

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

КОСТЮК НАЗАР ОЛЕГОВИЧ

УДК 621.01: 620.193.16

ДИСЕРТАЦІЯ

**ОБГРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ВІБРАЦІЙНОЇ МАШИНИ ДЛЯ
ЗНЕЗАРАЖУВАННЯ ТА ЗМІНИ ВЛАСТИВОСТЕЙ ВОДИ**

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

_____ Н. О. Костюк

Науковий керівник: Гордєєв Анатолій Іванович, доктор технічних наук,
професор

Хмельницький – 2021

АНОТАЦІЯ

Костюк Н. О. Обґрунтування параметрів вібраційної машини для знезаражування та зміни властивостей води. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 131 – Прикладна механіка. – Хмельницький національний університет. – Хмельницький, 2021.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню науково-технічної задачі – створення нових конструкцій вібраційних машин для кавітаційного знезаражування і зміни властивостей води з обґрунтуванням їх конструктивних параметрів і раціональних режимів роботи приводу та створенню методики їх розрахунків.

Об'єктом дослідження є коливальні процеси у вібраційних машинах для знезаражування і зміни властивостей рідинного середовища.

Предметом дослідження є конструктивні та динамічні параметри вібраційної машини поршневого типу, частотний діапазон режимів роботи вібраційного приводу.

У вступі наведена загальна характеристика роботи, обґрунтовано актуальність теми досліджень, розкритий 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, визначений особистий внесок здобувача, наведені дані про апробацію, публікації, структуру та обсяг роботи.

Активне промислове використання кавітаційних процесів із застосуванням різних за принципом дії установок, машин, агрегатів переконливо підтверджує високу ефективність даного фізичного явища, як ефективного засобу безреагентного знезараження, прискорення хімічних реакцій, видозміни структури і властивостей водного середовища, що оброблюється. Тому дослідження динаміки процесу знезараження з

використанням кавітації при коливаннях рідини, створення нових конструкцій вібраційних машин, в яких рідина виступає як об'єкт, який піддається керованим вібраційним впливом, є актуальним науково-технічним завданням.

У першому розділі здійснено системний аналіз методів знезаражування водних потоків, сучасних конструкцій машин та обладнання для знезаражування та зміни властивостей води, приведено порівняльний аналіз типів їхніх вібраційних приводів та обґрунтовано вибір ексцентрикового приводу для запропонованої машини.

Проведений аналіз стану наукових досліджень застосування вібраційних технологій у процесах знезаражування та зміни властивостей води показав, що кавітаційна обробка рідин, має різноманітні технологічні можливості в біологічному знезаражуванні води і постає доцільність не лише у поглибленому вивченні та дослідженнях технологічних можливостей кавітаційної обробки, а і у напрямі створення конструкцій вібраційних машин, що реалізують її можливості, спроможних органічно поєднати ефективність способів збурення кавітації. Аналіз сучасних конструкцій обладнання та машин для кавітаційного впливу на рідинне середовище показав переваги і недоліки різних конструкцій обладнання і вібраційних приводів.

При аналізі експериментальних досліджень кавітації в низькочастотних звукових полях була виявлена аналогія з фізико-хімічними ефектами між низькочастотній і ультразвуковій кавітації, а основними параметрами, які впливають на інтенсивність процесу є значення максимального тиску P_{max} в порожнині бульбашки та значення частотного характеру коливань рідини.

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

У другому розділі описана загальна методологія досліджень, проведених в роботі, що базується на застосуванні системного підходу для вирішення поставленого науково-технічного завдання.

В основі системного підходу лежать відомі принципи: цілеспрямованості, моделювання фізичних процесів, визначення процедури основних системних

досліджень, змістовний аналіз, моделювання дослідження, вибір раціональних конструктивних рішень.

У процесі виконання дисертаційного дослідження розроблено оригінальну установку для моделювання фізичних процесів, що проходять у вібраційній машині для знезаражування та зміни властивостей води та установку для фотофіксації процесів, які проходять у камері пульсації вібраційної машини. Описані прилади та їх характеристики, які застосовуються для проведення вимірювань параметрів, що контролюються.

Приведена методика запропонованого способу фіксації зміни властивостей водних потоків після оброблення у вібраційній машині для знезаражування та зміни властивостей води та методика визначення ступеня знезаражування водних потоків після вібраційної кавітації.

У третьому розділі представлено аналітичну модель коливального процесу робочого середовища у вібраційній машині та отримано рівняння залежності максимального тиску у камері пульсації від конструктивних параметрів та режимів роботи приводу машини.

Вперше розроблено критерій оптимальності параметра максимальної продуктивності вібраційної машини поршневого типу, а саме: наявності максимального тиску робочого тіла у камері пульсації при максимальному тиску рідини на виході з отвору у поршні. $G_{\max} = F(P_{\max \text{ роб.м.}} \Rightarrow P_{\max \text{ стр.}})$

У результаті проведених експериментальних досліджень сили удару струменю з отвору у поршні, встановлено залежності впливу амплітуди та частоти на силу удару струменя в камері пульсації розміром 0,1 м. За умови збереження максимального перемішування водного середовища у ємкості машини та продуктивності рекомендовано використовувати амплітуду коливань 0,002 м.

З аналізу величини максимального тиску у камері пульсації приході поршня уверх встановлено, що тиск досягає величини 0,0048 МПа і значно менше тиску насичених парів 0,0012 МПа (при даних умовах) тому можна

зробити висновок, що отримано першу стадію кавітації – газову.

Результати досліджень по візуалізації процесу зворотно-поступального протікання рідини крізь отвір у поршні показали, що вже при незначних частотах його коливань від 10 Гц проявляється ефект появи кавітаційних каверн у отворі, кавітаційного росту та сплескування парогазових пухирців у камері пульсації вібраційної машини.

З аналізу експериментальних та аналітичних витрат енергії приводу вібраційної машини поршневого типу встановлено напрями розподілу витрат потужності приводу машини при зміні частоти коливань приводу за основними видами: механічні, теплові та кавітаційні реакції. Отримані залежності витрат потужності приводу робочого органа вібраційної машини для знезаражування води від частоти коливання поршня показали, що енерговитрати на процес знезаражування та зміни властивостей потребують від 100 до 175 Вт, що говорить про енергощадність в порівнянні з іншими видами обладнання, призначеного для знезаражування.

Експериментальні та аналітичні дослідження підтвердили можливість проходження кавітаційних хімічних реакцій та зміни складу водного середовища при використанні вібраційної машини поршневого типу. Отримані результати можуть бути враховані при розробленні технологій та конструкцій вібраційного обладнання для очищення стічних вод промислових, комунальних підприємств, тваринницьких комплексів тощо.

У четвертому розділі розглянуто працездатність вібраційної машини для знезаражування та зміни властивостей води та запропоновано методіку проектного розрахунку основних вузлів вібраційної машини.

У результаті проведених експериментальних досліджень по знезаражуванню річкової води встановлено, що після оброблення кавітацією 20 хвилин, деякі види колоній бактерій знищуються повністю, а загальна кількість колоній бактерій зменшується до 80%, а дослідження зміни показників водопровідної води, обробленої кавітацією у вібраційній машині поршневого типу, показали, що після оброблення за період 20 хвилин, збільшується

концентрації вільних іонів водню у воді, відповідно показник рН збільшується до 8,4 рН, зменшується показник ORP, що говорить про насичення киснем рідинного середовища, зменшення показника TDS 420 до 330 одиниць говорить про зменшення солевого складу, а в цілому про поліпшення властивостей води.

Запропоновано узагальнену методологію для розрахунку конструктивних параметрів та вибору раціональних режимів роботи приводу вібраційної машини для впливу на властивості води та її знезаражування.

У результаті кінематичного та динамічного аналізу параметрів ексцентрикового приводу вібраційної машини встановлено величини силових та конструктивних параметрів компенсаційної пружної системи вібраційної машини, а саме: жорсткості пружної системи C_x та її здатності до демпфування k_x . Ці параметри можуть бути використані у подальшому при конструюванні та розрахунках основних параметрів, вибору режимів роботи приводу вібраційної машини. Наведено методику визначення потужності електродвигуна приводу вібраційної машини.

Вперше, з побудованої аналітичної моделі коливального процесу робочого середовища у вібраційній машині поршневого типу, отримано залежності максимального тиску у камері пульсації від конструктивних параметрів та режимів роботи приводу машини та вперше експериментально обґрунтовано раціональні частотні границі роботи вібраційного приводу машини, які лежать у межах від 18 до 23 Гц при амплітуді коливань 0,002 м, та визначено співвідношення її конструктивних параметрів: при діаметрі поршня 0,1 м рекомендовано застосовувати діаметр отвору у поршні від 0,006 до 0,008 м.

Одержав подальшого розвитку метод оцінки зміни основних властивостей води та експериментальне підтверджено, що кавітаційні процеси у вібраційній машині поршневого типу покращують основні характеристики водного середовища, а саме зростає рН, зменшується коефіцієнт поверхневого натягу, зменшується вміст сольових домішок.

Експериментально досліджено процес інактивації патогенної флори води з річки вібраційною кавітаційною обробкою та встановлено зниження росту колоній бактерій до 80%.

Практичне значення отриманих результатів полягає в тому, що розроблені теоретичні положення, математична модель вібраційної машини, нові технічні рішення і конструкції вібраційних машин, отримані співвідношення їх конструктивних параметрів та раціональні частотні границі роботи вібраційного ексцентрикового приводу вібраційної машини поршневого типу складають основу методики для проектування і створення вібраційних машин для безреагентного знезаражування та зміни властивостей водного середовища, завдяки якій інженери та науковці, які працюють у цій галузі, матимуть можливість впроваджувати у виробництво високоефективні та надійні зразки вібраційних машин.

Ключові слова: вібраційна машина, частотні режими роботи приводу, конструктивні параметри, робочий орган, кавітаційне знезаражування, зміна властивостей води, математичне моделювання, проектування.

Основні результати дисертаційних досліджень опубліковані в 17 наукових працях.

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

Статті у закордонних наукових виданнях, що індексуються у міжнародних науко метричних базах даних Scopus, Web of Science:

1. Dynamic processes in the pulsation chamber vibration machine for disinfection of water / Nazar Kostyuk, Anatoliy Hordieiev, Algimantas Bubulis, Oleksii Hordieiev. *Journal of Vibroengineering - Mechanical vibrations and applications*. Vol. 23. Is.4. 2021. 799-809 pp. (Scopus) <https://doi.org/10.21595/jve.2021.21637>. Особистий внесок здобувача: побудова аналітичної моделі руху робочого тіла у вібраційній машині; експериментальні дослідження зміни максимального тиску у камері пульсації від частоти; обґрунтування конструктивних взаємозв'язків параметрів машини.

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

2. Костюк Н. О., Гордєєв А. І., Урбанюк Є. А. Обґрунтування параметрів компенсаційної пружної системи вібраційної машини з ексцентриковим приводом. *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки.* 2018. № 6. т. 2. С. 19-26. Особистий внесок здобувача: розроблення конструктивної схеми і розрахунок конструкції пружної системи вібраційної машини.

3. Костюк Н. О., Гордєєв А. І., Гордєєв О. А. Обґрунтування динамічних та конструктивних параметрів вібраційної машини для знезаражування та зміни властивостей води. *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки.* 2019. № 6. С. 40-48. Особистий внесок здобувача: обґрунтування динамічних та конструктивних параметрів вібраційної машини.

4. Костюк Н. О., Гордєєв А. І., Нездоровін В.П. Експериментальні дослідження працездатності вібраційної машини для знезаражування і зміни властивостей води та етапи її проектування. *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки.* 2020. № 4. С. 112-119. Особистий внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень для визначення працездатності вібраційної машини.

5. Костюк Н. О., Гордєєв А. І., Гордєєв О. А. Дослідження розподілу енерговитрат приводу вібраційної машини поршневого типу для знезаражування та зміни властивостей води. *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки.* 2020. №6. С. 73-78. Особистий внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень по визначенню розподілу енерговитрат приводу вібраційної машини; аналіз та оформлення результатів роботи.

Патенти України на корисну модель:

6. Патент України №126495 Вібраційна машина для знезаражування водних середовищ / Н.О. Костюк, А.І. Гордєєв. Заяв. 02.01.2018; реєстраційний номер заявки u 2018 00099 Опубл. 25.06.2018, Бюл. № 12. Особистий внесок

здобувача: *ідея розробки конструкції вібраційної машини та її опис; частка кожного з авторів є рівною.*

7. Патент України №128630 Спосіб кристалооптичного аналізу структурної будови води та ступеня її активації і забруднення біологічними рештками / А.Л. Ганзюк, В.П. Олександренко, А.І. Гордєєв, Н.О. Костюк. Заяв. 20.04.2018; реєстраційний номер заявки u 2018 04393 Оpubл. 25.09.2018, Бюл. № 18. Особистий внесок здобувача: *ідея реалізації способу, дослідження зразків та аналіз характеристик зміни властивостей води; частка кожного з авторів є рівною.*

8. Патент України №140291 Вібраційна машина для знезаражування води та її очистки / А.І. Гордєєв, А.Л. Ганзюк, О.В. Кравчук, В.В. Кравчук, В.П. Нездоровін, Н.О. Костюк, Заяв. 17.07.2019; реєстраційний номер заявки u 2019 08456 Оpubл. 10.02.2020, Бюл. № 3. Особистий внесок здобувача: *ідея розробки конструкції вібраційної машини та опис її конструкції; частка кожного з авторів є рівною.*

Статті в інших виданнях України:

9. Інноваційні технології активації і знезаражування води / А.І. Гордєєв, Н.О. Костюк, В.В. Кравчук, В.М. Кулик. *Енергозбереження поділля. Хмельницький центр нових технологій і інновацій.* 2018. №1 (65). С. 9-18. Особистий внесок здобувача: *експериментальне дослідження працездатності вібраційної машини.*

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

10. Костюк Н. О., Гордєєв А. І. Вібраційна машина для знезаражування водних середовищ. *Materiały XIV Międzynarodowej naukowo-praktycznej konferencji. «Kluczowe aspekty naukowej działalności – 2018».* 07 - 15 stycznia 2018 roku. Volume 9. Techniczne nauki. Przemysł. Nauka i studia. 2018. С. 10-13. Особистий внесок здобувача: *розроблення конструкції вібраційної машини.*

11. Костюк Н. О., Гордєєв А. І., Урбанюк Є. А. Створення математичної моделі вібраційної машини для знезаражування водних середовищ. *Збірник наукових праць міжнар. конф. молод. наук. «Сучасні технології в механіці», 19-*

21 квітня 2018р. Хмельницький: ФОП Мельник А. А. 2018. С. 88-93. Особистий внесок здобувача: *побудова математичної моделі вібраційної машини.*

12. Костюк Н. О., Гордєєв А. І. Обґрунтування силових параметрів при розрахунках пружної системи вібраційної машини для знезаражування води. *Тези доповідей XVII-ої Міжнародної науково-технічної конференції. «Вібрації в техніці та технологіях».* 11-12 жовтня 2018р. Львів: Національний університет «Львівська політехніка», 2018. С. 60-61. Особистий внесок здобувача: *визначення силових параметрів при розрахунках пружної системи вібраційної машини.*

13. Костюк Н. О., Гордєєв А. І. Обґрунтування динамічних параметрів робочого органу вібраційної машини для знезаражування та зміни властивостей води. *XIII Українсько-Польські наукові діалоги: Тези наукових праць міжнародної наукової конференції.* 16-19 жовтня 2019 р. Хмельницький – Кам'янець-Подільський: ХНУ, 2019. С. 85-86. Особистий внесок здобувача: *обґрунтування динамічних параметрів робочого органу вібраційної машини.*

14. Костюк Н. О., Гордєєв А. І., Гордєєв О. А. Аналітичний аналіз динамічних параметрів вібраційної машини для знезараження та зміни властивостей води. *Materiały XVI Międzynarodowej naukowo-praktycznej konferencji. «Strategiczne pytania światowej nauki – 2020».* 07 - 15 lutego 2020 roku. Volume 9. Techniczne nauki. Przemysł. Nauka i studia. 2020. С. 33-36. Особистий внесок здобувача: *аналітичний аналіз динамічних параметрів.*

15. Дослідження працездатності вібраційної машини для знезаражування і зміни властивостей води / Н.О. Костюк, А.І. Гордєєв, О.А. Гордєєв, А.Л. Ганзюк. *Materiały XVI Międzynarodowej naukowo-praktycznej konferencji. «Nauka i inowacja – 2020».* 07 - 15 października 2020 roku. Volume 8. Techniczne nauki. Przemysł. Nauka i studia. 2020. С. 96-101. Особистий внесок здобувача: *експериментальне дослідження працездатності вібраційної машини.*

16. Костюк Н. О., Гордєєв А. І., Гордєєв О. А. Визначення частотних параметрів роботи приводу вібраційної машини для знезаражування та зміни властивостей води. *Матеріали XVI міжнародна научна практична*

конференція «Динаміката на съвременната наука – 2020». 15 - 22 юли 2020 г. Vol. 4 София, «БялГРАД-БГ ОДД». 2020. С. 88-92. Особистий внесок здобувача: експериментальні дослідження зміни максимального тиску у камері пульсації від частоти.

17. Костюк Н. О. Експериментальні дослідження впливу конструктивних параметрів та режимів роботи вібраційного приводу машини на тиск пульсуючого струменю рідини з отвору у поршні. *Materiały XVII Mezinarodni vedecko-prakticka konference. «Dny vedy – 2021»*. 22 - 30 brezna 2021 roku. Vol. 3. Praha. Publishing House «Education and Science». 2021. С. 42-46.

SUMMARY

Kostyuk N.O. Substantiation of Parameters of the Vibrating Machine for Disinfection and Change of Properties of Water. - Manuscript.

PhD thesis in specialty 131 - Applied Mechanics. - Khmelnytskyi National University. - Khmelnytskyi, 2021.

The dissertation is devoted to the solution of the scientific and technical problem - development of the vibrating equipment for cavitation disinfection and change of properties of water with the definition of its constructive parameters and rational modes of operation of the drive.

The object of the study is the oscillating processes in vibrating machines for disinfection and change of the liquid medium properties.

The subject of the research is constructive and dynamic parameters of vibration machine piston type, frequency range of vibration modes of the drive.

The introduction provides the general description of the work, substantiates the relevance of the research topic, reveals the relationship of work with scientific programs, plans and topics, formulates the purpose, objectives, object and subject of the research, indicates the scientific novelty and practical significance of the results, determines the personal contribution of the applicant, demonstrates the data on approbation, publications, structure and scope of the work.

Active industrial use of cavitation processes with the application of different operation principles of machines, devices, units convincingly confirms the high

efficiency of this physical phenomenon as an effective means of reagent-free disinfection, acceleration of chemical reactions, changes in structure and properties of the treated aquatic environment. Therefore, the study of the dynamics of the process of disinfection using cavitation during fluid oscillations, the creation of new designs of vibrating machines, in which the liquid acts as an object exposed to controlled vibration, is an urgent scientific and technical task.

In the first chapter the system analysis of methods of water streams disinfection, modern designs of devices and the equipment for disinfection and change of properties of water is carried out, the comparative analysis of vibrating drives types and the choice of the eccentric drive for the offered machine is substantiated.

