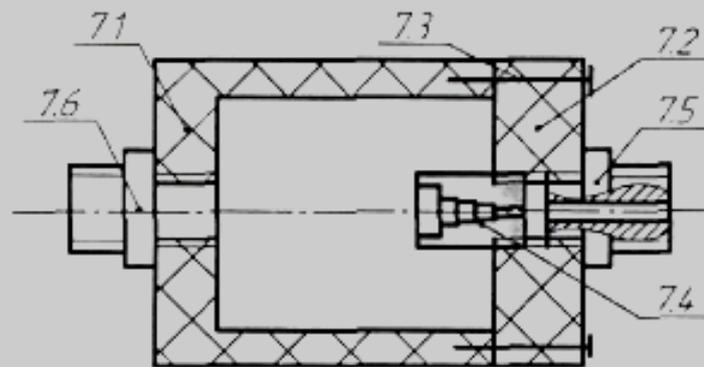


Fig. 1

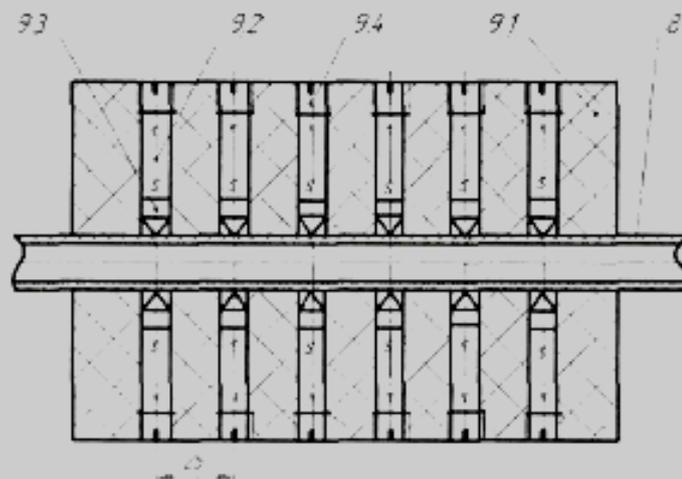
UA 160692 U



Фиг. 2

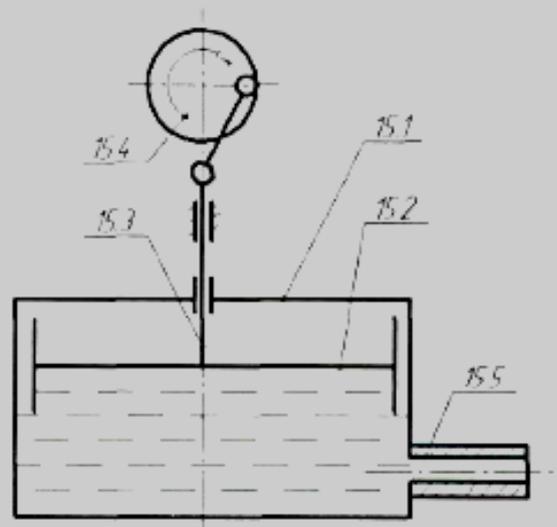


Фиг. 3



Фиг. 4

UA 160692 U



Фіг. 5

Комп'ютерна верстка А. Крижанівський

ДО "Український національний офіс інтелектуальної власності та інновацій", вул. Дмитра Годзенка, 1, м. Київ – 42, 01601

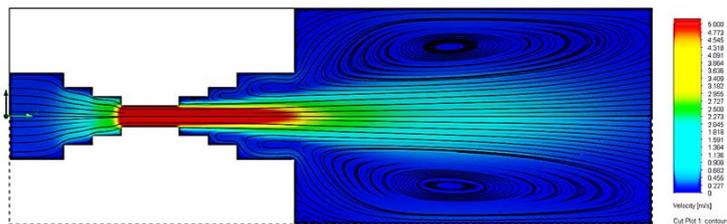
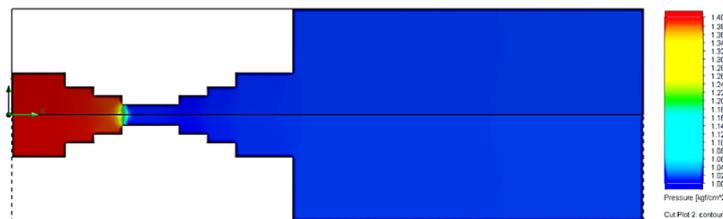
*a**б*