The analysis of the scientific researches on the application of vibration technologies in the processes of disinfection and changes in water properties testifies to the fact that cavitation treatment of liquids has various technological capabilities in biological water disinfection and is expedient not only in in-depth study and research of technological possibilities of cavitation treatment but enables the design of vibrating machines that organically combine the effectiveness of methods of perturbation of cavitation. The analysis of modern designs of equipment and machines for cavitation on the liquid medium showed the advantages and disadvantages of different designs of equipment and vibration drives.

The analysis of experimental studies of cavitation in low-frequency sound fields revealed an analogy with the physicochemical effects between low-frequency and ultrasonic cavitation, and the main parameters influencing the process intensity are the value of maximum pressure P_{max} in the bubble cavity and the frequency of fluid oscillations.

The results of the analysis of literature sources and patent review made it possible to formulate goals and objectives to achieve this purpose.

The second chapter deals with the general methodology of research conducted in the work, which is based on the application of a systematic approach to solving the scientific and technical problems.

The system approach is based on the known principles: purposefulness, modeling of physical processes, definition of the procedure of basic system research, content analysis, research modeling, choice of rational design solutions.

In the course of the dissertation research an original installation for modeling of physical processes taking place in a vibrating machine for disinfection and change of water properties and an installation for photofixation of processes that take place in the pulsation chamber of the vibrating machine. The devices and their characteristics that are used to measure the monitored parameters are analyzed.

Research methods and description of the experimental setup for determining the maximum pressure in the pulsation chamber of the vibrating machine for disinfection and changing the properties of water.

The proposed method of fixing the change in the properties of water flows after treatment in a vibrating machine for disinfection and change the water properties and the method of determining the degree of disinfection of water flows after vibration cavitation are established.

The third chapter presents an analytical model of the oscillating process of the working medium in a vibrating machine and the equation of the dependence of the maximum pressure in the pulsation chamber on the design parameters and modes of operation of the machine drive.

The criterion of optimality of the parameter of the maximum productivity of the piston-type vibrating machine is proposed, namely: the presence of the maximum pressure of the working fluid in the pulsation chamber at the maximum fluid pressure at the outlet of the hole in the piston $G_{\max} = F(P_{\max \text{ } \rho\sigma.m.} \Rightarrow P_{\max \text{ } \text{cmp.}})$.

As a result of experimental studies of the force of impact of the jet from the hole in the piston, the dependence of the amplitude and frequency on the force of impact of the jet in the pulsation chamber of 0.1 m. Provided that the maximum mixing of the aqueous medium in the machine capacity and productivity is maintained, it is recommended to use an amplitude of oscillations of 0.002 m.

The results of the studies on the visualization of the process of reciprocating fluid flow through the hole in the piston showed that even at low frequencies of its oscillations from 10 Hz the effect of cavitation cavities in the hole, cavitation growth and flattening of vapor-gas bubbles in the pulsation chamber of the vibrating machine.

From the analysis of experimental and analytical energy consumption of the piston-type vibrating machine drive, the directions of power distribution of the machine drive power when changing the part of the drive oscillations by the main types: mechanical, medium heating and cavitation reactions are established. The obtained dependences of the power consumption of the working body of the vibrating machine for water disinfection on the oscillation frequency of the piston showed that the energy consumption for the decontamination process and changes in properties require from 100 to 175 W, which indicates energy savings compared to other types of equipment for disinfection.

Experimental and analytical studies have confirmed the possibility of cavitation chemical reactions and changes in the composition of the aqueous medium using a piston-type vibrating machine. The obtained results can be taken into account in the development of technologies and designs of vibration equipment for wastewater treatment of industrial, municipal enterprises, livestock complexes, etc.

In the fourth chapter the efficiency of the vibrating machine for disinfection and change of properties of water is considered and the technique of design calculation of the basic units of the vibrating machine is offered.

In experimental studies on river water disinfection, it was found that after cavitation treatment for 20 minutes, some types of bacterial colonies are completely destroyed, and the total number of bacterial colonies is reduced to 80%. After treatment for a period of 20 minutes the concentration of free hydrogen ions in water increases, respectively, the pH increases to 8,4 pH, the ORP decreases, which indicates oxygen saturation of the liquid medium, reducing the TDS 420 to 330 units indicates a decrease salt composition, and in general it improves the properties of water.

A generalized methodology for calculating design parameters and selection of rational modes of operation of the vibrating drive, machines for influencing the properties of water and its disinfection are proposed.

As a result of kinematic and dynamic analysis of the parameters of the eccentric drive of the vibrating machine, the values of force and design parameters of the compensating elastic system of the vibrating machine are established, namely: stiffness of the elastic system C_x and its ability to damp k_x . These parameters can be used in the future in the design and calculation of basic parameters, the choice of modes of operation of the drive of the vibrating machine. The method of determining the power of the electric motor of the vibrating machine drive is given.

For the first time, the dependences of the maximum pressure in the pulsation chamber on the design parameters and modes of operation of the machine drive were obtained from the constructed analytical model of the oscillating process of the working medium in a piston-type vibrating machine, oscillations of 0,002 m, and the ratio of its design parameters were determined: with a piston diameter of 0.1 m, it is recommended to use the diameter of the hole in the piston from 0,006 to 0,008 m.

The method of estimating the change in the basic properties of water and experimental confirmation that cavitation processes in a piston-type vibrating machine improve the basic characteristics of the aqueous medium, namely, the pH increases, the surface tension coefficient decreases, the salt content decreases.

The process of inactivation of pathogenic flora of water from the river by vibration cavitation treatment was experimentally studied and the growth of bacterial colonies was reduced to 80 per cent.

The practical significance of the obtained results is that the developed theoretical provisions, mathematical model of vibrating machine, new technical solutions and designs of vibrating machines, obtained ratios of their design parameters and rational frequency limits of vibrating eccentric drive of piston type vibrating machine form the basis of methodology for design and creation of vibration machines for reagent-free disinfection and changes in the properties of the aquatic environment, thanks to which engineers and scientists working in this field will be

able to introduce into production highly efficient and reliable samples of vibration machines.

Key words: vibrating machine, frequency modes of drive operation, design parameters, working body, cavitation disinfection, change of water properties, mathematical modeling, design.

The main results of dissertation research have been published in 16 scientific papers.

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

Articles in foreign scientific journals indexed in international scientific databases Scopus, Web of Science:

1. Dynamic processes in the pulsation chamber vibration machine for disinfection of water / Nazar Kostyuk, Anatoliy Hordieiev, Algimantas Bubulis, Oleksii Hordieiev. *Journal of Vibroengineering - Mechanical vibrations and applications*. Vol. 23. Is.4. 2021. 799-809 pp. (Scopus) <https://doi.org/10.21595/jve.2021.21637>. Applicant's personal contribution: *construction of an analytical model of the motion of the working fluid in a vibrating machine; experimental studies of changes in the maximum pressure in the pulsation chamber from frequency; substantiation of constructive interrelations of machine parameters.*

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

2. Kostyuk N. O., Gordeev A. I., Urbanyuk E. A. Substantiation of the parameters of the compensating elastic system of the vibrating machine with eccentric drive. *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences*. 2018. № 6. v. 2. pp. 19–26. Applicant's personal contribution: *development of the constructive scheme and calculation of a design of elastic system of the vibrating machine.*

3. Kostyuk N. O., Gordeev A. I., Gordeev O. A. Substantiation of dynamic and design parameters for disinfection and change of water properties. *Herald of*

Khmelnytskyi National University. Technical Sciences. 2019. № 6. pp. 40–48. Applicant's personal contribution: substantiation of dynamic and design parameters of the vibrating machine.

4. Kostyuk N. O., Gordeev A. I., Nezdorovin V. P. Experimental studies of the efficiency of the vibrating machine for disinfection and change of water properties and stages of its design. *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences 2020. № 4. pp. 112-119. Applicant's personal contribution: conducting experimental studies to determine the performance of the vibrating machine.*

5. Kostyuk N. O., Gordeev A. I., Gordeev O. A Investigation of the energy consumption distribution of a piston-type vibrating machine drive for disinfection and change of water properties. *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences 2020. №6. pp. 73-78. Applicant's personal contribution: carrying out of experimental researches on definition of distribution of power consumption of the drive of the vibrating car; the analysis and registration of results of work.*

Patents of Ukraine for utility model:

6. Vibration machine for disinfection of aquatic environments / A.I. Gordeev, N.O. Kostyuk: Pat. for utility model 126495 Ukraine: IPC C02F 1/00, № u201810090: applications. 02.01.2018: publ. 08/28/2018, Bull. №12. Applicant's personal contribution: *the idea of designing a vibrating machine and its description; the share of each of the authors is equal.*

7. Vibrating machine for water disinfection and purification / A. I. Gordeev, A. L. Ganzjuk, O. V. Kravchuk, V. V. Kravchuk, V. P. Nezdorovin, N. O. Kostyuk: Pat. for utility model 140291 Ukraine: IPC C02F 9/00, 2019u 2019 08456: applications. 07.17.2019: publ. 10.02.2020, Bull. №3. Applicant's personal contribution: *the idea of implementing the method; research of samples and analysis of characteristics of change of properties of water; the share of each of the authors is equal.*

8. Method of crystal-optical analysis of the structural structure of water and the degree of its activation and contamination by biological residues / A.L. Ganzjuk, V.P. Aleksandrenko, A.I. Gordeev, N.O. Kostyuk: Pat. for utility model 128630 Ukraine: G01N 21/3577, 2018u 2018 04393: application. April 20, 2018: publ.

25.09.2018, Bull. № 18. Applicant's personal contribution: *the idea of developing the design of a vibrating machine and a description of its design; the share of each of the authors is equal.*

Articles in other publications of Ukraine:

9. Innovative technologies of activation and disinfection of water / A.I. Gordeev, N.O. Kostyuk, V.V. Kravchuk, V.M. Kulik. *Energy saving of Podillya. Khmelnytskyi Center for New Technologies and Innovations.* 2018. №1 (65). pp. 9-18. Applicant's personal contribution: *experimental study of the efficiency of the vibrating machine.*

Scientific works that certify the approbation of the dissertation materials:

10. Kostyuk N. O., Gordeev A. I. Vibrating machine for disinfection of aquatic environments. *Proceedings of the XIV International Scientific and Practical Conference. Key aspects of scientific activity - 2018.* 07 - 15 January 2018 . Volume 9. Technics nuke. Przemysł. Science and study. 2018. pp. 10-13. Applicant's personal contribution: *design of the vibrating machine.*

11. Kostyuk N. O., Gordeev A. I., Urbanyuk E. A. Creating a mathematical model of a vibrating machine for disinfection of aquatic environments. *Collection of scientific works international. conf. young. Science. "Modern technologies in mechanics"*, April 19-21, 2018. Khmelnytskyi: FOP Melnyk AA 2018. pp. 88-93. Applicant's personal contribution: *construction of a mathematical model of a vibrating machine.*

12. Kostyuk N.O., Gordeev A.I. Substantiation of power parameters in the calculations of the elastic system of the vibrating machine for water disinfection. *Abstracts of the XVII International Scientific and Technical Conference. "Vibrations in engineering and technology"*, October 11-12, 2018. Lviv: Lviv Polytechnic National University, 2018. pp. 60-61. Applicant's personal contribution: *determination of force parameters in the calculations of the elastic system of the vibrating machine.*

13. Kostyuk N. O., Gordeev A. I Substantiation of dynamic parameters of the working body of the vibrating machine for disinfection and change of water

properties. *XIII Ukrainian-Polish scientific dialogues: Abstracts of scientific works of the international scientific conference*. October 16-19, 2019 Khmelnytskyi - Kamyanets-Podilsky: KhNU, 2019. pp. 85-86. Applicant's personal contribution: *substantiation of dynamic parameters of the working body of the vibrating machine*.

14. Kostyuk N. O., Gordeev A. I., Gordeev O. A. Analytical analysis of dynamic parameters of the vibrating machine for disinfection and change of water properties. *Proceedings of the XVI International Scientific and Practical Conference. Strategic issues of world science - 2020*. 07 - 15 February 2020. Volume 9. Techniczne nauki. Przemysł. Science and study. 2020. pp. 33-36. Applicant's personal contribution: *analytical analysis of dynamic parameters*.

15. Research of the efficiency of the vibrating machine for disinfection and change of water properties / N.O. Kostyuk, A.I. Gordeev, O.A. Gordeev, A.L. Hanzjuk. *Proceedings of the XVI International Scientific and Practical Conference. Nauka i innowacja - 2020*. 07 - 15 października 2020 rock. Volume 8. Techniczne nauki. Przemysł. Science and study. 2020. pp. 96-101. Applicant's personal contribution: *experimental study of the efficiency of the vibrating machine*.

16. Kostyuk N. O., Gordeev A. I., Gordeev O. A. Determination of frequency parameters of the vibrating machine drive for disinfection and change of water properties. *Proceedings of the XVI International Scientific and Practical Conference "Dynamics of Modern Science - 2020"*. 15 - 22 July 2020 Vol. 4 Sofia, BelGRAD-BG ODD. 2020. C.88-92. Applicant's personal contribution: *experimental studies of changes in the maximum pressure in the pulsation chamber from frequency*.

17. Kostyuk N. O. Experimental studies of the influence of design parameters and modes of operation of the vibrating drive of the machine on the pressure of the pulsating jet of fluid from the hole in the piston. *Materials of the XVII International Scientific-Practical Conference. "Days of Veda - 2021"*. 22 - 30 March 2021. Vol. 3. Prague. Publishing House «Education and Science». 2021. C. 42-46.

ЗМІСТ

АННОТАЦІЯ.....	2
ВСТУП.....	23
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ЗАСТОСУВАННЯ ВІБРАЦІЙНИХ ПРОЦЕСІВ У ТЕХНОЛОГІЯХ ТА ТЕХНІЦІ ДЛЯ ЗНЕЗАРАЖУВАННЯ ТА ЗМІНИ ВЛАСТИВОСТЕЙ ВОДИ.....	31
1.1. Застосування кавітаційних технологій у процесах зnezаражування та зміни властивостей води	31
1.2. Аналіз методів збурення кавітації та природи кавітаційного впливу на рідинне середовище.....	34
1.3. Аналіз теорій кавітаційного процесу та впливу гармонічних коливань на розвиток кавітації у водних середовищах	44
1.4. Аналіз сучасних конструкцій обладнання та машин для кавітаційного впливу на рідинне середовище	49
1.5. Аналіз конструкцій вібраційного приводу машин	61
Висновки до розділу 1.....	65
РОЗДІЛ 2. МЕТОДОЛОГІЯ ДОСЛІДЖЕНЬ, ПРИЛАДИ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ЗНЕЗАРАЖУВАННЯ ТА ЗМІНИ ВЛАСТИВОСТЕЙ ВОДИ.....	69
2.1. Опис конструкції та роботи експериментальної вібраційної машини для znezаражування та зміни властивостей води	69
2.2. Методика досліджень та опис експериментального обладнання для відео-фіксації процесу виникнення кавітаційних процесів у камері пульсації вібраційної машини.....	71
2.3. Методика досліджень та опис експериментальної установки для визначення максимального тиску у камері пульсації вібраційної машини для znezаражування та зміни властивостей води.....	72

2.4. Методика досліджень та опис експериментальної установки для визначення тиску пульсуючого струменю з отвору у поршні вібраційної машини для знезаражування та зміни властивостей води...	76
2.5. Прилади та методика вимірювання зміни параметрів водного середовища.....	77
2.6. Методика та спосіб фіксації зміни властивостей водних потоків після оброблення у вібраційній машині для знезаражування та зміни властивостей води.....	78
2.7. Методика визначення ступеня знезаражування водних потоків після вібраційного оброблення.....	81
2.8. Обробка експериментальних даних та оцінка точності отриманих результатів.....	82

РОЗДІЛ 3. АНАЛІТИЧНЕ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ВІБРАЦІЙНОЇ МАШИНИ ДЛЯ ЗНЕЗАРАЖУВАННЯ ТА ЗМІНИ ВЛАСТИВОСТЕЙ ВОДИ.....

3.1. Аналітична модель коливального руху робочого середовища у робочому органі вібраційної машини поршневого типу.....	83
3.2. Експериментальне дослідження впливу режимів роботи приводу на динамічні параметри вібраційної машини та визначення раціональних частот його коливання	89
3.3. Експериментальні дослідження впливу конструктивних параметрів та режимів роботи вібраційного приводу на виток струменя в отворі у поршні.....	93
3.4. Експериментальні дослідження за допомогою відео-фіксації процесу руху робочого тіла у камері пульсації та виникнення кавітаційних процесів.....	95
3.5. Експериментальні дослідження енергетичних режимів роботи приводу вібраційної машини для знезаражування та зміни властивостей	

води.....	99
Висновки до розділу 3.....	106
РОЗДІЛ 4. ДОСЛІДЖЕННЯ ПРАЦЕЗДАТНОСТІ ВІБРАЦІЙНОЇ МАШИНИ ДЛЯ ЗНЕЗАРАЖУВАННЯ І ЗМІНИ ВЛАСТИВОСТЕЙ ВОДИ ТА МЕТОДИКА ЇЇ ПРОЕКТУВАННЯ.....	109
4.1. Експериментальне дослідження працездатності вібраційної машини по знезаражуванні водних потоків.....	109
4.2. Експериментальне дослідження зміни основних показників водного середовища після оброблення у вібраційній машині.....	111
4.3. Експериментальне дослідження працездатності вібраційної машини по зміні властивостей водного середовища та його структурної будови кристалооптичним аналізом.....	115
4.4. Методика та особливості проектування вузлів ексцентрикового приводу вібраційної машини	119
4.5. Обґрунтування параметрів компенсаційної пружної системи вібраційної машини з ексцентриковим приводом.....	122
4.6. Визначення потужності електродвигуна вібраційної машини...	131
4.7. Загальна методика проектування вібраційної машини поршневого типу для знезаражування та зміни властивостей води.....	131
Висновки до розділу 4.....	134
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	136
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	140
Додаток А.....	150
Додаток Б.....	155
Додаток В.....	158

ВСТУП

Актуальність теми. На теперішній час для знезаражування та зміни властивостей води з метою покращення її якості застосовують вібраційні гідромеханічні машини та пристрої. Для видозміни структури та покращення властивостей оброблюваних рідинних субстанцій (РС) широко використовують явище кавітації, яке стало доволі потужним засобом енергетичного впливу на оброблюване середовище і яке активно застосовують у промисловості.

За останній період з'явився новий напрям – створення вібраційного обладнання для обробки води кавітацією, яке забезпечує надання воді нових властивостей і її знезараження. Однак цим установкам властиві деякі недоліки – незначний час одноразового перебування рідини в стані виникнення кавітаційної зони. Для збільшення кратності оброблення створено низку вібраційних машин поршневого типу з ексцентриковим приводом для кавітаційної обробки води, з метою знезараження і зміни її властивостей, у яких вода піддається багаторазовому зворотно-поступальному проходженню (циклічній гідрокавітації) через отвір у поршні. Застосування такого приводу дає можливість здійснювати жорсткий керований вплив на процес виникнення кавітаційних порожнин з утворенням кавітаційних бульбашок шляхом підбору конструктивних параметрів машини і режимів роботи приводу.

Створення нових конструкцій вібраційних машин та обґрунтування їх конструктивних параметрів і режимів роботи приводу, в яких рідина виступає як об'єкт, що піддається керованим вібраційним впливам та дослідження динаміки знезараження водного середовища з використанням кавітації при коливаннях рідини, 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 положенням Закону України «Про пріоритетні напрями інноваційної діяльності в Україні» від 08.09. 2011р. № 3715-VI та постанови Кабінету Міністрів України від 28.12.2016 р. №1056 «Деякі питання

визначення середньострокових пріоритетних напрямів інноваційної діяльності галузевого рівня на 2017-2021 рр.».

Дисертаційна робота виконана у відповідності з планом кафедри технології машинобудування та тематикою держбюджетної теми «Обґрунтування конструктивних параметрів, режимів роботи приводу та дослідження працездатності вібраційної машини для знезаражування і зміни властивостей води» (№ державної реєстрації 0120U101484) 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 вібраційних машин для кавітаційного знезаражування і зміни властивостей води з обґрунтуванням їх конструктивних параметрів і раціональних режимів роботи приводу.

Досягнення сформованої мети передбачає вирішення таких завдань:

- на основі аналізу кавітаційних процесів у машинах сформувані достатні уявлення про область досліджень і розробок для створення високоефективних технічних рішень;
- розробити фізичну модель вібраційної машини поршневого типу, що відображає прояв механічного впливу на рідинне середовище;
- побудувати математичну модель руху робочого середовища у вібраційній машині поршневого типу з метою визначення зміни максимального тиску у камері пульсації від режимів роботи приводу;
- сформувані методику проведення експериментальних досліджень динамічних параметрів роботи вібраційного приводу машини та визначення співвідношень її конструктивних параметрів;
- за допомогою відеофіксації дослідити формування кавітаційних процесів у камері пульсації та стійкість функціонування кавітаційних полів у РС низькочастотними вібраціями;

- встановити взаємозв'язок технологічних та конструктивних параметрів робочого органу із параметрами приводу вібраційної машини поршневого типу та енергетичними витратами приводу;
- на основі кінематичного та динамічного аналізу роботи приводу визначити параметри пружної системи вібраційної машини поршневого типу;
- провести експериментальні дослідження працездатності вібраційної машини для знезаражування і зміни властивостей води;
- сформуванати прикладну методологію проектування та розрахунку вібраційної машини поршневого типу для кавітаційного знезаражування і зміни властивостей води та практичні рекомендації розробнику;
- розробити перспективні схеми та конструкції вібраційних машин для кавітаційного знезаражування і зміни властивостей води за умовами енергозбереження.
- розробити рекомендації та передати на виробництво експериментально-промислові моделі вібраційних машин для зміни властивостей, складу та знезараження водного середовища.

Об'єкт дослідження – коливальні процеси у вібраційних машинах для знезаражування і зміни властивостей РС.

Предмет дослідження – конструктивні та динамічні параметри вібраційної машини поршневого типу, частотний діапазон режимів роботи вібраційного приводу.

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 робочого тіла у робочому органі здійснювалися шляхом фізичного і математичного моделювання динамічної системи руху робочого тіла на основі положень теорії математичного моделювання і

математичної статистики, теорії коливань, гідромеханіки із застосуванням обчислювальної техніки.

Експериментальні дослідження динамічних та кінематичних характеристик руху робочого тіла в обладнанні проведено на спеціально розроблених експериментальних установках з використанням тензометричних засобів реєстрування даних вимірювань.

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

Наукова новизна одержаних результатів полягає у створенні, теоретичному обґрунтуванні та експериментальному дослідженні нового різновиду вібраційних машин поршневого типу для кавітаційного знезаражування та зміни властивостей водного середовища і обґрунтуванні режимів роботи приводу, зокрема:

- вперше побудовано аналітичну модель коливального процесу робочого середовища у вібраційній машині поршневого типу та отримано рівняння залежності максимального тиску у камері пульсації від конструктивних параметрів та режимів роботи приводу машини;

- вперше запропоновано критерій оптимальності параметра максимальної продуктивності вібраційної машини поршневого типу, а саме: наявності максимального тиску робочого тіла у камері пульсації при максимальному тиску рідини на виході з отвору у поршні $G_{\max} = F(P_{\max \text{ роб.т.}} \Rightarrow P_{\max \text{ стр.}})$;

- вперше експериментально обґрунтовано раціональні частотні границі роботи вібраційного приводу машини, які лежать у межах від 18 до 23 Гц при амплітуді коливань 0,002 м, та визначено співвідношення її конструктивних параметрів: при діаметрі поршня 0,1 м рекомендовано застосовувати діаметр отвору у поршні від 0,006 до 0,008 м.;

- одержав подальший розвиток метод оцінки зміни основних властивостей води та експериментально підтверджено, що кавітаційні процеси

у вібраційній машині поршневого типу покращують основні характеристики водного середовища, а саме: зростає рН, зменшується коефіцієнт поверхневого натягу, зменшується вміст сольових домішок.

- експериментально досліджено процес інактивації патогенної флори води вібраційною кавітаційною обробкою та встановлено зниження росту колоній бактерій до 80%.

Практична цінність роботи:

Результати виконаних теоретичних і експериментальних досліджень реалізовані в нових технічних рішеннях і конструкціях вібраційних машин, що захищені патентами на корисні моделі України (№126495, №140291). При цьому найбільшу практичну цінність мають наступні одержані результати:

1) розроблено концепцію побудови та методику інженерних розрахунків вібраційної машини поршневого типу для знезаражування і зміни властивостей РС, завдяки якій інженери та науковці, які працюють у цій галузі, матимуть можливість впроваджувати у виробництво високоефективні та надійні зразки вібраційних машин.

2) запропоновано нові співвідношення конструктивних параметрів вібраційної машини поршневого типу та визначено раціональні частотні границі роботи вібраційного ексцентрикового приводу машини;

3) для визначення та оцінки змін властивостей води запропоновано спосіб кристалооптичного аналізу структурної будови РС та ступеню його активації (пат. України № 128630), який дає можливість оперативно оцінювати енергетичний стан води та зміну її основних показників.

4) технологію кавітаційної обробки водних середовищ низькочастотними коливаннями, конструктивні схеми вібраційних машин, оптимальні співвідношення конструктивних параметрів та рекомендації з вибору раціональних режимів роботи приводу передано Хмельницькому НДЕКЦ та Надвірнянському «Коопзаготпромторг» до впровадження.

5) 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.

В одноосібній публікації [17] автору належать результати експериментального визначення впливу на максимальний тиск з отвору у поршні вібраційної машини її режимів, аналіз та оформлення результатів роботи.

У спільних публікаціях автору належить: [1] – побудова аналітичної моделі руху рідини у машині, експериментальні дослідження зміни максимального тиску у камері пульсації; [2] – розроблення конструктивної схеми і розрахунок конструкції пружної системи вібраційної машини; [3] – обґрунтування динамічних та конструктивних параметрів вібраційної машини; [4] – проведення експериментальних досліджень для визначення працездатності вібраційної машини; [5] – проведення експериментальних досліджень по визначенню розподілу енерговитрат приводу вібраційної машини, аналіз та оформлення результатів роботи; [6-8] – ідея розробки нових конструкцій вібраційних машин та опис їх конструкції, дослідження зразків та аналіз характеристик зміни властивостей води – частка кожного з авторів є рівною; [9] – Експериментальне дослідження працездатності вібраційної машини; [10] – розроблення конструкції вібраційної машини; [11] – Побудова математичної моделі вібраційної машини; [12] – визначення силових параметрів при розрахунках пружної системи вібраційної машини; [13] – обґрунтування динамічних параметрів робочого органу вібраційної машини; [14] –

аналітичний аналіз динамічних параметрів; [15] – експериментальне дослідження працездатності вібраційної машини; [16] – Експериментальне дослідження зміни максимального тиску у камері пульсації від частоти.

Апробація результатів дисертації. Основні наукові положення і результати досліджень доповідались і отримали позитивну оцінку на науково-технічних конференціях: Конференція молодих науковців «Сучасні технології в механіці», 19-21 квітня. м. Хмельницький 2018р; XVII-та Міжнародна науково-технічна конференція. «Вібрації в техніці та технологіях», 11-12 жовтня 2018р. Львів; XIII міжнародна наукова конференція «Українсько-Польські наукові Діалоги»: 16-19 жовтня 2019р. Хмельницький – Кам’янець-Подільський; XIV Międzynarodowej naukowo-praktycznej konferencji. «Kluczowe aspekty naukowej działalności – 2018». 07 - 15 stycznia 2018 roku. Przemyśl; XVI Międzynarodowej naukowo-praktycznej konferencji. «Strategiczne pytania światowej nauki – 2020». 07 - 15 lutego 2020 roku. Przemyśl; XVI международна научна практична конференция «Динамика на съвременната наука – 2020». 15 - 22 юли 2020 г. Vol. 4 София. XVI Międzynarodowej naukowo-praktycznej konferencji. «Nauka i inowacja – 2020». 07 - 15 października 2020 roku. Przemyśl; XVII Mezinárodní vědecko-praktická konference. «Dny vědy – 2021». 22 - 30 března 2021 roku. Praha.

У повному обсязі дисертація доповідалась і отримала схвалення на міжкафедральному науковому семінарі кафедр «Технології машинобудування» і «Галузевого машинобудування та агроінженерії» Хмельницького національного університету (06.10 2021р.).

Публікації. За матеріалами дисертації опубліковано 17 наукових праць (одна з яких опублікована у закордонному періодичному виданні, що входить до міжнародної науково-метричної бази даних Scopus), у тому числі 4 статті у фахових виданнях України, що входять до переліку ДАК, одна стаття, що додатково відображає наукові результати дисертації, 8 публікацій апробаційного характеру у матеріалах та тезах конференцій, одержано 3 патенти України на корисні моделі України.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається з анотації, змісту, вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Повний обсяг роботи становить 167 сторінок друкованого тексту, з них анотація – на 17 стор., зміст – на 3 стор., основний текст – на 122 стор., список із 114 використаних джерел – на 14 стор., додатки – на 14 стор. Дисертація містить 73 рисунка та 3 таблиці.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ЗАСТОСУВАННЯ ВІБРАЦІЙНИХ ПРОЦЕСІВ У ТЕХНОЛОГІЯХ ТА ТЕХНІЦІ ДЛЯ ЗНЕЗАРАЖУВАННЯ ТА ЗМІНИ ВЛАСТИВОСТЕЙ ВОДИ

1.1. Застосування кавітаційних технологій у процесах знезаражування та зміни властивостей води

У даний час багато уваги приділяється питанням процесу знезаражуванню природних і стічних вод, модернізації технології та розроблення нових ефективних методів, що дозволить вдосконалити існуючі технології обробки води, скоротити трудомісткі процеси приготування і дозування реагентів, зменшити витрати на експлуатацію очисних споруд, збільшити їх продуктивність, підвищити якість і зменшити собівартість очищеної та знезараженої води [1].

Так зокрема вирішенню проблем інтенсифікації технологічних процесів за допомогою кавітації присвячені роботи Л.Д. Розенберга, І.Є. Ельпінера, І.С. Пірсола, Т. Мейсона, В.А. Шутілова, Б.Г. Новицького, М.А. Маргуліса, Б.А. Аграната, І.М. Федоткіна, Р.Ф. Ганієва, Н.И. Кобаско, В.В. Куліка [2-10]. Значний внесок у розвиток кавітаційних технологій інактивзації патогенних бактерій та створення обладнання зробили іноземні науковці [11-31]. На даний час розроблено багато технологій очищення водних середовищ, але на превеликий жаль, більшість із них освоюється надзвичайно повільно, або і зовсім не освоюється. Крім того багато методів пов'язані з хімічними та біологічними методами очистки. Хімічні методи використовують хлорування в якості фундаментальної реакції, що забезпечує знезаражування. Але хлориди, розкладаючись у воді, створюють хімічні радикали, які впливають на здоров'я людини. Найбезпечнішими є механічні та фізичні способи очистки води із за відсутності хімічних радикалів тому механічні способи очистки води є перспективними [1-7].

Виходячи з аналізу різних методів знезаражування води можна представити їх у вигляді узагальненої блок-схеми і зображена на рис. 1.1. Провівши аналіз існуючих фізико-хімічних методів знезаражування води, було розширено та доповнено відому класифікацію фізичних методів [32] сучасними методами, які вказані у блок-схемі (рис.1.1) товстими лініями.

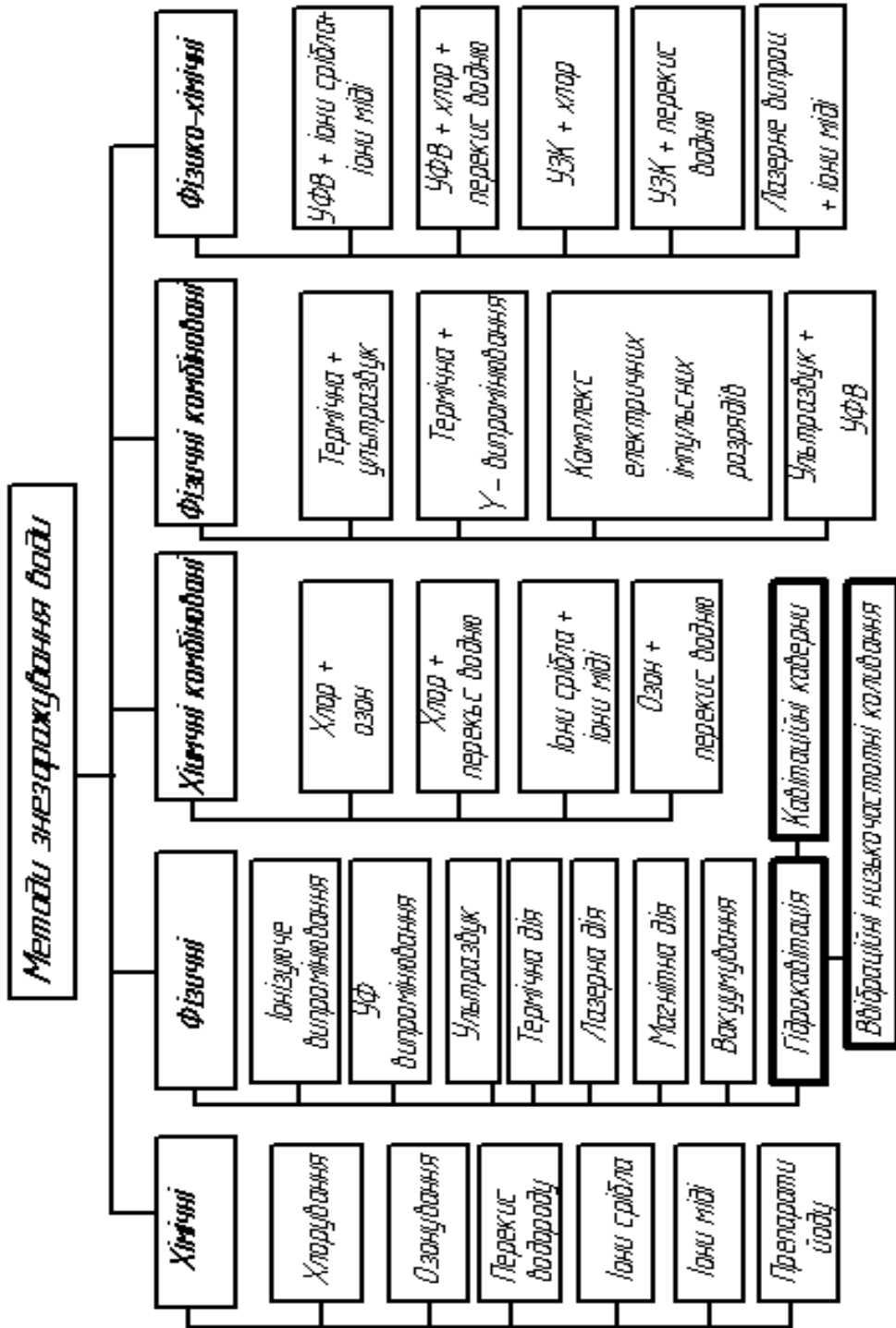


Рис. 1.1 – Блок-схема класифікації методів знезаражування води

Провідними Українськими вченими О.І. Некозом, Л.І. Шевчук, І.С. Афтаназівим, В.Л. Старчевським, Р.І. Сіліним А.І. Гордєєвим у своїх дослідженнях [33-43] закладено технологічні основи впливу механічних гідрокавітаційних та вібраційних процесів на знезаражування водних потоків та зміни властивостей води.

У зв'язку з цим великого значення набувають експериментальні дослідження можливих форм відносного руху рідкого середовища і динамічних характеристик обладнання при коливаннях водного середовища. Значний внесок зробили в теоретичні та практичні дослідження гідродинаміки кавітаційних процесів вчені: Р. Кнэпп, Дж. Дейли, Л.А. Эпштейн, А.Д. Перник, В. В., Рождественский, А. Розенберг, І. Пірсол, Э.С. Арзуманов, Р.Ф. Ганієв та ін. [44-48].

А також вагомим внеском у створенні фундаментальних основ проектування технологічного обладнання і вібраційних машин по праву належить провідним науковцям: І.І. Блехману, І.Ф. Гончаревичу, Г.Ю. Джанелідзе, Е.Е. Лавенделу, В.О. Повідайло, В.Н. Потураєву, О.А. Литвиненко, І. М. Федоткіну, В.М. Мальованому, О.Р. Гащину, Л. І. Шевчук, Т.І. Веретільнику, І.С. Афтаназіву, В.Л. Старчевському, А.І. Гордєєву, Р.І. Сіліну, Т.М. Вітенко, О.І. Некозу, та ін. [49-69].

Для знезаражування та зміни властивостей води безреагентним методом, а саме кавітаційною дією, створюються умови обтікання водою твердих поверхонь із великою швидкістю, тобто зштовхування водного потоку із великою силою об яку-небудь перешкоду. При цьому швидкість водного потоку може досягати від 15 до 25 м/с [37,38,46,47]. Особливість полягає в том, що на рівень ефективності не впливає мутність, яскравість, ні рівень солей у воді. При дії кавітації руйнуються колоїди й частинки, в середині яких можуть бути бактерії. Таким чином шкідливі організми залишаються без захисту перед іншими хімічними й фізичними впливами. Бактерицидна дія кавітації прямо пропорційна її інтенсивності, швидкості потоку й числу ступенів збудників [33,37].

Застосування акустичних технологій, а саме ультразвукового спектру частот впливають на активацію води таким чином, що інтенсивність кумулятивної дії ультразвуку на середовище при сплескуванні кавітаційного пухирця залежить від газопарового вмісту, властивостей середовища, коефіцієнту кумуляції [44,48]. При ультразвуковій кавітації число кавітаційних пухирців залежить від кількості ядер кавітації, які практично не піддаються регулюванню. При гідродинамічній кавітації пухирці утворюються за рахунок дроблення каверни та кількість і розміри визначаються режимом ведення кавітації, взаємозв'язком кавітаційних параметрів, що дозволяє здійснювати керування інтенсивністю кумулятивних впливів на технологічні процеси.

Кавітаційна обробка рідин, має різноманітні технологічні можливості в біологічному знезаражуванні води і постає доцільність не лише у поглибленому вивченні та дослідженнях технологічних можливостей кавітаційної обробки, а і науковому пошуку у напрямі створення машин та устаткування, які реалізують її можливості, спроможних органічно поєднати ефективність способів збурення кавітації.

1.2. Аналіз методів збурення кавітації та природи кавітаційного впливу на рідинне середовище

Значний інтерес представляють безреагентні методи очистки води [33]. Одним із явищ, які впливають на дисперсність, хімічний склад та знезаражування води є кавітація.