Рис. Г.1. Результати моделювання течії рідини крізь насадки ступеневий на вході та виході  $d = 6$  мм при входньому тиску 0,14 МПа: *a* – траєкторії руху шарів рідини: *б* – картина розподілу величини тиску

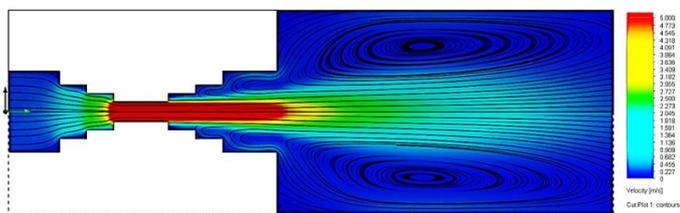
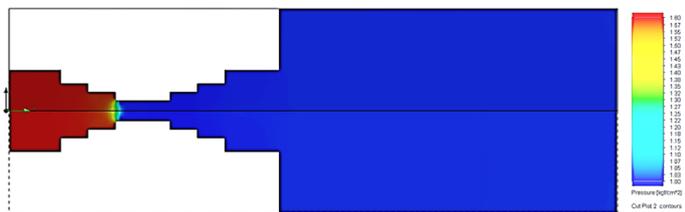
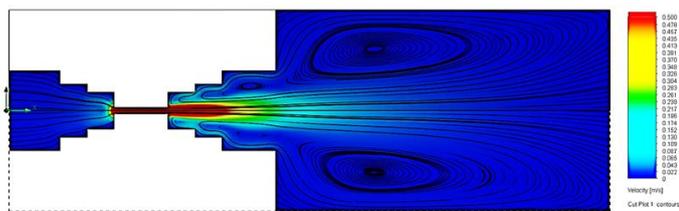
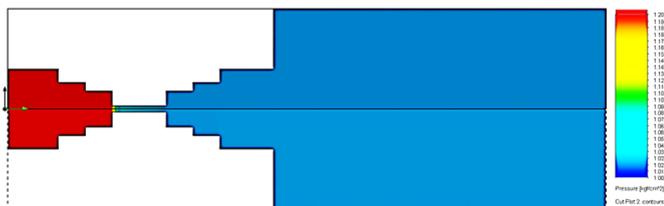
*a**б*

Рис. Г.2. Результати моделювання течії рідини крізь насадки ступеневий на вході та виході  $d = 6$  мм при входньому тиску 0,16 МПа: *a* – траєкторії руху шарів рідини: *б* – картина розподілу величини тиску

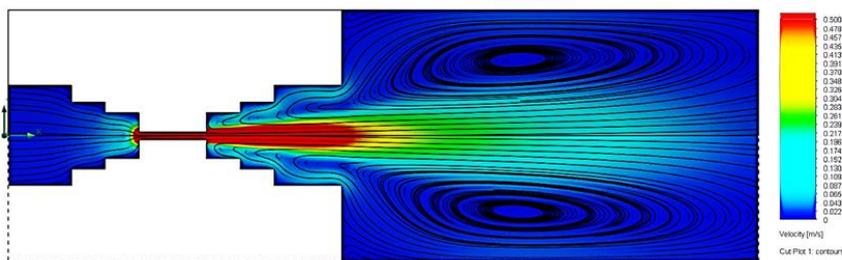


а

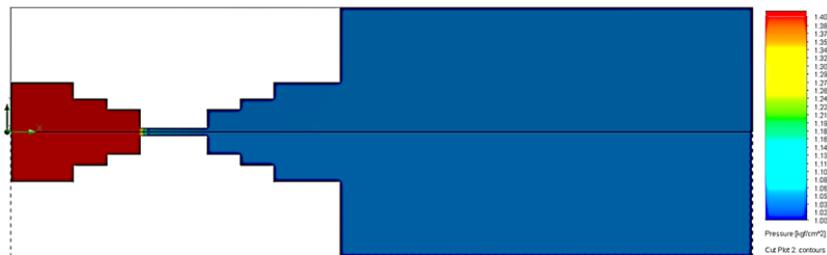


б

Рис. Г.3. Результати моделювання течії рідини крізь насадки ступеневий на вході та виході  $d = 2$  мм при вхідному тиску 0,12 МПа: *а* – траєкторії руху шарів рідини: *б* – картина розподілу величини тиску