Розрізняють дві стадії кавітації: початкову та розвинену. Існують різні форми початкової стадії кавітації при натіканні потоку на сферичне тіло (рис. 1.2). Якщо рідина знаходиться під тиском, рівним тиску її насичених парів, то може виникнути парова кавітація. Через поверхню пухирця завжди проходить дифузія газу – виникає газова кавітація. Практично завжди спостерігається парогазова кавітація [47].

Залежно від способу збудження кавітація буває акустичною (або ультразвуковою) і гідродинамічною, механізм впливу яких на оброблюване середовище однаковий.

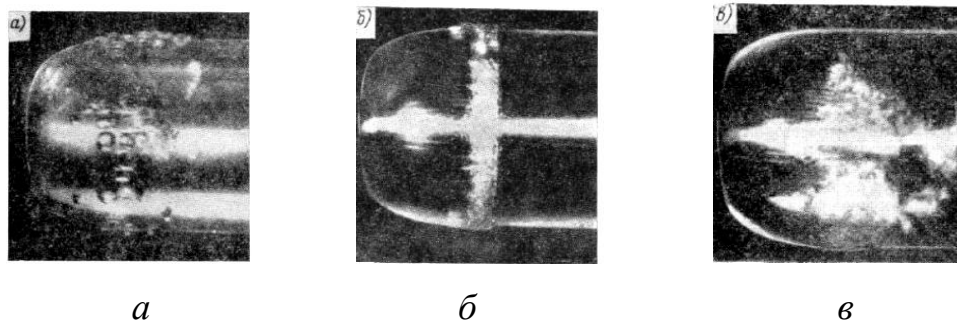


Рис. 1.2 – Різні форми початкової стадії кавітації: *а* – бульбашкова; *б* – плівкова у вигляді паска; *в* – у вигляді плям

Кавітація може виникати в потоці рідини, що має перемінне поле тиску, а також поблизу і на поверхні тіл різної форми – у місцях найбільшого розрідження. Перемінне поле тиску створюється різним чином: у результаті зміни швидкості потоку (руху тіла), впливу форми тіла, в наслідок механічних впливів на рідину (ультразвук, коливання низької звукової частоти).

Ультразвукова кавітація створює над магнітострикційним випромінювачем кавітаційні порожнини (рис.1.3).

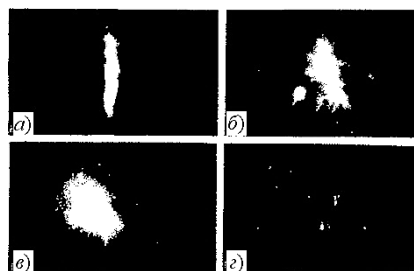


Рис. 1.3. – Кавітаційні порожнини, які виникають над ультразвуковим магнітострикційним випромінювачем при різних статичних тисках [70]:

а – 0,9 МПа; *б* – 0,6 МПа; *в* – 0,2 МПа; *г* – 0,1 МПа

Проведено багато досліджень щодо впливу ультразвукової кавітації на активацію води та зміни її складу і властивостей [7,40-55]. Встановлено, що

інтенсивність кумулятивної дії на середовище при сплескуванні кавітаційного пухирця залежить від газового та парогазового вмісту, властивостей середовища, коефіцієнта кумуляції. При ультразвуковій кавітації число кавітаційних пухирців залежить від кількості ядер кавітації, які практично не піддаються регулюванню.

У випромінювачах роторного типу акустичні коливання утворюються за рахунок періодичного перекриття пазів у статорі зубцями ротору, що обертається рис.1.4. Таке обладнання використовують для обробки відносно в'язких рідин, твердих і волокнистих матеріалів.

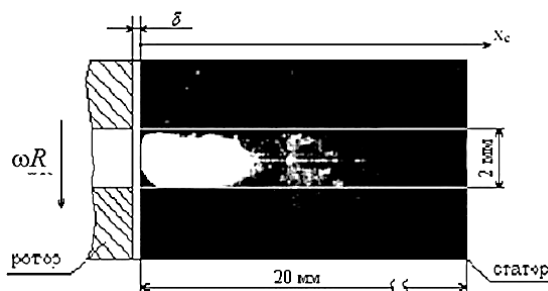


Рис. 1.4 – Кавітаційна порожнина, яка утворилася у каналі статора роторного

В роторно-пульсаційних апаратах (РПА) [72,73] і роторних апаратах із модуляцією потоку при обробці рідин поєднуються різні способи впливу на середовище за рахунок конструктивних особливостей пристроїв. РПА складається з двох (або більше) роторів у вигляді коаксіальних циліндрів із щілиноподібними отворами. Коли групи циліндрів обертаються одна відносно другої, отвори всіх циліндрів періодично не співпадають, перекриваючи потік рідини, яка проходить через пристрій. Внаслідок цього виникає ефективна турбулізація й пульсації потоку середовища, що супроводжуються кавітаційними ефектами (див. рис.1.4.).

Але таке обладнання має свої недоліки: неможливість регулювання характеристик кавітаційної зони і отже – ефективності оброблення, труднощі при регулюванні частоти й амплітуди пульсацій при сталих витратах середовища, поступове зниження ефективності обробки при багаторазовому проходженні середовища через пристрій. Це зв'язано з тим, що

процес утворення кавітаційних каверн гальмується через сильну дегазацію рідини.

Відомі гідродинамічні (ГД) кавітаційні пристрої, у яких в потоці рідини, що оброблюється, утворюється місцеве просторове зниження тиску і розвивається гідродинамічна кавітація за рахунок різкої зміни геометрії течії рідини[37,38,74]. Енергія для збудження кавітації підводиться безпосередньо технологічним потоком рідини (ГД пристрою статичного типу) або кавітатором, який обертається (ГД пристрої динамічного типу).

За каверно утворюючі тіла інколи використовують лопатеві механізми. В таких конструкціях перешкоди нерухомо встановлюються вздовж робочої камери реактора і оснащують системою регулювання кутів встановлення лопатей. Вигляд кавітаційної каверни показано на рис. 1.5.

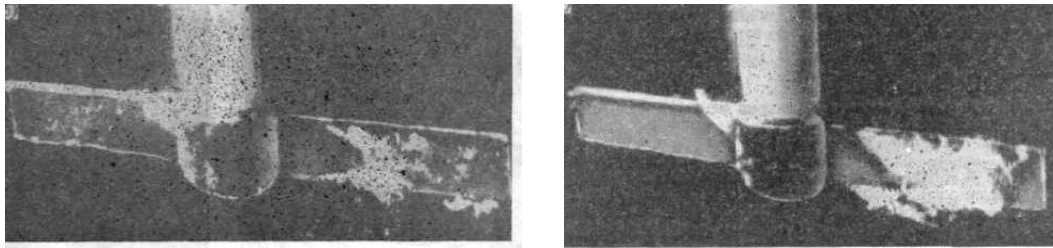


Рис. 1.5 – Форма каверн при гідрокавітації на лопаті мішалки при різних швидкостях обертання

В роботах [9,39,74] авторами експериментально досліджено і теоретично обґрунтовано, що для інтенсифікації процесів окиснення органічних речовин у промислових стоках доцільно використовувати кавітаційні ефекти, що виникають при гідродинамічних процесах за допомогою спеціального обладнання. Найпростішими серед них є гідродинамічні кавітаційні апарати проточного типу з нерухомо закріпленими перешкодами.

В найбільш простих конструкціях кавітаційних апаратів використовуються суцільнометалеві перешкоди, що встановлюються в робочій камері нерухомо та розміщуються рядами по концентричним колам, що утворюють в камері просторову решітку. Недоліком цих пристроїв є

неможливість регулювання протяжності кавітаційного поля. Режим пульсації тиску, швидкості потоку, а також можливі зміни параметрів самої рідини (газовміст) значно впливають на розміри каверн в робочій камері, внаслідок чого технологічний режим роботи обробки може відхилятися від оптимального (рис. 1.6). В деяких апаратах кавітаційні каверни утворюються за рахунок співудару зустрічних потоків [75]. Рідина, що подається, струминами витікає назустріч основному потоку рідини, в результаті чого в потоці утворюються каверни. Подібні конструкції реакторів дозволяють розширити технологічні можливості кавітації, так, наприклад: зустрічне підведення хімічних реагентів в реактор поряд із виконанням функції каверно утворення дозволить отримати більший ефект окиснення органічних сполук.

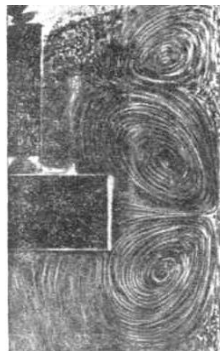


Рис. 1.6 – Турбулентний режим та утворення кавітаційних каверн в апараті із суцільнометалевими перешкодами

Однак експлуатація цих апаратів відрізняється складністю процесу регулювання кавітації в робочій камері, пов'язаною з необхідністю використання додаткового регулювання режимних параметрів, а саме – тиску та витрати рідини, що подається колектором. Існує цілий ряд апаратів, основною особливістю яких є можливість регулювання інтенсивності кавітаційного поля за рахунок зміни тиску в каверні.

В деяких конструкціях перешкоди виготовляють у вигляді пустотілих циліндрів, що мають можливість повертатися. Це дозволяє краще регулювати ширину кавітаційного поля по перерізу робочої камери та його протяжність. У

пристроях цього типу використовують також конструктивні елементи, що дозволяють інтенсифікувати процес кавітаційної обробки рідини за рахунок створення кавітації, в пристінних граничних шарах потоку внутрішньої поверхні робочої камери або за рахунок створення суцільного поля кавітації по всьому об'єму потоку при вході його в дифузор. При використанні вакуумних систем регулювання кавітації можливі випадки засмоктування рідини з основного потоку у вакуумну лінію, в результаті чого система може вийти з ладу або працювати в нестационарному режимі.

Регулювання режимів кавітаційного поля може також проводитися переміщенням перешкод вздовж робочої камери. Для ефективної роботи такої конструкції стержень з перешкодами встановлюється в тому перерізі робочої камери, параметри течії у якому забезпечували б отримання кавітації необхідної інтенсивності. Це дозволяє утворювати каверни по всьому об'єму робочої камери і суттєво підвищити ефективність роботи апарата.

Існують методи підвищення енергії кавітаційного поля, що основані на поєднанні способів збудження кавітації та інтенсифікації кавітаційної дії на рідину за рахунок використання енергії вібрації корпусу установки. В цьому випадку використовується ефект резонансних коливань корпусу робочої камери від вібраційних складових пульсацій тиску в кавітаційному полі. Вібрація установки викликає пристінкові кавітаційні ефекти та сприяє підвищенню градієнта тиску в зоні кавітації. Основним недоліком таких апаратів є кавітаційна ерозія внутрішньої поверхні робочої камери та складність створення коливань.

Маргуліс [7, 76] досліджував ріст і пульсацію газових пухирців у рідині під дією низькочастотних коливань (від 10 до 200 Гц). При цьому резонансний радіус пухирця і період коливання, наприклад, при частоті 100 Гц складали 10 мм і 0,01 с відповідно рис.1.7.

Виявилось, що при низьких частотах, дотримуючись визначених умов, можна створювати розвитку кавітацію у рідинах і спостерігати фізико-хімічні й хімічні ефекти, що характерні для ультразвукових коливань: дегазацію,

емульгування, диспергування, ерозію й очищення поверхні твердих тіл, а також сонолюмінесценцію і хімічні реакції.

При роботі установок дослідники [76-78] спостерігали як із дрібних пухирців діаметром 0,1 мм виникають більш великі пухирці діаметром 1 мм, число їх поступове збільшується, причому усі вони безупинно коалесцирують один з одним, поступово утворюючи скупчення кулястої форми, до яких спрямовуються під дією сил Бьєркнеса інші мікропухирці. Через час від 10 до 15 хв. усі пухирці збираються разом і утворюють один (іноді кілька) великих пухирців, діаметр яких від 4 до 10 мм. Поверхня великого деформованого пухирця (ВДП) виявлялася сильно порізаною так, що при візуальному спостереженні він нагадує їжака (рис. 1.8).

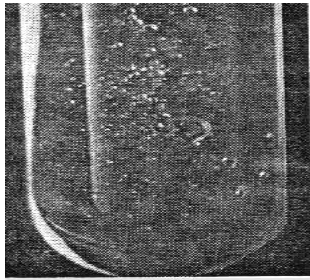


Рис. 1.7 – Створення згустку кавітаційних пухирців, які потім приводять до отримання великого деформованого пухирця

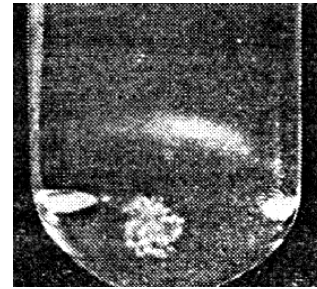


Рис. 1.8 – Фотографія ВДП, створеного у низькочастотному акустичному полі від 80 до 100 Гц, охопленим мілкими пухирцями

Спонтанно утворені великі деформовані пухирці по характеру руху значно відрізняються від численних дрібних пухирців, що є присутніми у рідині. За певних умов, коли один ВДП вже пульсує, на стінках пробірки внаслідок додаткової дегазації рідини поступово утворюється другий або третій ВДП меншого розміру, які, досявши визначеного розміру, відриваються від стінки і притягаються до найбільшого ВДП.

Спостереження вчених М. А. Маргуліса і інших [7, 68,77,78] показали, що з пухирців діаметром 0,1 мм виникають більші пухирці діаметром 1 мм, і їхня кількість поступово збільшується. Крім того пухирці один з одним безупинно

коалесцируються і поступово утворюючи скупчення кулястої форми, до яких під дією сил Бьєркнеса спрямовуються інші мікропухирці. Протягом від 10 до 15 хв. пухирці скупчуються і утворюють один або декілька великих пухирців, розміром від 4 до 10 мм в діаметрі.

Великі деформовані пухирці по характеру руху відрізняються від чисельних дрібних пухирців у рідині і при певних умовах, коли пульсує один великий деформований пухирець, то поступово утворює один або декілька таких пухирців, але меншого розміру, і при досягненні визначеного розміру відривається від стінки і притягається до найбільшого пухирця. Утворення одного або декілька великих деформованих пухирців меншого розміру відбувається в наслідок дегазації рідини на стінках пробірки. Можна спостерігати багато особливостей зміни структури кавітаційного поля при низькочастотних коливаннях, а саме пульсації мікропухирців, їхню коалесценцію й утворення великих деформованих пухирців та розчеплення і відрив від нього осколкових пухирців і інше [7,68,77,78].

На сьогодні кавітаційні технології є актуальними для хімічної, харчової, комунальної промисловості і машинобудування. Зазвичай, кавітаційний вплив використовується як один з етапів знезараження і очищення стічних вод [79-81]. Активне промислове використання кавітаційних процесів із застосуванням різних за принципом дії установок, машин, агрегатів переконливо підтверджує високу ефективність даного фізичного явища, як ефективного засобу знезараження, прискорення хімічних реакцій, механізму видозміни структури і властивостей оброблюваних водних розчинів. Широко використовують методи акустичної кавітації: ультразвукову (УЗ) і гідродинамічну кавітацію [87-89]. Розвиток кавітаційних технологій з використанням методу УЗ очищення водних систем підтверджується успіхами сонохімії і, зокрема, накопиченням результатів за дією УЗ на органічні [90] і біологічні об'єкти [86,87].

Піддаючи ультразвукової обробки побутові стічні води, забруднені органічними речовинами, експериментально встановлено, що кавітація може

знизити значення хімічне споживання кисню на 25-30% менше ніж за 60 хв. Крім того, було визначено, що нерозчинні сполуки перетворюються в розчинні.

Так при гідродинамічних коливаннях рідини виникають і зникають кавітаційні бульбашки. При цьому стимулюються фазові переходи, підвищуються локальні температура і тиск. Крім того, в моменти появи і зникнення кавітаційних бульбашок, в газонаповнених порожнинах створюються умови для появи електричних зарядів і магнітних полів. Таким чином, рідина, що обробляється кавітацією, піддається термобаричному і електромагнітного впливу. Особливістю кавітаційного методу обробки води полягає в тому, що високий ступінь знезараження води від яєць і личинок паразитів досягається за рахунок їх механічного руйнування ударними хвилями. Для руйнування бактерій і вірусів термобаричний вплив посилюється локальним електростатичним впливом, коли наведені електричні потенціали пробивають їх мембрани і оболонки.

На стадії прямої дії акустичних коливань на хід процесу можуть впливати тільки хімічно активні гази, тобто, O_2 і H_2 . В кінцевому підсумку вплив кавітації на водні розчини зводиться до єдиного процесу - розщеплення молекул води в кавітаційних бульбашках. Незалежно від природи розчинених у воді речовин акустичні коливання впливають тільки на воду, що призводить до зміни її фізико-хімічних властивостей - збільшення рН, електропровідності, числа вільних іонів і активних радикалів, а також структурування і активації молекул [7,73].

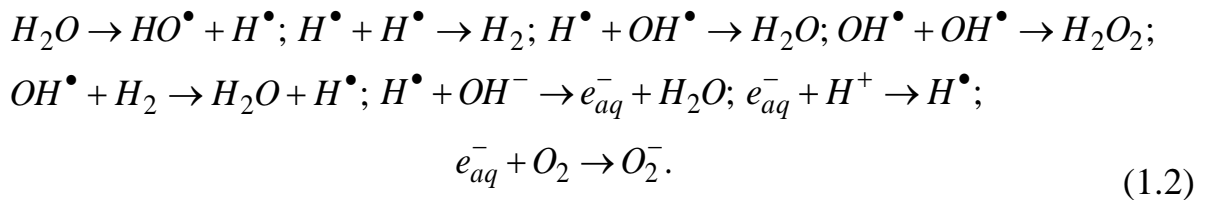
Крім того різко збільшується швидкість реакції порушених коливаннями молекул води з радикалами водню з виділенням складових OH і H_2 . Ці процеси насичують рідину радикалами OH^- , O^- , O^+ і активними газами O_2 , H_2 . З іншого боку ростуть електричні нестационарні сили взаємодії між сусідніми диполями, які підсилюють їх коливання як цілісного об'єкта і збільшують ймовірність руйнування рідкокристалічної структури води.

Модель фізико-хімічних процесів, що відбуваються в кавітаційній бульбашці і прилеглому до неї об'ємі рідини автори [7,88,89] наводять в

наступному вигляді. У кавітаційну порожнину можуть проникати пари води, розчинені гази, а також речовини з високою пружністю пари і не можуть проникати іони або молекули нелетких розчинених речовин. Газоподібні молекули води руйнуються як при піролізі, утворюючи радикальні високоактивні частинки, а також гідроксильні радикали:

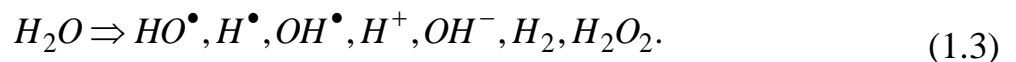


В роботах [7,76] чітко пояснена можливість виникнення гідратованих електронів за допомогою теорії вільних радикалів. Молекули води і розчинений в ній газ під дією кавітації зазнають наступним перетворень:



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.

Сумарну схему кавітаційного розщеплення молекул води зображують в наступному вигляді:



Виникаючі в системі активні частинки 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 .

Зрештою, вплив кавітації на водні розчини зводиться до єдиного процесу - розщепленню молекул води в кавітаційних бульбашках. Незалежно від природи розчинених речовин, кавітація діє на одну речовину - на воду, що

призводить до зміни її фізико-хімічних властивостей: збільшення рН, електропровідності, числа вільних іонів і активних радикалів, структуризації і активації молекул.

Для підвищення ефективності процесу необхідно збільшити багаторазовість зазначених впливів, що обумовлює високий ступінь зворотності реструктуризації і призводить до часткового повернення води до попередньої контрольної структури і, як наслідок, до низького ступеня її кінцевої реструктуризації.

1.3. Аналіз теорій кавітаційного процесу та впливу гармонічних коливань на розвиток кавітації у водних середовищах

Зростання парових бульбашок при періодичних пульсаціях, порушуваних зовнішнім полем, також обумовлено явищем, яке отримало назву випрямленою теплопередачі або випрямленого теплопереносу [90]. Цей ефект аналогічний випрямленою газової дифузії. У фазі розрідження акустичного поля при зниженні тиску знижується температура бульбашки і тепло йде від рідини в порожнину через велику площу поверхні бульбашки, а в фазі стиснення при підвищенні тиску підвищується температура бульбашки і тепло йде в рідину і при цьому площа поверхні бульбашки мала. У звичайних умовах не спостерігається чистих газових або парових бульбашок і бульбашка, як правило, заповнений парогазової сумішшю. Зростання бульбашки в зовнішньому акустичному полі відбувається за рахунок всіх ефектів, які були описані вище.

Нелінійність кривої фазової рівноваги призводить до того, що в середньому температура парової бульбашки знижується по відношенню до температури навколишнього рідини, а це викликає потік тепла з рідини в бульбашку, випаровування рідини і зростання бульбашки в середньому за період.

У більшості досліджень кавітації, особливо теоретичних, розглядають поведінку одиночної бульбашки. В реальних умовах необхідний цілий комплекс заходів, щоб домогтися існування одиночної бульбашки. Навіть при тиску, не набагато перевищує поріг кавітації, відразу з'являється безліч кавітаційних бульбашок, що займають певну частину простору, яку називають кавітаційною областю [91].

При імпульсних напруженнях, що розтягують, в рідині зародки кавітації починають рости, утворюючи кавітаційний кластер, форма і довжина якого визначаються початковим спектром розмірів кавітаційних зародків, характером прикладеного напруження і граничними умовами. Всі зародки досягають максимального розміру одночасно, і середовище може вважатися практично монодисперсним, що містить бульбашки тільки одного розміру [87]. В даний час немає задовільної моделі кавітаційної області, яка адекватно описує її поведінку і поведінку, що належить до неї, окремого кавітаційного пухирця.

Поведінка кавітаційної області залежить від багатьох явищ і факторів: розмноження і коагуляція (коалесценція) бульбашок; їх взаємодія; зміна характеру пульсацій бульбашки за рахунок ударних хвиль і звукового випромінювання сусідніх бульбашок; зміна середніх акустичних властивостей середовища; мікропотоки всередині кавітаційної області та на кордоні бульбашки; розподіл зародків кавітації; газовміст і т.п.

У багатьох теоретичних дослідженнях кавітації [90,93,94] розглядають поведінку одиночного кавітаційного пухирця.

При поширенні в рідині гармонійних коливань, без урахування сил Кулонівського відштовхування і дифузії газу через поверхню бульбашки, але з урахуванням ізотермічності процесу, зростання бульбашки з радіусом R рівняння рівноваги записується як [94] :

$$P_0 - P_a = \left(P_\infty - P_n + \frac{2\sigma}{R_0} \right) \left(\frac{R_0}{R} \right)^3 - \frac{2\sigma}{R_0} + P_n, \quad (1.4)$$

де P_0 – початковий тиск в бульбашці, Па; P_a – акустичний тиск, Па; R_0 – початковий радіус бульбашки, м; P_∞ – статичний тиск в рідині, Па; P_n – тиск насичених парів, Па; σ – поверхневий натяг рідини

Бульбашка стійка, поки P_a не досягає критичного значення $P_{кр}$. При $P_a > P_{кр}$ бульбашка починає швидко рости, що призводить до розриву суцільності рідини. Значення критичного радіуса визначається за формулою:

$$R_{кр} = \sqrt{3}R_0 \sqrt{(R_0 / 2\sigma)(P_\infty - P_n + 2\sigma / R_0)}. \quad (1.5)$$

З урахуванням того, що тиск насичених парів значно менший гідростатичного тиску, рівняння для кавітаційної міцності рідини в залежності від початкового радіуса бульбашки записується у вигляді:

$$R_0^3 + R_0^2 2\sigma / P_\infty - 32\sigma^3 / (27P(P_\infty - P_{кр})^2) \cong 0. \quad (1.6)$$

Для заданого змінного тиску і частоти звукового поля існує мінімальний і максимальний радіус бульбашок, здатних викликати кавітацію. Мінімальний радіус визначається рівняннями (1.5) і (1.6), а максимальний відповідає резонансному радіусу, який визначається за формулою Міннерта [94]:

$$f_p = \frac{1}{2\pi R_p} \sqrt{\frac{3\gamma}{\rho} (P_\infty + \frac{2\sigma}{R_p})}, \quad (1.7)$$

де $\gamma = C_p / C_v$ – співвідношення питомих теплоємностей для газу і пари в бульбашці.

Формула (1.7) може бути використана для гармонійних коливань бульбашки при невеликих амплітудах, для низьких частот звукового поля і великих бульбашок. Для високих частот більш придатна для застосування

формула, виведена Хабеевим при обліку фазових переходів і поверхневого натягу, яка описує залежність резонансного радіуса бульбашки від частоти [90]:

$$R_p^4 = \sigma^2 / (\pi A_p^2 f^2), \quad (1.8)$$

де A_p – функція, що залежить від теплоти пароутворення, щільності, теплопровідності і температури рідини.

У міру збільшення частоти акустичного поля кавітацію викликають тільки бульбашки з більшою f_p тобто бульбашки меншого радіуса, ніж R_p .

Межа кавітації і його частотна залежність визначаються об'ємом рідини. Величина кавітаційної міцності рідини залежить від найбільшого зародка з усіх наявних в об'ємі рідини. Ймовірність влучення в озвучену зону зародка більшого розміру зростає зі збільшенням об'єму озвучування рідини [93].

Нелінійне диференціальне рівняння, що описує просту модель сферично-симетричну пульсацію газової порожнини радіусом $r = R(t)$ у полі плоскої звукової хвилі, має вигляд:

$$R \frac{d^2 R}{dt^2} + \frac{3}{2} \left(\frac{dR}{dt} \right)^2 + \frac{1}{\rho} [P_\infty - P(R)] = 0. \quad (1.9)$$

Аналітичне рішення цього рівняння, отримано Релеєм при найпростіших умовах: $P_\infty = P_a$; $P(R) = 0$. У цьому випадку рівняння (1.9) переходить в рівняння закривання порожній порожнини під дією гідростатичного тиску:

$$\left(\frac{dR}{dt} \right)^2 = \frac{2}{3} \frac{P_\infty}{\rho} \left(\frac{R_{\max}^3}{R^3} - 1 \right). \quad (1.10)$$

Час закривання порожнини визначається з формули Релея [88]:

$$t_c = 0.915 R_{\max} \sqrt{\rho / P_\infty}. \quad (1.11)$$

При дуже великій швидкості закривання пухирця випромінююча хвиля якого може перейти в ударну, тиск в якій змінюється обернено пропорційно відстані від порожнини r [94]. Відстань, на якому утворюється ударна хвиля, визначається значенням максимального тиску в порожнині і відповідає співвідношенню:

$$P_{\max} \asymp 13.6 \left(\lg \frac{r}{R_{\min}} \right)^{-2/3}, \quad (1.12)$$

де P_{\max} становить сотні мегапаскалей.

В якості безрозмірних параметрів, що характеризують кавітацію, використовують критерії гідродинамічної кавітації [47, 48]:

$$x_r = \frac{P_k - P_n + 2\sigma/R_0}{\rho V^2 / 2}. \quad (1.13)$$

де V – швидкість потоку рідини;
та акустичної кавітації:

$$x_a = \frac{P_k - P_n + 2\sigma/R_0}{P_a}. \quad (1.14)$$

Для створення кавітаційної області використовується певна частина енергії первинного звукового поля. Відношення витраченої енергії E_k до загальної енергії первинного поля E називається коефіцієнтом кавітаційного використання акустичної енергії [76]:

$$\eta = \frac{E_k}{E}. \quad (1.15)$$

Таким чином, кавітаційна область являє собою своєрідний трансформатор потужності, в якому порівняно повільно накопичується енергія та звільняється протягом дуже короткого часу, в результаті чого миттєва потужність у багато разів перевершує середню, що вводиться випромінювачем в кавітаційну область [92].

Сонолюмінесценція і звукові хімічні реакції є генетично пов'язаними процесами, можуть надавати взаємний вплив, але в принципі вони можуть здійснюватися незалежно один від іншого [7,76]. Ультразвукова люмінесценція і світіння, що виникає при гідродинамічній кавітації, є близькими за своєю природою процесами. При експериментальному дослідженні кавітації в низькочастотних звукових полях було виявлено аналогію з фізико-хімічними ефектами між низькочастотною і ультразвуковою кавітацією.

1.4. Аналіз сучасних конструкцій обладнання та машин для кавітаційного впливу на рідинне середовище

За останній період з'явився новий напрям створення вібраційного обладнання для обробки води кавітацією, яке забезпечує надання воді нових властивостей і її знезараження [83]. Однак цим установкам властиві деякі недоліки - незначний час одноразового перебування рідини в стані виникнення кавітації зони. Розглянемо конструкції та принцип роботи деяких пристроїв та машин для знезаражування водних потоків.

Відомі протічні струменеві кавітаційні пристрої [95], схему якого показано на рис.1.9.

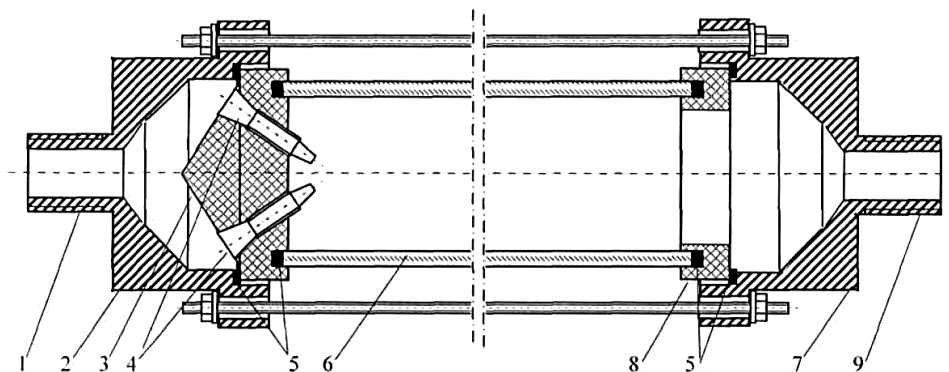


Рис. 1.9 – Схема гідродинамічного струминного кавітатора: 1 - патрубок подачі води; 2 – обойма; 3 – вставка; 4 – сопло; 5 – ущільнення; 6 – корпус; 7 – обойма; 8 - вставка; 9 - патрубок відведення води

Гідродинамічний струминний кавітатор працює наступним чином. Рідкофазне середовище, яке піддають кавітаційному обробленню, під тиском подають через патрубок подачі 1 у простір між обіймою 2 і вставкою 3. Потік за допомогою конуса вставки 3 рівномірно розподіляється січенням цього простору і надходить у сопла 4. На виході із кожного сопла формується струмінь, що володіє високою кінетичною енергією. Під час зіткнення струменів на деякій відстані від сопл 4 у рідкофазному середовищі збуджується кавітація й формується область кавітації всередині корпусу 6. За рахунок руху потоку ця область поширюється вздовж осі кавітатора на весь корпус 6. Компоненти рідкофазного середовища піддаються інтенсивному обробленню в області існування кавітації, внаслідок чого інтенсифікуються хімічні процеси, масо- і теплоперенесення, генерування теплової енергії, очищення стічних вод.

Після оброблення у кавітаційному полі, рідкофазне середовище через патрубок відведення 9 виводиться з кавітатора.

Відомий гідродинамічний кавітаційний реактор [96] належить до пристроїв для гідродинамічної обробки рідин і може бути застосований як хімічний реактор, де в ролі каталізатора виступає кавітація.

У даних реакторах між вхідним і вихідним отворами розташована штучна перешкода для зменшення перерізу потоку. В результаті обтікання перешкоди в області звуження потоку збільшується швидкість, створюється перепад тиску, який призводить до утворення кавітаційних течій. Проте ефективність роботи гідродинамічних кавітаційних реакторів з обтіканням тіла є невисокою, оскільки реакція відбувається лише в обмеженому об'ємі рідини, де зосереджене ядро кавітаційного струменя.

Для того, щоб збільшити вихід кінцевого продукту хімічних реакцій, які каталізує кавітація, рідину необхідно інтенсивно перемішувати і проводити обробку її кавітацією декілька разів. З цією метою використовуються пристрої роторного типу, так звані гідродинамічні сирени.

Відомий реактор генерує кавітаційні потоки в усьому об'ємі рідини, але потужність гідродинамічних коливань в ньому обмежена величиною колової швидкості ротора в 25 м/с. При збільшенні швидкості руху рідини відносно твердих поверхонь вище від 25 м/с різко (в декілька разів) збільшується кавітаційна ерозія, що призводить до прискореного зносу ротора і статора.

Якщо кут нахилу профілю виступу до площини диска буде меншим від 25° , знижується ефективність генерації гідродинамічних коливань, тобто зменшується потужність гідродинамічних коливань і вихід кінцевих продуктів хімічних реакцій, каталізом яких є кавітація. При збільшенні кута нахилу вище від 40° збільшується кавітаційна ерозія поверхонь ротора і статора.

На рис. 1.10 зображено загальний вигляд гідродинамічного кавітаційного реактора в розрізі; на рис. 1.11 – розріз *A-A*; на рис. 1.12 розріз *B-B* і розріз *C-C* з рис. 1.10.

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

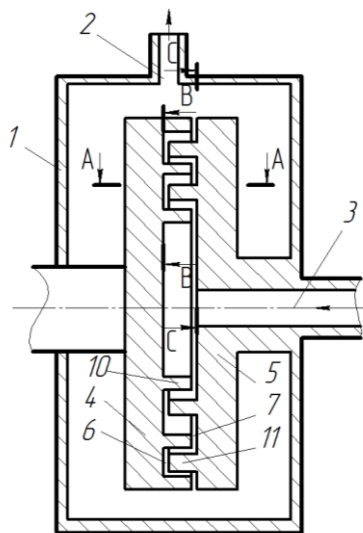


Рис. 1.10 – Схема загального вигляду гідродинамічного кавітаційного реактора: 1 – корпус; 2 – вхідний отвір; 3 – вхідний отвір; 4 – ротор; 5 – статор; 6 – пази ротора; 7 – пази статора; 10,11 – виступи

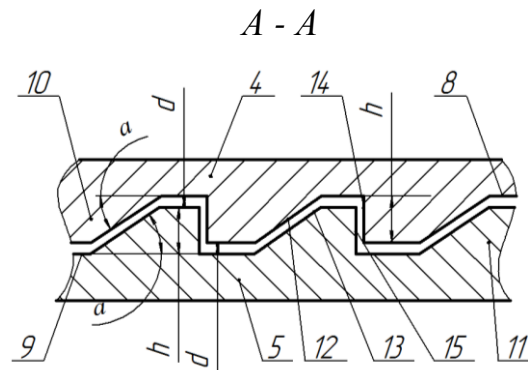


Рис.1.11 – Схема перетину канавок ротору та статора *A-A*: 8,9 – канавки;
12,13 – скоси; 14,15 – кромки

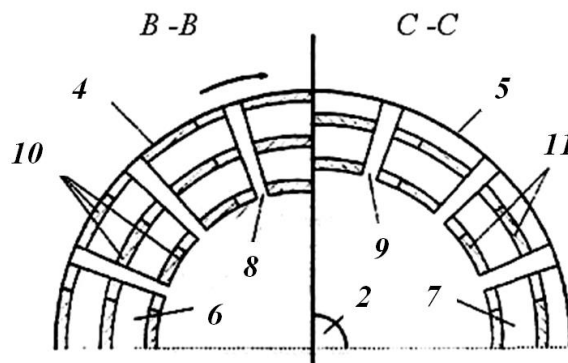


Рис. 1.12 – Схема перетинів ротора та статора *B-B* та *C-C*: 2 – вхідний отвір;
4 – ротор; 5 – статор; 6 – пази ротора; 7 – пази статора; 8,9 – канавки;
10,11 – виступи

При обертанні ротора в моменти, коли радіальні канавки 8 ротора 4 і радіальні канавки 9 статора 5 суміщаються, відкривається створ для потоку, і порція рідини вільно переміщується в напрямі від центра дисків до периферії. Рідина захоплюється виступами 10 ротора 4 і проштовхується в пази 6 ротора 4 і пази 7 статора 5. Кавітаційна течія при цьому формується за кромкою 14 виступу 10 ротора 4 і перед кромкою 15 виступу 11 статора 5. У тому випадку, коли радіальні канавки 8 ротора 4 перекриваються виступами 11 статора 5, а

радіальні канавки 9 статора 5 перекриваються виступами 10 ротора 4, переріз каналу потоку зменшується, рідина змінює напрям течії та починає рухатися в поперечному напрямі в обхід виступів 10 і 11 через зазор сі між дисками. За рахунок періодичної зміни напрямку течії в просторі між ротором 4 і статором 5 відбувається інтенсивне перемішування рідини, що обробляється. При обертанні ротора 4 рідина натікає на виступи 10 ротора 4 і виступи 11 статора 5 по скосах 12 і 13 відповідно, а відрив течії відбувається з кромки 14 виступу 10 ротора 4 і з кромки 15 виступу 11 статора 5. В результаті відриву рідини від виступів 10 і 11 в ній утворюється розрідження, і відбувається формування кавітаційних течій в просторі за кромкою 14 виступу 10 і перед кромкою 15 виступу 11. Струмінь кавітаційних бульбашок, які сформувалися за виступом 10 і перед виступом 11, віджимається до центра пазів 6 і 7 рідиною, що потрапляє в область розрідження, і спрямовується в напрямі наступного виступу. Оскільки виступи 10 ротора 4 і виступи 11 статора 5 мають скоси 12 і 13 з боку натікання рідини на них, кавітаційний струмінь через деякий час після відриву від кромки виступу потрапляє в область, де тиск рідини поступово підвищується. Коли тиск рідини стає вищим за критичний, кавітаційний струмінь швидко згасає, потік з турбулентного стає ламінарним, і кавітаційного руйнування поверхонь реактора не відбувається.

Після виходу рідини з простору між дисками вона видаляється з кавітаційного реактора через вихідний отвір 2. Ротор кавітаційного реактора приводиться в рух електродвигуном (на кресленні не показаний). Рідина потрапляє в об'єм реактора через вхідний отвір 3 і видаляється з нього через вихідний отвір 2 обертовим ротором, за принципом відцентрового насоса.

Відома установка по очищенню й знезаражуванню води [97]. Обладнання відноситься до обробки води, промислових або побутових стічних вод механічними коливаннями з метою біологічного або хімічного очищення без суттєвого нагріву води, поєднаного з флокуляцією зважених забруднень і з відділенням зважених забруднень фільтрацією і може бути використано

зокрема, в сільському і комунальному господарствах, а також харчовій та інших галузях промисловості.