а



б

Рис. Г.4. Результати моделювання течії рідини крізь насадки ступеневий на вході та виході  $d = 2$  мм при вхідному тиску 0,14 МПа: *а* – траєкторії руху шарів рідини: *б* – картина розподілу величини тиску

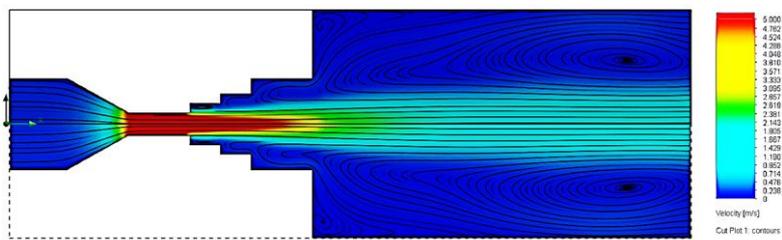
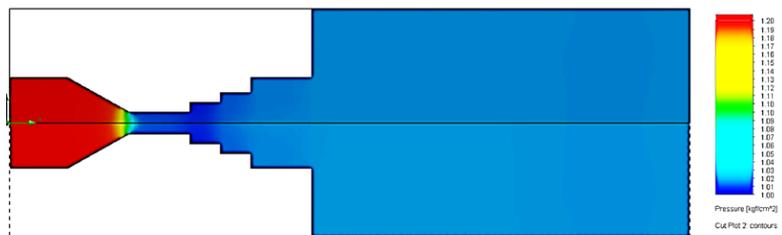
*a**б*

Рис. Г.5. Результати моделювання течії рідини крізь насадки конфузотно-ступеневий  $d = 6$  мм при вхідному тиску 0,12 МПа: *a* – траєкторії руху шарів рідини; *б* – картина розподілу величини тиску

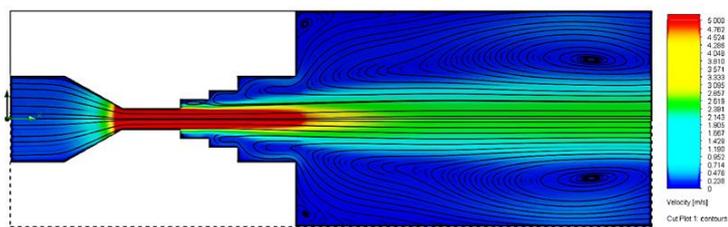
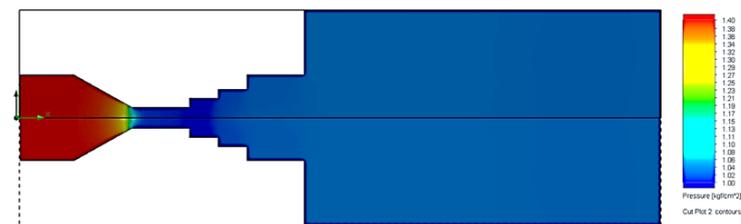
*a**б*

Рис. Г.6. Результати моделювання течії рідини крізь насадки конфузотно-ступеневий  $d = 6$  мм при вхідному тиску 0,14 МПа: *a* – траєкторії руху шарів рідини; *б* – картина розподілу величини тиску

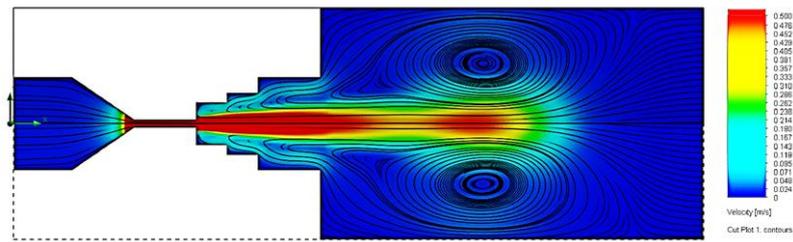
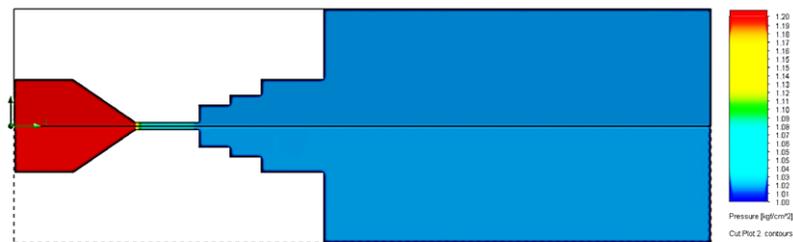
*a**б*