Новим в установці є те, що тепло-приймальний канал теплообмінника встановлено на лінії подачі води, перед насосом, лінія подачі води після насоса має розгалуження на два контури, один контур, замкнений на напірну лінію насоса з розміщеним на цьому контурі багатокамерним соплом, виконаним з ефектом рівної швидкості рідини в перетинах різних камер сопла, а другий контур з'єднано зі входом другої (тепло-віддаючому) каналу теплообмінника, вихід з якої з'єднано з лінією видачі (подачі) обробленої води.

На рис. 1.13 представлено схему установки по очищенню й знезаражуванню води та його частину яка може мати самостійне значення, зокрема пристрій обробки води (який виділений в схемі контурною лінією), а на рис. 1.14 перетин застосованого в установці багатокамерного сопла, виконаного з ефектом рівної швидкості рідини у його камерах.

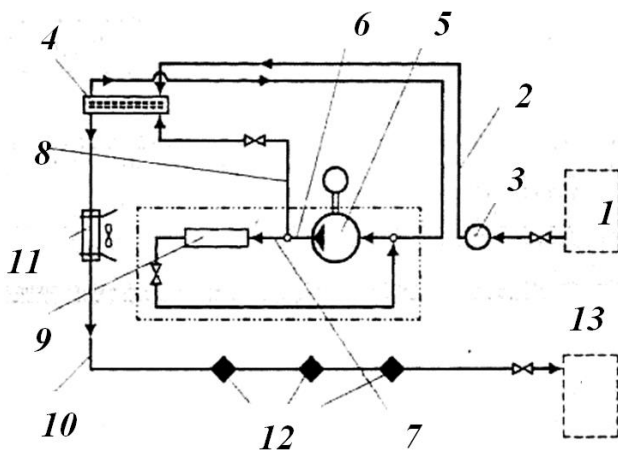


Рис. 1.13 – Схема установки по очищенню й знезаражуванню води:
1 – збірник води необробленої; 2 – лінія подачі; 3 – насос; 4 – теплообмінник;
5 - насос; 6,7,8 - контури; 9 - багатокамерне сопло; 10 – вода оброблена;
11 – теплообмінник; 12 – фільтр;
13 – збірник обробленої води

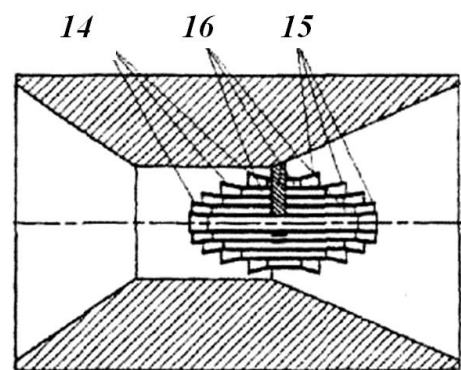


Рис. 1.14 – Схема багатоканального рівношвидкісного сопла:
14 – вхідна поверхня камери; 15 – вихідна форма поверхні камери;
16 – форма протічної поверхні багатоканального сопла

Працює установка наступним чином. Із джерела необробленої води *1*, за допомогою насоса живлення *3* по лінії подачі *2* вода подається в теплоприймальний канал теплообмінника *4*, з якого підігріта вода, разом з водою із контуру *7* подається на насос *5*, оброблена вода після насоса *5* направляється на два контури *7* та *8*. В контурі *7* підігріта змішана вода подається у багатокамерне сопло *9* де внаслідок кавітації генерується ультразвук, вода обробляється знезаражується та очищується. Зазначений процес в соплі виконаному з ефектом рівної швидкості рідини в перетинах різних камер сопла, забезпечує рівномірний процес кавітації у всіх перетинах сопла що суттєво покращує процес обробки. Багаторазово оброблена вода по другому контуру *8* подається на (тепло-віддаючий) канал теплообмінника *4*, що забезпечує підігрів води, яка направляється у насос *5* та сопло *9*. прямуючи по лінії видачі (подачі) обробленої води *10* вода додатково охолоджується у теплообміннику *11*, очищується у фільтрах *12* та спрямовується в збірник обробленої води *13*.

Відомий вібраційний електромагнітний кавітатор резонансної дії для збурення кавітації в рідинах [98] відноситься до галузі обладнання кавітаційних хіміко-технологічних процесів. Він може бути застосований, наприклад, для водоочищення, знезараження питної води, стоків хімічних, харчових та переробних підприємств від різноманітних забруднень, в тому числі від біологічних. Даний кавітатор належить до групи обладнання фізико-хімічних методів магнітного та кавітаційного ініціювання і активації окиснювально-відновлювальних реакцій у рідинах енергією сплескування кавітаційних бульбашок у середовищі магнітного поля.

Принципова схема вібраційного електромагнітного кавітатора резонансної дії зображена на рис. 1.15 та відображено фрагмент поперечного перерізу *A-A*. На рис. 1.16,*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 (*б*), фрагмент деки-збурювача кавітації із насадкою-форсункою (*в*). До складу вібраційного електромагнітного кавітатора входять завантажувальна *б*, робоча

9 та відвідна 14 камери, що з'єднані між собою із можливістю відносних переміщень через гнучкі гофри 8 та 12.

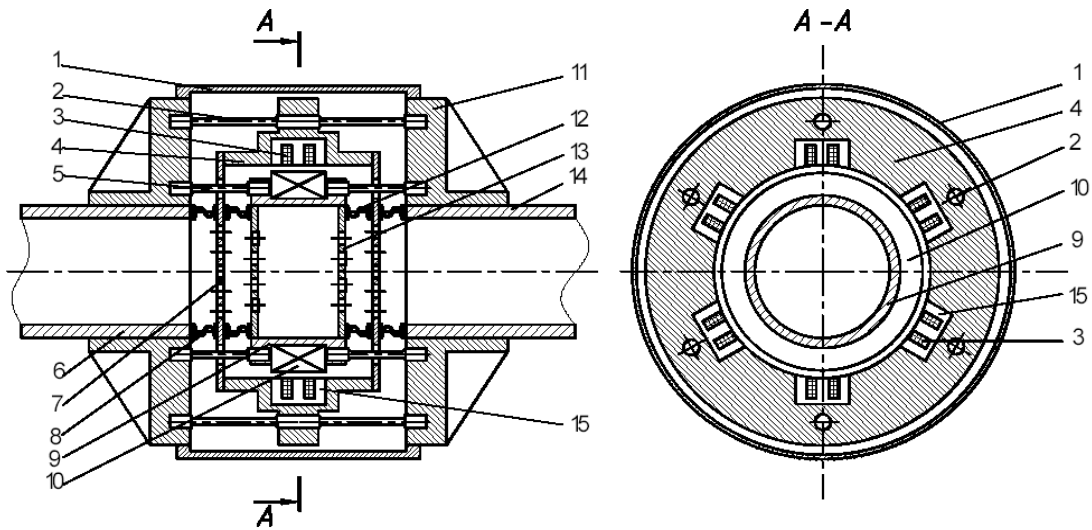


Рис. 1.15 – Принципова схема вібраційного електромагнітного кавітатора резонансної дії для магнітно-кавітаційного оброблення рідин: 1 – корпус; 2,5 – пружні стержні; 3 – обмотка; 4 – корпус статора; 6 – труба; 7,13 – деки; 8,12 – пружні елементи; 9 – камера; 10 – ярів; 11 – реактивна маса; 14 – труба; 15 – котушки електромагнітів

На робочій камері закріплено набраний із листового заліза кільцевий ярів 10, а камера та ярів через циліндричні пружні стержні з'єднані із закріпленими на трубах завантажувальної та відвідної камер реактивних масах 11. Співвісне якореві 10 через циліндричні пружні стержні 2 до реактивних масах прикріплено корпус 4 статора, у якому рівномірно по колу розташовані котушки електромагнітів 15 із обмотками 3. Обмотки шістьох рівномірно розташованих по колу електромагнітів з'єднано таким чином, що вони утворюють три, зміщених між собою на 120° , двотактних віброзбудників.

Співвісне розташовані статор із котушками і обмотками та ярів з робочою камерою утворюють кільцевий електромагнітний віброзбудник, який у поєднанні із прикріпленими до реактивної маси пружними стержнями формують тримасову резонансну коливну систему. Перша з коливних мас – робоча камера із прикріпленням до неї якорем, друга – статор із котушками та

обмотками третя – реактивна маса із масивними трубами завантажувальної та відвідної камер. До якоря та статора жорстко прикріплені деки-збурювачі кавітації 7 та 13 із рівномірно розташованими по всій їх площі отворами для протікання оброблюваної рідини. Пари прикріплених до якоря та статора дек розміщені симетрично на вході та виході робочої камери.

Для інтенсифікації збурення кавітаційних каверн при перетіканні крізь деки 7 та 13 оброблюваної рідини на отвори дек напесовано насадки-форсунки 16 із циліндричною зовнішньою α та сферичною внутрішньою β поверхнями (рис. 1.16в). Діаметр циліндричної поверхні $D = 2A$ та радіус сферичної внутрішньої поверхні $R = 2A$ рівні розмаху, тобто подвійному значенню амплітуди A коливань деки.

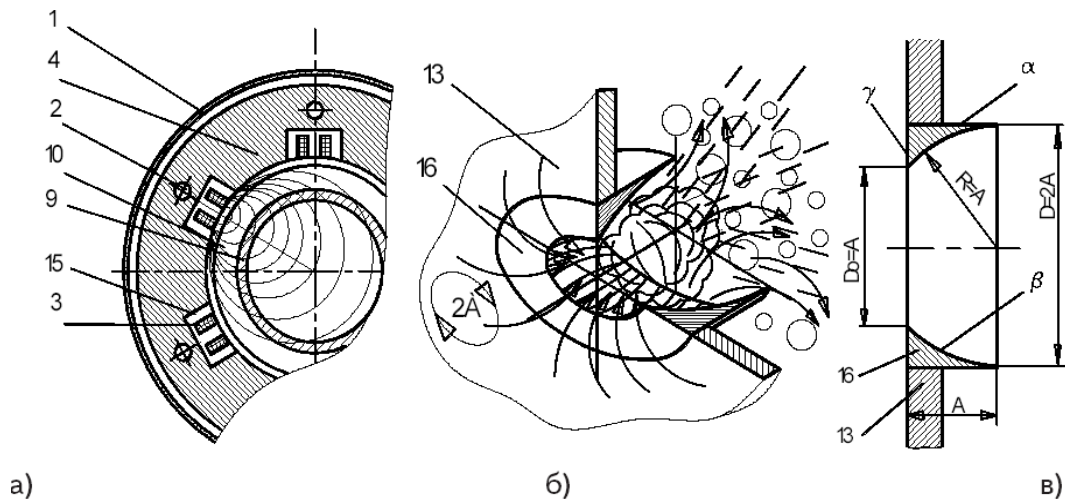


Рис. 1.16 – Схеми фізичних впливів на оброблювану рідину: а) магнітного поля; б) кавітаційного поля; в) співвідношення розмірів насадки-форсунки:

- 1 – корпус; 3 – обмотка; 4 – корпус статора; 9 – камера; 10 – якір;
11 – реактивна маса; 13 – дека; 16 – насадок

У перетині із торцевою площиною у насадки-форсунки 16 внутрішня сферична поверхня β утворює отвір для перетікання рідини, діаметр якого рівний $D_0 = A$. Цим отвором насадку 16 повернуто в сторону, протилежну напрямку потоку оброблюваної рідини. Віддаль між сусідніми отворами в деках рівна подвійному значенню розмаху коливань, тобто $k = 4A$. Від потрапляння

сторонніх предметів до коливних систем електромагнітний вібробудник захищено захисним кожухом 1.

Робота вібраційного електромагнітного пристрою для магнітно-кавітаційної обробки рідин здійснюється наступним чином. По трубі завантажувальної камери 6 в робочу камеру 9 під незначним тиском або саморухом подають оброблювану рідину. Одночасно на обмотки 3 котушок і електромагнітів послідовно за або проти годинникової стрілки подають напругу. Електромагніти, у цій же послідовності, по чергово притягують до себе різнонаповнену оброблюваною рідиною робочу камеру, прогинаючи при цьому назустріч одні одним пружні циліндричні стержні 2 та 5. Поряд з тим, направлена на коливання якоря 10 з деками 7 та 13 робота кожного із електромагнітів супроводжується формуванням їх статорами 3 з обмотками 4 змінних магнітних потоків із значним градієнтом індукції, як і складаючись між собою перетинають заповнену протічною оброблюваною рідиною робочу камеру (рис. 1.16,а), забезпечуючи тим самим невинну магнітну обробку рідини. При цьому, завдяки симетричному розташуванню дек – збурювачів кавітації протікаючи через них рідина двічі піддається кавітаційній обробці і одноразово магнітній.

Після дії неоднорідного магнітного поля на воду її молекули стають квазістабільними, що призводить до зниження енергії зв'язків між молекулами води. Внаслідок цього, оброблену магнітним полем воду можна розглядати, як дещо інший, незвичайний водорозчинник, хоча і з близькими фізико-хімічними властивостями.

Під впливом магнітного поля вода за здатністю до дисоціації наближається до апротонних розчинників. Такі зміни зумовлюють її подальший вплив на ті фізико-хімічні процеси, кінетика яких залежить від міцності водневих зв'язків води як розчинника та здатності до дисоціації як реагенту.

У багатьох галузях промисловості усе більш широке застосування знаходять вібраційні технологічні процеси кавітаційного впливу на рідинне середовище.

Основи теоретичних розрахунків та проектування вібраційних машин для кавітаційного впливу закладено відомими вченими Федоткін, І. С. Афтаназів, А. І. Гордєєв, Р. І. Сілін, , О. І. Некоз, В. та ін. Створено ряд вібраційних машин поршневого типу з ексцентриковим приводом для кавітаційної обробки води, з метою знезараження і зміни її властивостей [99-101], в яких вода піддається багаторазовому зворотно-поступальному проходженню (циклічної гідрокавітації) через отвір в поршні рис.1.17, або крізь отвір у камері пульсації рис. 1.18. Застосування такого приводу дає можливість здійснювати жорстке кероване вплив на процес виникнення кавітаційних порожнин з утворенням кавітаційних бульбашок шляхом підбору конструктивних параметрів машини і режимів роботи її приводу.

Відома конструкція вібраційної машини поршневого типу для знезаражування та зміни властивостей води [100], схема якої показано на рис. 1.17.

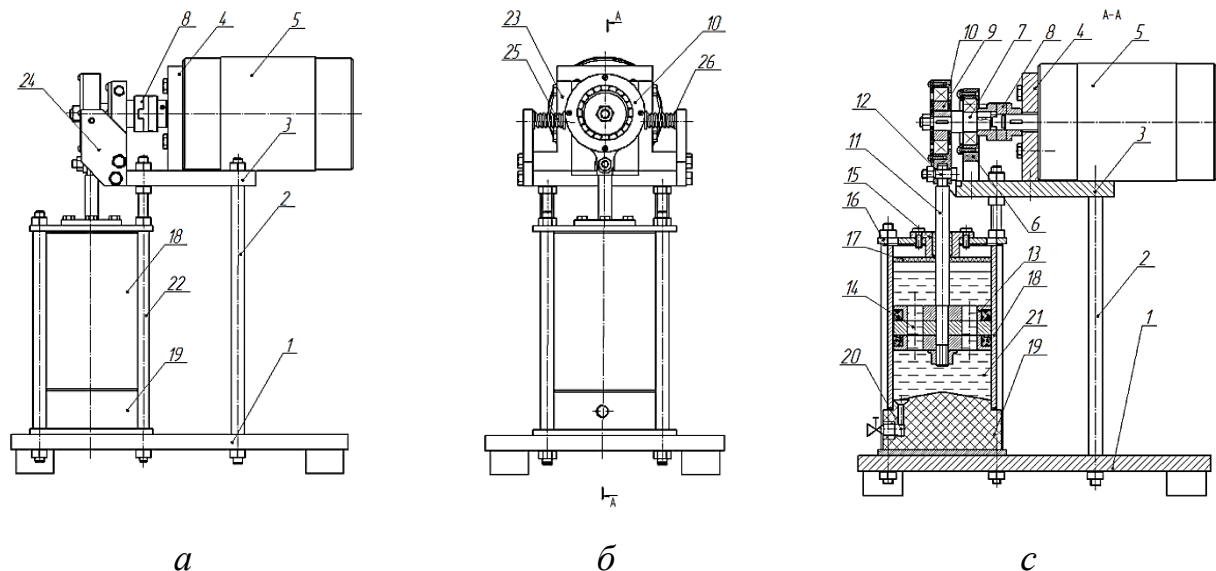


Рис. 1.17 – Схема вібраційної машини для знезаражування водних середовищ:

- 1– основа; 2 – стійки; 3 – плита; 4 – фланець; 5 – електродвигун;
 6 – підшипникова опора; 7 – вал; 8 – муфта; 9 – ексцентрик; 10 – корпус шатуна; 11 – шток; 12 – палець; 13 – поршень; 14 – отвір; 15 – корпус;
 16 – кришка; 17 – гумовий відбійник; 18 – циліндр; 19 – кришка; 20 – отвір;
 21 – кран; 22 – стійка; 23 – планка; 24 – щека; 25 – палець; 26 – пружина

Працює машина наступним чином: попередньо через відкритий кран та отвір 20 заливають в циліндр 18 водне середовище 21. Кран закривається. Після вмикання електродвигуна 5 ексцентрик 9 починає обертатися у підшипниковому корпусі шатуна 10 і приводить у зворотно-поступальний рух шток 11 та поршень 13, крізь отвори 14 з гострими крайками багаторазово проходить водне середовище 21. Для того, щоб водне середовище 21 не розбризкувалась, на штокові 11 встановлено гумовий відбійник 17. При проходженні водного середовища 21 крізь отвори 14 з гострими крайками у поршні 13 періодично утворюється кавітаційні порожнини, тобто, виникає гідрокавітація. При ході поршня 13 уверх створюється пониження тиску у нижній порожнині циліндра 18 і виникають кавітаційні пухирці, які при ході поршня 13 униз сплескуються і створюють кавітаційні ефекти: розрив та послаблення водневих зв'язків між молекулами та руйнування оболонки бактерій і вірусів.

Відома конструкція вібраційної машини мембранного типу для знезаражування та зміни властивостей води [101], схема якої показано на рис. 1.18.

Працює вібраційна машина наступним чином: попередньо через відкритий кран 30 та штуцера 21 заповнюють водою 34 ліві та праві камери пульсації 14 і ванни 20. Кран 30 прикривається для подачі води 34 з невеликим витокком. Після вмикання електродвигуна 3 ексцентрики починають обертатися у підшипникових корпусах 6, передаючи зворотно-поступальний рух: напрямним 9; штокам 17; мембранам 15 з дисками 16; дискам 27.

При ході мембран 15 з дисками 16 уверх в камерах пульсації 14 створюється миттєвий надлишковий тиск рідини і вона струменем, що кавітує, перетікає у ванни 20 з виникненням кавітаційних пухирців. Одночасно, під час руху штоків 17 з дисками 27, у отворах 28 також періодично утворюється кавітаційні порожнини, тобто виникає гідрокавітація.

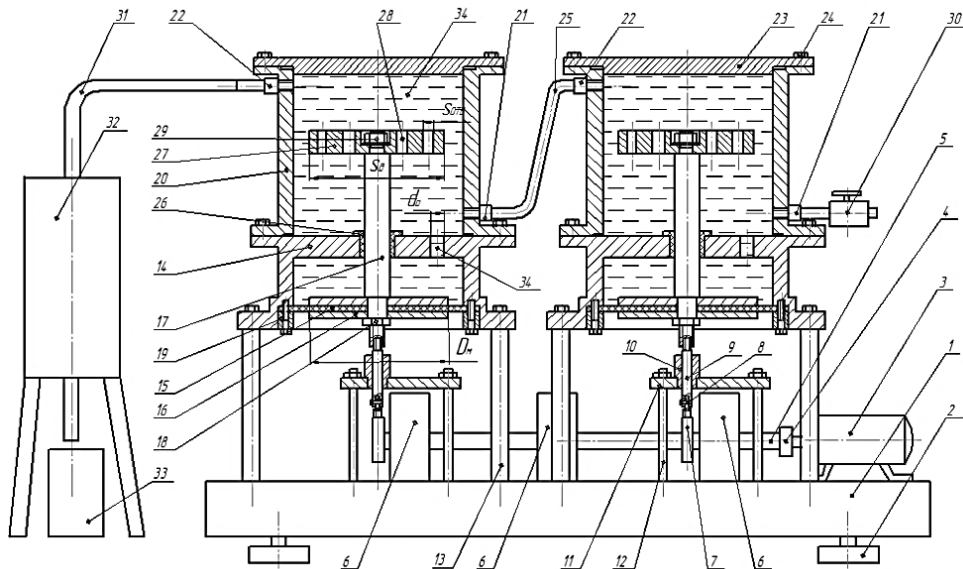


Рис. 1.18 – Схема вібраційної машини для знезаражування води та її очистки:

- 1 – основа; 2 – віброопора; 3 – електродвигун; 4 – муфта; 5 – вал; 6 – корпус;
 7 – корпус ексцентрика; 8 – вісь; 9 - напрямна; 10 – втулка; 11 – плита;
 12 – стійка; 13 – стійка; 14 – камера пульсації; 15 – гумова мембрана;
 16 – диск; 17 – шток; 18 – гайка; 19 – кільце; 20 – ванна; 21 – штуцер підводу
 води; 22 – штуцер відводу води; 23 – кришка; 24 – болт; 25 – трубопровід;
 26 – втулка; 27 – диск; 28 – отвір; 29 – гайка; 30 – впускний кран;
 31 – трубопровід; 32 – фільтр; 33 – ємність для збору води; 34 – вода

При ході мембран 15 з дисками 16 униз у камерах пульсації 14 створюється миттєве зниження тиску, виникають крізь отвори 24 зворотні струмені рідини 34, направлені у камеру пульсації 14 з виникненням кавітаційних пухирців, які потім, при ході мембран 15 з дисками 16 уверх, сплескуються і створюють кавітаційні ефекти: розрив та руйнування оболонок бактерій і вірусів, а також вібраційні коливання створюють гемолітичний розрив ковалентних зв'язків у молекулі води. Оброблена гідрокавітацією вода 34 з лівої ванни 20 через штуцер 22 та трубопровід 31 перетікає у фільтр 32, де проходить очищення та зливається у ємність 33.

Введення в конструкцію вібраційної машини для знезаражування води та очистки штока, на якому розташовано дискову мембрану та диск з отворами, дало можливість багатостадійної гідрокавітаційної обробки, а застосування двох кавітаційних колон збільшило час кавітаційного впливу, що дозволило підвищити ефективність процесу знезаражування та якості очистки води. Відсутність швидкооберткових вузлів та потреби їх ущільнення дозволяє підвищити надійність та довговічність машини.

1.5. Аналіз конструкцій вібраційного приводу машин

Для правильного вибору типу приводу стосовно конструкції машини, яка проектується та конкретних умов експлуатації необхідно керуватись основними динамічними характеристиками, а також експлуатаційними та конструктивними особливостями певного типу приводу (вібратора).

По роду збуджуючої сили всі конструктивні типи вібраторів діляться на чотири основних групи: інерційні, електромагнітні поршневі (пневматичні та гідравлічні) ексцентрикові, [52,53,102-107].

В інерційних вібраторах збуджуюче зусилля утворюється внаслідок обертання однієї або кількох неврівноважених мас [102,103]. Ця сила може бути такою, що обертається, тобто безперервно змінюючи свій напрямок, або «направленою». В вібраторах з направленою збуджуючою силою остання постійно діє в одному і тому ж напрямку і змінюється тільки по величині. Існують також спеціальні типи інерційних вібраторів, які утворюють збуджуючий обертовий момент або різні комбінації збуджуючих сил та обертових моментів.

До вібраторів зі збуджуючою силою, що обертається, відносяться вібратори типу «дебаланс», в яких збуджуюча сила утворюється однією неврівноваженою масою, що обертається (дебалансом), мотор - вібратори, які являють собою двигун (електричний, пневматичний та ін.) з неврівноваженим

ротором, а також вібратори для створення еліптичних та бігармонічно - еліптичних коливань.

Суттєвою перевагою інерційних вібраторів є можливість отримання великих збуджуючих зусиль при невеликих габаритах та вазі приводу. Внаслідок цього інерційні приводи доцільно використовувати в великих потужних вібраційних машинах невеликої довжини. Недоліком більшості конструкцій інерційних вібраторів є значний час пуску та вибігу.

До електромагнітних відносяться вібратори, в яких збуджуюча сила утворюється магнітним полем, що виникає при проходженні через обмотку вібратора змінного або пульсуючого струму [52,104,105]. По принципу дії ці вібратори поділяються на однокітні та двокітні. В однокітних вібраторах є один електромагніт, яким якір притягується в одну сторону, зворотний хід він робить тільки за рахунок пружності ресор. В двокітних вібраторах є два електромагніти, одним з яких якір притягується, а другим - відштовхується.

По своєму принциповому складу електромагнітні вібратори є найбільш досконалим приводом. Якщо в більшості типів приводу відбувається перетворення обертового руху двигуна в зворотно - поступальний рух вібратора, то в електромагнітних вібраторах необхідний зворотно - поступальний рух отримується безпосередньо без якихось інших механізмів [52,104,105]. Електромагнітні вібратори не мають вузлів, в яких би мали місце тертя ковзання або кочення, не мають підшипників, які сприймають великі динамічні навантаження. Вони допускають просте забезпечення синхронної роботи декількох приводів на одній машині.

Електромагнітні вібратори найбільш підходять для високочастотних машин, які працюють при невеликих амплітудах коливань. Недоліком цих вібраторів є висока чуттєвість до коливань напруги та навантаження, а також залежність зусилля тяги від повітряного зазору між котушками.

В поршневих вібраторах збуджуюча сила утворюється за рахунок енергії середовища, що знаходиться під тиском [53,106-108]. По виду енергії, що використовується, розрізняють пневматичні та гідравлічні поршневі вібратори.

В залежності від способу використання енергії, що підводиться, поршневі вібратори поділяються на вібратори з відкритим та з замкнутим циклами використання робочого середовища.

По принциповому складу та конструктивному виконанню розрізняють нерегульовані та регульовані гідравлічні вібратори. В перших частота та амплітуда коливань постійні, в других вони можуть змінюватись. Поршневі вібратори бувають з незалежним та з власним живленням.

Гідравлічні вібратори можуть створювати дуже великі збуджуючі зусилля при великих розмахах коливань, маючи при цьому дуже компактну конструкцію [53,106]. Це робить їх незамінними при створенні особливо потужних і в той же час малогабаритних машин, наприклад для застосування в умовах гірничої промисловості.

Пневматичні вібратори доцільно використовувати на високочастотних машинах [53]. Вони широко застосовуються в вибухонебезпечних умовах, спеціальні конструкції пневматичних вібраторів використовуються в шахтних вібраційних конвеєрах.

До ексцентриккових відносяться механічні вібратори, які перетворюють обертовий рух вала двигуна в коливальний рух шатуна, який зв'язаний з робочим органом вібраційної машини [102]. Сам по собі ексцентрикковий привід має визначений кінематичний характер руху шатуна і амплітуда коливань постійна і не змінюється зі зміною частоти коливань. Ексцентрикковий привід найбільш раціонально використовувати в низькочастотних вібраційних машинах, а також в установках з фіксованою амплітудою коливань [102,106]. Цей тип приводу здатен утворювати великі збуджуючі зусилля при невисоких частотах коливань рис.1.19, рис.1.20.

В залежності від принципової будови ексцентриккові приводи діляться на зрівноважені та незрівноважені, із пусковим маховиком і ексцентриситетом який збільшується у процесі пуску [102].

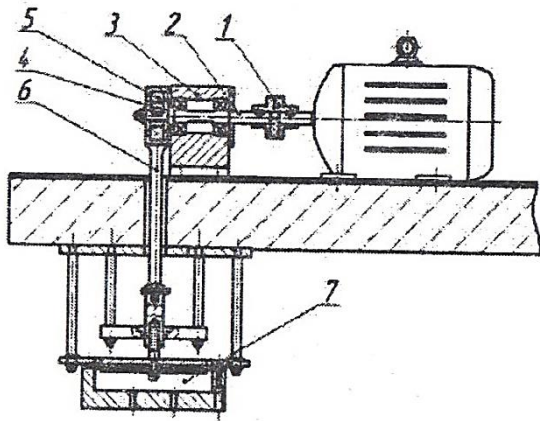


Рис. 1.19 – Конструкція
ексцентрикового віброприводу
консольного типу з жорстким шатуном:
1 – муфта; 2 – вал ексцентрика;
3 – корпус; 4 – ексцентрик;
5 – підшипник; 6 – шатун

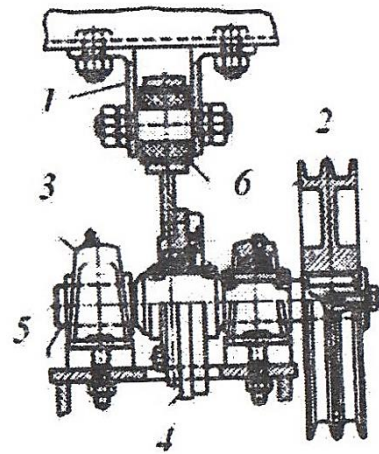


Рис 1.20 – Конструкція ексцентрикового
віброприводу двохопорного типу з
жорстким шатуном: 1 – робочий орган;
2 – шків; 3 – опора; 4 – шатун;
5 – ексцентриковий вал; 6 – гумова
втулка

Ексцентриковий привод для вібраційних машин по будові поділяється на привод з пружним шатуном, із приводним валом, що підпружинено, та з плаваючим кріпленням шатуна. Можливості здійснювання регулювання привода розрізняють приводи з регульованою та нерегульованою амплітудою коливань. Регульований привод у свою чергу поділяється на приводу регульований без зупинки машини, і привод, регульований у неробочому стані машини. По характеру регулювання розрізняння приводи з плавним і зі ступеневим регулюванням [102].

Висновки. Ціль і завдання досліджень

1. Проведений аналіз стану наукових досліджень застосування вібраційних технологій у процесах знезаражування та зміни властивостей води показав, що кавітаційна обробка рідин, має різноманітні технологічні можливості в біологічному знезаражуванні води і постає доцільність не лише у

поглибленому вивченні та дослідженнях технологічних можливостей кавітаційної обробки, а і у напрямі створення конструкцій вібраційних машин які реалізують її можливості, спроможних органічно поєднати ефективність способів збурення кавітації.

2. Проаналізовано модель фізико-хімічних процесів, що відбуваються в кавітаційній бульбашці і прилеглому до неї об'ємі рідини та встановлено, що у кавітаційну порожнину можуть проникати пари води, розчинені гази. В процесі сплескування бульбашки виділяється енергії достатньої для збудження, іонізації і дисоціації молекул води, газів.

3. Встановлено, особливістю кавітаційного методу обробки води полягає в тому, що високий ступінь знезараження води від яєць і личинок паразитів досягається за рахунок їх механічного руйнування ударними хвилями. Для руйнування бактерій і вірусів термобаричний вплив посилюється локальним електростатичним впливом, коли наведені електричні потенціали пробивають їх мембрани і оболонки.

4. При аналізі експериментальних досліджень кавітації в низькочастотних звукових полях була виявлена аналогія з фізико-хімічними ефектами між низькочастотній і ультразвуковій кавітації, а основними параметрами, які впливають на інтенсивність процесу є значення максимального тиску P_{max} в порожнині бульбашки та значення частотного характеру коливань рідини.

5. Аналіз сучасних конструкцій обладнання та машин для кавітаційного впливу на рідинне середовище показав переваги і недоліки різних конструкцій обладнання і вібраційних приводів. Найбільш ефективним приводом вібраційної машини визначено привод ексцентрикового типу, у якому встановлюється жорсткий зв'язок амплітуди коливань з частотою коливань. Застосування такого приводу дає можливість здійснювати жорсткий керований вплив на процес виникнення кавітаційних порожнин з утворенням кавітаційних бульбашок шляхом підбору конструктивних параметрів машини і режимів роботи приводу.

6. З аналізу літературних джерел встановлено, що вплив кавітації на водні розчини зводиться до єдиного процесу – розщепленню молекул води в кавітаційних бульбашках. Незалежно від природи розчинених речовин, кавітація діє на одну речовину – на воду, що призводить до зміни її фізико-хімічних властивостей: збільшення рН, електропровідності, числа вільних іонів і активних радикалів, структуризації і активації молекул.

7. Аналіз існуючих теоретичних досліджень процесу кавітації на основі поведінки одиничного кавітаційного пухирця у водних середовищах показав нелінійний характер проходження фізичних процесів, що ускладнює його аналітичне моделювання. Із аналізу теорій кавітації та диференціальних рівнянь, які описують кавітаційні процеси, було встановлено, що головними параметрами для визначення критерію гідродинамічної кавітації та її інтенсивності є швидкість потоку рідини, максимальний тиск у рідині при сплескуванні пухирця та частота коливань водного середовища.

8. Дослідження знезараження водних потоків залишається вагомим науково-технічним завданням, так і суспільною проблемою. Тому дослідження динаміки процесу знезараження з використанням кавітації при коливаннях рідини, створення нових конструкцій вібраційних машин, в яких рідина виступає як об'єкт, який піддається керованим вібраційним впливам, є актуальним завданням.

9. Переважна більшість літературних джерел демонструє ефективність застосування низькочастотних коливань для прискорення окиснення органічних сполук або позитивний вплив на руйнування мікроорганізмів. 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 вібраційних машин для кавітаційного знезараження і зміни властивостей води з визначенням його конструктивних параметрів і режимів роботи приводу.

Досягнення сформованої мети передбачає вирішення таких завдань:

- розробити фізичну модель вібраційної машини поршневого типу, що відображає прояв механічного впливу на рідинне середовище;
- побудувати математичну модель руху робочого середовища у вібраційній машині поршневого типу з метою визначення зміни максимального тиску у камері пульсації від режимів роботи привода;
- сформуванати методику проведення експериментальних досліджень динамічних параметрів роботи вібраційного приводу машини та визначення співвідношень її конструктивних параметрів;
- за допомогою відеофіксації дослідити формування кавітаційних процесів у камері пульсації та стійкість функціонування кавітаційних полів у рідинних субстанціях низькочастотними вібраціями;
- дослідити взаємозв'язок технологічних та конструктивних параметрів робочого органу із параметрами приводу вібраційної машини поршневого типу;
- на основі кінематичного та динамічного аналізу роботи приводу визначити параметри пружної системи вібраційної машини поршневого типу;
- провести експериментальні дослідження працездатності вібраційної машини для знезаражування і зміни властивостей води;
- сформуванати прикладну методологію проектування та розрахунку вібраційної машини поршневого типу для кавітаційного знезаражування і зміни властивостей води та практичні рекомендації розробнику;
- розробити перспективні схеми та конструкції вібраційних машин для кавітаційного знезаражування і зміни властивостей води за умовами енергозбереження.
- розробити рекомендації та передати на виробництво експериментально-промислові моделі вібраційних машин для зміни властивостей, складу та знезараження водного середовища.

РОЗДІЛ 2

МЕТОДОЛОГІЯ ДОСЛІДЖЕНЬ, ПРИЛАДИ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ЗНЕЗАРАЖУВАННЯ ТА ЗМІНИ ВЛАСТИВОСТЕЙ ВОДИ

2.1. Опис конструкції та роботи експериментальної вібраційної машини для знезаражування та зміни властивостей води

На рис.2.1 показано загальний вид та просторова модель вібраційної машини, у якої вода піддається багаторазовому зворотно-поступальному проходженню (циклічній гідрокавітації) через отвір у поршні. Конструкція вібраційної машини поршневого типу має ексцентриковий привод. Застосування такого приводу дає можливість здійснювати жорсткий керований вплив на процес виникнення кавітаційних порожнин з утворенням кавітаційних пухирців шляхом підбору конструктивних параметрів обладнання та режимів його роботи (пат. на корисну модель №126495) [100].