Рис. Г.7. Результати моделювання течії рідини крізь насадки конфузорно-ступеневий  $d = 2$  мм при вхідному тиску 0,12 МПа: *a* – траєкторії руху шарів рідини; *б* – картина розподілу величини тиску

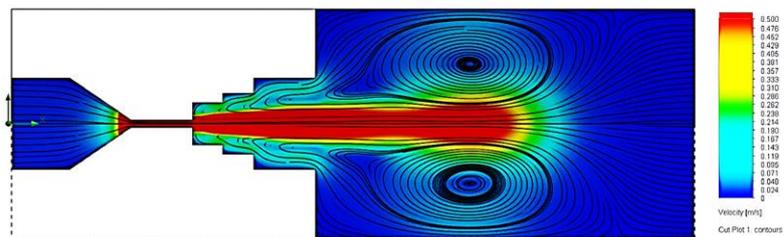
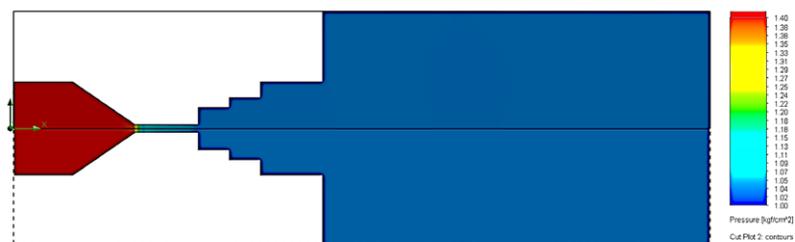
*a**б*

Рис. Г.8. Результати моделювання течії рідини крізь насадки конфузорно-ступеневий  $d = 2$  мм при вхідному тиску 0,14 МПа: *a* – траєкторії руху шарів рідини; *б* – картина розподілу величини тиску

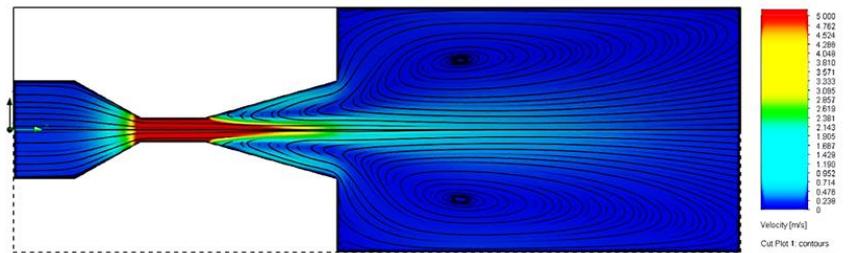
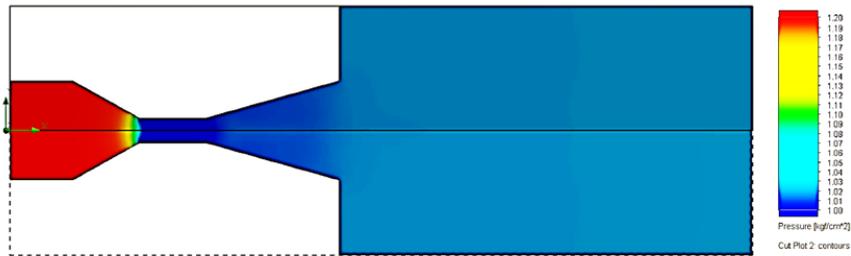
*a**б*

Рис. Г.9. Результати моделювання течії рідини крізь насадки конфузорно-дифузорний  $d = 6$  мм при вхідному тиску 0,12 МПа: *a* – траєкторії руху шарів рідини; *б* – картина розподілу величини тиску

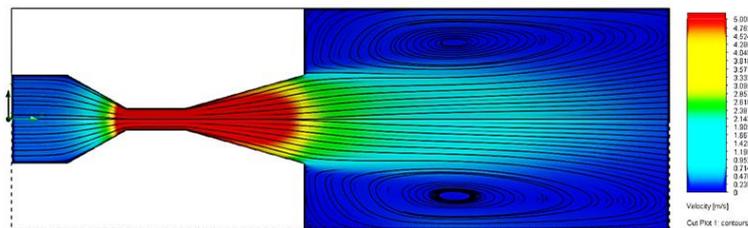
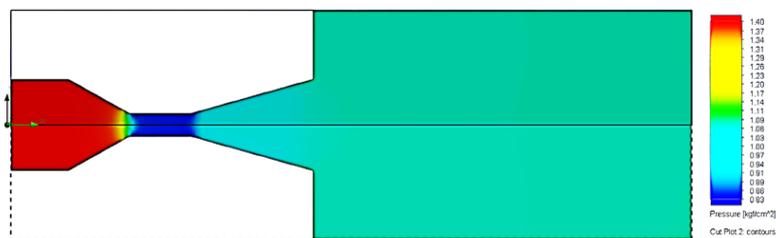
*a**б*

Рис. Г.10. Результати моделювання течії рідини крізь насадки конфузорно-дифузорний  $d = 6$  мм при вхідному тиску 0,14 МПа: *a* – траєкторії руху шарів рідини; *б* – картина розподілу величини тиску

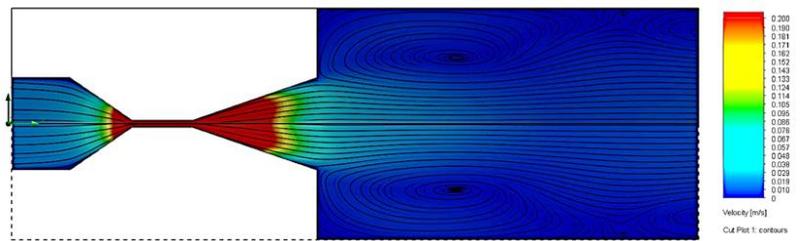
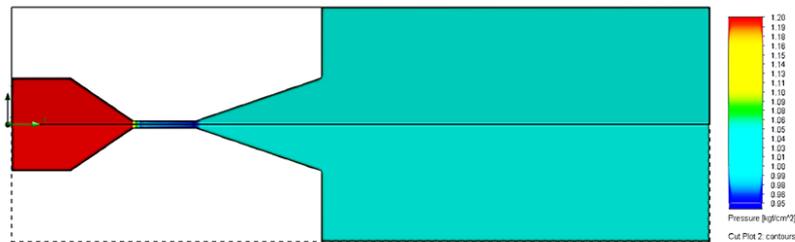
*a**б*

Рис. Г.11. Результати моделювання течії рідини крізь насадки конфузорно-дифузорний  $d = 2$  мм при вхідному тиску 0,12 МПа: *a* – траєкторії руху шарів рідини; *б* – картина розподілу величини тиску

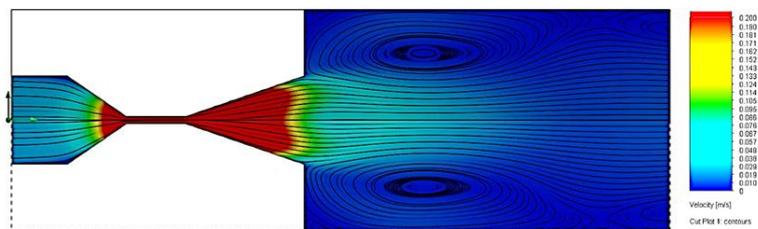
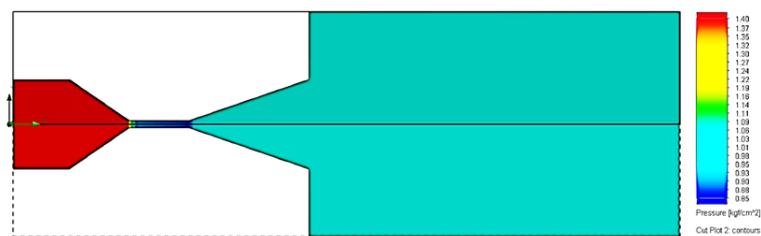
*a**б*

Рис. Г.12. Результати моделювання течії рідини крізь насадки конфузорно-дифузорний  $d = 2$  мм при вхідному тиску 0,14 МПа: *a* – траєкторії руху шарів рідини; *б* – картина розподілу величини тиску