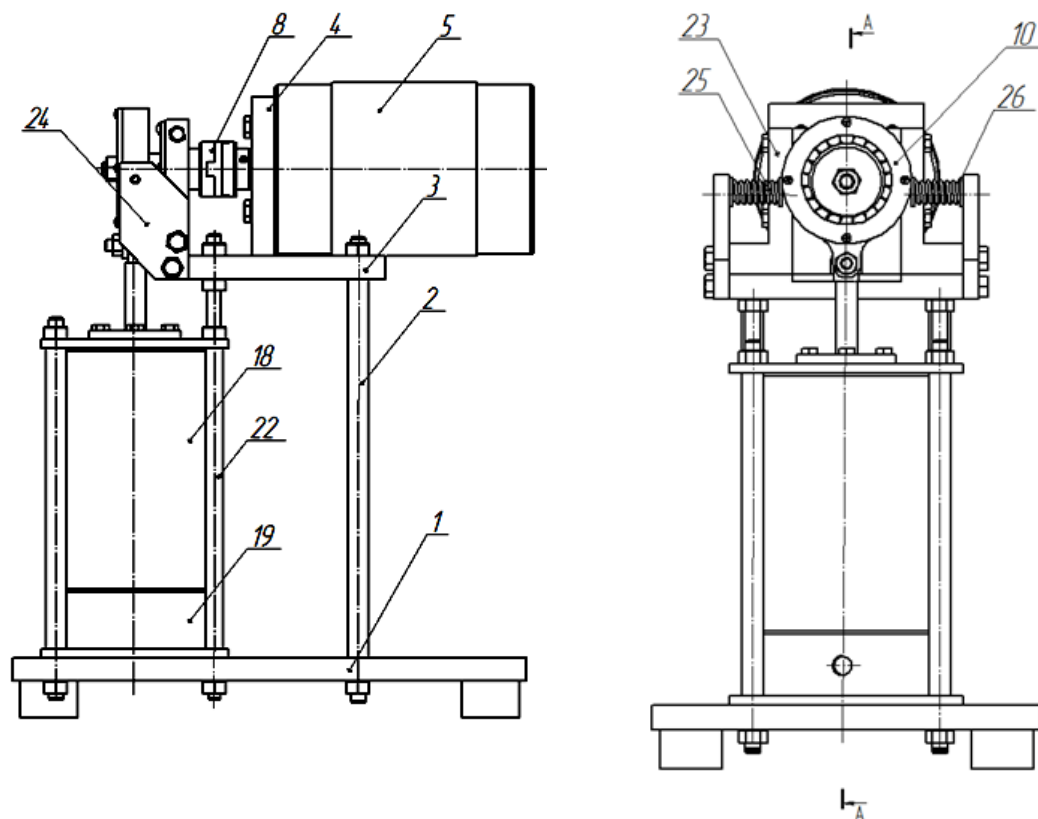


Рис. 2.1 – Загальний вид вібраційної машини

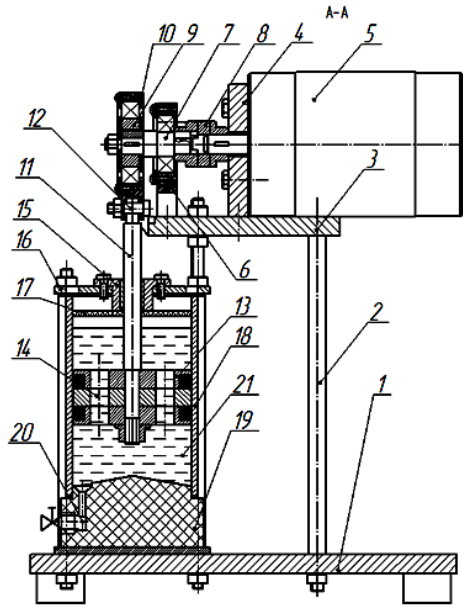


Рис. 2.2 – Перетин А-А (до рис. 2.1)

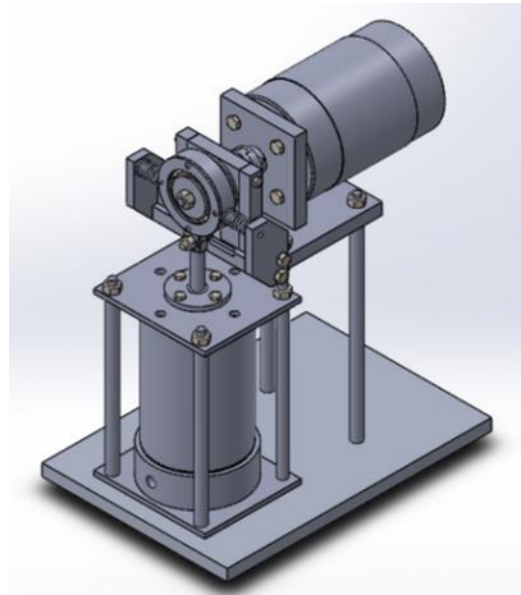


Рис.2.3 – Просторова 3D-модель вібраційної машини

Вібраційна машина для зміни властивостей та знезаражування водних середовищ (рис.2.1-рис.2.3) складається із корпусу 1, на якому на стійках 2 встановлено плиту 3. На фланці 4 встановлено електродвигун 5, а також підшипникову опору 6, в якій знаходиться вал 7, з'єднаний з електродвигуном 5 муфтою 8. На валу 7 встановлено ексцентрик 9 у підшипниковому корпусі шатуна 10, який з'єднаний із штоком 11 пальцем 12. На штокові 11 встановлено поршень 13 з отворами 14, які мають гострі краї. З'єднання шток-втулка, яка знаходиться в корпусі 15, що закріплений на кришці 16, забезпечує можливість зворотно-поступального руху штока. На штокові 11 також встановлено гумовий відбійник 17. Поршень 13 входить у циліндр 18, який знизу закритий кришкою 19, що має отвір 20 під кран для заливання водного середовища 21. Циліндр 18 кріпиться стійками 22 до корпусу 1. До підшипникової опори 6 болтами приєднана планка 23, до якої і водночас до плити 3 з допомогою болтів прикріплені два упори 24. Між упорами 24 та підшипниковим корпусом шатуна 10 на пальцях 25 встановлені дві пружини 26. Просторова 3D-модель вібраційної машини для знезаражування водних середовищ з ексцентриковим приводом представлена на рис.2.3. Зміна амплітуди коливань машини відбувається при зміні кулачків з ексцентриситетом 0,5; 1,0; 2,0 мм. Зміна частоти від 0 Гц до 25 Гц відбувається при зміні напруги на електродвигуні регульованим трансформатором.

2.2. Методика досліджень та опис експериментального обладнання для відео-фіксації процесу виникнення кавітаційних процесів у камері пульсації вібраційної машини

З метою з'ясування характеру процесів протікання робочого тіла (вода при 20°C) при зворотно-поступальному русі через отвір (звуження потоку рідини) було розроблено прозорий макет, на якому можливо реалізувати необхідні режими. Рух рідини фіксувався цифровою відеокамерою з подальшою обробкою і перетворенням інформації у комп'ютерний файл. На рис. 2.4 показана експериментальна установка для проведення швидкісної відеозйомки та фотографування картини руху робочого тіла.

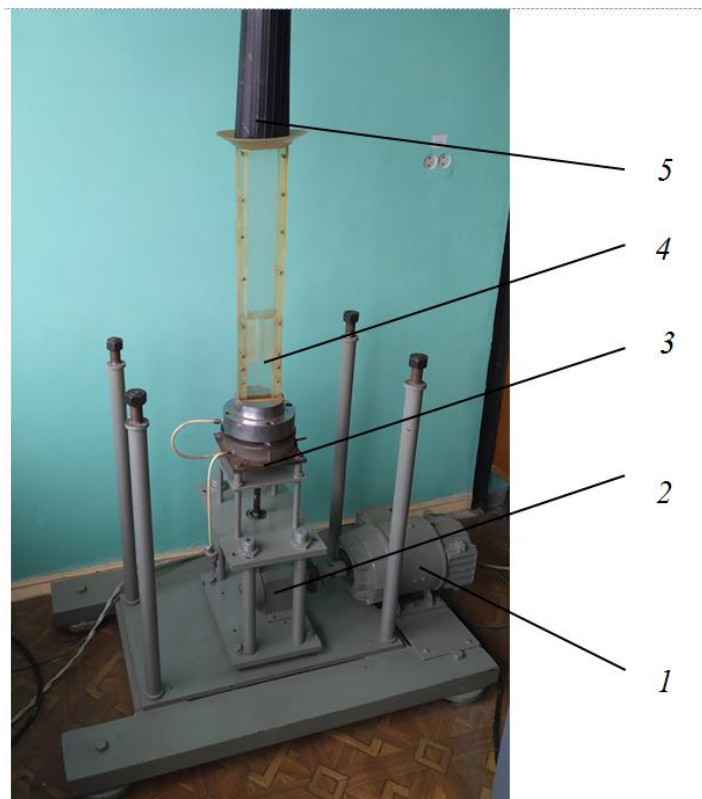


Рис. 2.4 – Установка візуалізації формування кавітаційних процесів рідини у камері пульсації: 1 – вібраційний привод; 2 – електродвигун постійного струму; 3 – камера пульсації; 4 – прозорий канал; 5 – ємкість гасіння коливань рідини

Зйомка проводилась при наступних умовах: діаметр насадка 10 мм, відношення діаметра камери D до діаметра насадка d $D/d = 10$, амплітуда коливань $A = 2$ мм, частоту коливань f збільшували поступово від нуля до 20 Гц та потім зменшували до нуля. Також за допомогою цифрового фотоапарата проводилось фотографування прозорої зони камери пульсації робочого тіла.

2.3. Методика досліджень та опис експериментальної установки для визначення максимального тиску у камері пульсації вібраційної машини для знезаражування та зміни властивостей води

У робочому органі вібраційної машини проходять такі процеси: при ході поршня вгору в камері пульсації тиск знижується нижче атмосферного і через отвір в поршні вода втягується в камеру пульсації зі швидкістю, яка залежить від частоти коливання поршня. Із збільшенням частоти коливань, а відповідно і швидкості протікання через отвір, відбувається звуження потоку рідини в отворі і виникає кавітаційна каверна на початку отвору, заповнена бульбашками з газом і частково паром, які зриваючись з кавітаційної каверни, потрапляють в камеру пульсації.

Слід зазначити, що при збільшенні частоти коливань втягування рідини в камеру пульсації, відбувається лавинний зріст обсягу кавітаційних бульбашок в отворі поршня, внаслідок чого в камеру пульсації потрапляє менший об'єм води через збільшуються в обсязі парогазових бульбашок.

При ході поршня вниз в камері пульсації тиск зростає вище атмосферного і кавітаційні бульбашки сплескуються, зменшуючи обсяг виштовхується рідини через отвір, що веде до зменшення циркуляції рідини через отвір і призводить до зниження продуктивності обробки рідини.

Виходячи з того, що ступінь знезараження залежить від величини максимального тиску в рідині, одержуваного в робочому органі вібраційної машини при ході поршня вниз (збільшення максимального тиску щодо

атмосферного) і максимального тиску при ході поршня вгору (зниження максимального тиску щодо атмосферного).

Оптимальна продуктивність процесу знезараження досягається при найбільшому тиску в камері пульсації при ході поршня вниз і максимальному тиску рідини виділення з отвору. Тому в якості критерію продуктивності роботи приводу вібраційної машини було прийнято зміна величини максимального тиску в камері пульсації з урахуванням найбільшого тиску струменя на виході з отвору в поршні при ході його вниз. Експериментальна установка [109] показана на рис.2.5.

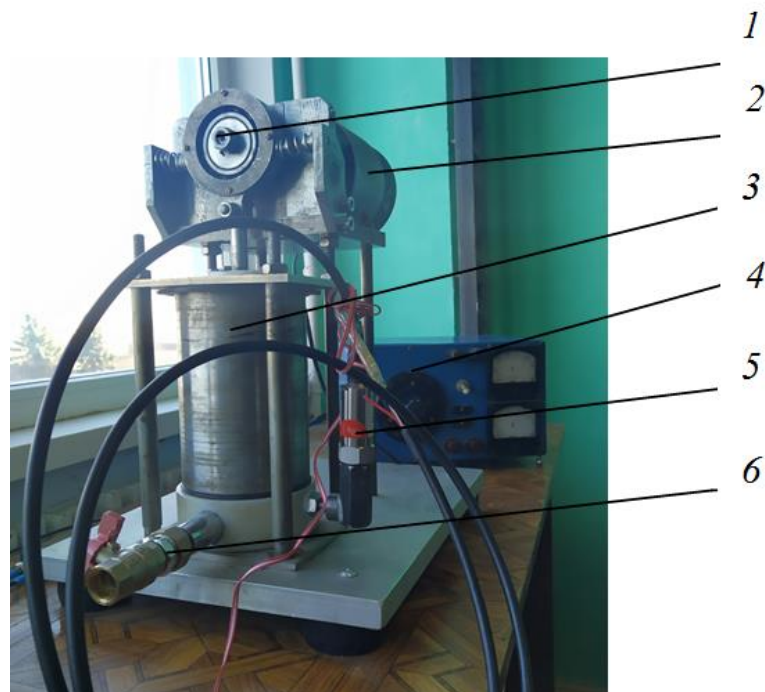


Рис. 2.5 – Фотографія експериментальної установки для вимірювання миттєвого максимального тиску у камері пульсації вібраційної машини: 1 – ексцентрик; 2 – електродвигун постійного струму; 3 – ємкість із камерою пульсації; 4 – пульт керування обертів електродвигуна; 5 – датчик тиску МРМ489; 6 – кран для зливу рідини, що оброблена

Для вимірювання миттєвого значення гідродинамічного тиску в камері пульсації застосовано п'єзорезистивний датчик тиску МРМ489 (рис.2.6,*a*) і USB

осцилограф VM8020 (рис.2.6,б), який з'єднаний з персональним комп'ютером через порт USB і обслуговується програмним продуктом «DiSco».



а



б

Рис. 2.6 – Апаратура для реєстрації миттєвого значення гідродинамічного тиску у камері пульсації: *а* – датчик тиску MPM489; *б* – USB осцилограф VM8020

MPM489 – п'єзорезистивний датчик тиску увібрав в себе багаторічний досвід науково-дослідних робіт, заснований на передових технологіях.

У п'єзорезистивному датчику тиску мембрана виготовлена із сталі 316L, разом з електронікою перетворювача розташовано в корпусі з нержавіючої сталі.

Даний перетворювач автоматично тестує стан сенсора, компенсує температурний вплив навколишнього середовища в широкому діапазоні і видає стандартний вихідний сигнал.

Датчик тиску попередньо було протаровано за допомогою компресора та фіксацією результатів за допомогою електронного осцилографа. Стенд тарування датчика MPM489 показано на рис. 2.7 [109].

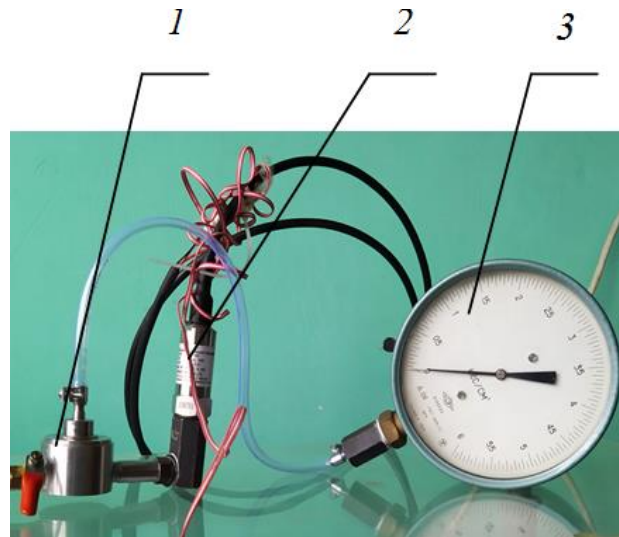


Рис. 2.7 – Фотографія експериментального стенду для проведення тарування датчика тиску МРМ489: 1 – пневматичний редуктор; 2 – датчик; 3 - манометр

Результатом дослідження були отримані осцилограми рис.2.8 та чисельні значення зміни максимального тиску у камері пульсації вібраційної машини поршневого типу від частоти коливань, як при ході поршня уверх (втягування рідини у камеру пульсації) так і при ході поршня униз (стиснення рідини) [109].

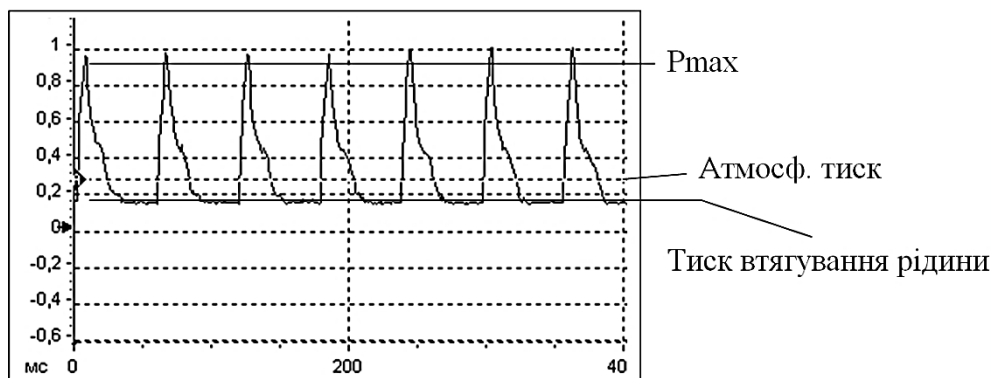


Рис. 2.8 – Вигляд скріншоту з монітору комп'ютера осцилограми зміни максимального тиску у камері пульсації вібраційної машини поршневого типу за цикл коливання при певній частоті коливань

Дослідження проводились наступним чином. Вмикався привод вібраційної машини та виводився на певну частоту – проводилась фіксація осцилограми. Потім проводилась обробка згідно тарувального графіка.

Дослідження проводились при наступних постійних та змінних параметрах: діаметр камери пульсації 100 мм, діаметр отвору 6 мм, амплітуда коливань змінювалася: 1,2,3 мм; частота коливань змінювалася: 5,10,15,20,25 Гц. Вимірювання тиску проводились з одним та двома отворами 6 мм. Осцилограми зміни миттєвого тиску у камері пульсації наведені у додатку С.

2.4. Методика досліджень та опис експериментальної установки для визначення тиску пульсуючого струменю з отвору у поршні вібраційної машини для знезаражування та зміни властивостей води

З метою отримання максимальної продуктивності процесу та оцінювання швидкості перемішування рідини у ємкості вібраційної машини було досліджено зміну величини максимального тиску на початковій ділянці пульсуючого струменя від частоти коливань на виток, який за один цикл коливання, здійснюється з камери пульсації крізь отвір у поршні. Чим більше максимальний тиск струменя тим більше виток та швидкість перемішування води, що оброблюється у ємкості вібраційної машини.

На рис.2.8 показано схему експериментальної установки з встановленим мембранним датчиком на зрізі отвору [110].

Для вимірювання миттєвого значення гідродинамічного тиску у струмені з отвору застосовано тензометричний датчик тиску, підсилювач 8 АНЧ – 7М і USB осцилограф ВМ8020, який з'єднаний з персональним комп'ютером через порт USB і обслуговується програмним продуктом «DiSco».

Дослідження проводились наступним чином. Вмикався привод вібраційної машини та виводився на певну частоту – проводилась фіксація осцилограми. Потім проводилась обробка згідно тарувального графіка. Дослідження проводились при наступних постійних та змінних параметрах: діаметр камери пульсації 100 мм; діаметр отвору змінювався: 6,10 мм; амплітуда коливань змінювалася: 1,2,3 мм; частота коливань змінювалася: 5,10,15,20,25 Гц.

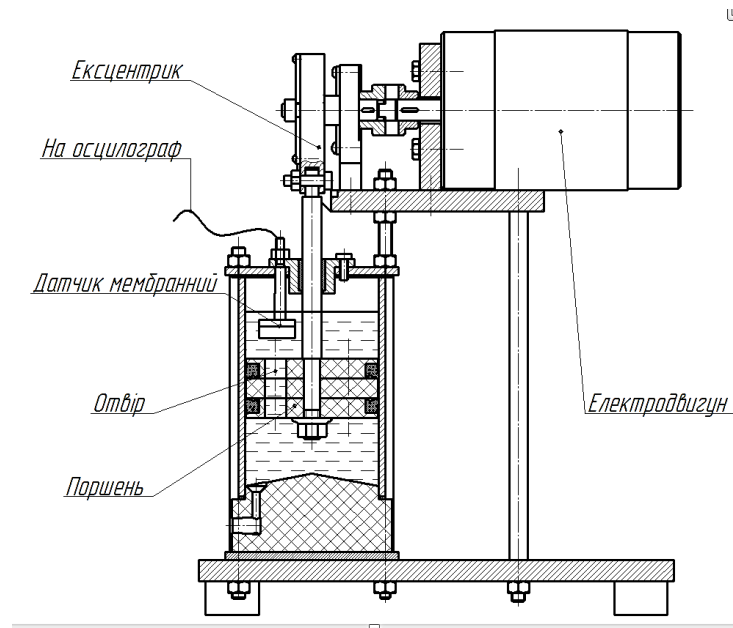


Рис. 2.9 – Схема експериментальної установки для проведення вимірювань миттєвого тиску струменя з отвору у поршні

2.5. Прилади та методика вимірювання зміни параметрів водного середовища

Для вимірювання параметрів води, а саме: 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. 2.9.



Рис. 2.10 – Загальний вигляд вимірювальних приладів: *a* – рН Meter; *б* – ORP TESTER; *в* – TDS-3

Основні характеристики приладів:

прилад рН Meter (див. рис. 2.10,а). Призначено для вимірювання рівня рН – концентрації вільних іонів водню у воді. Діапазон вимірювань від 0,00 рН до 14 рН. Розрешення 0,01 рН. Похибка $\pm 0,1$ рН. Робочій діапазон від 0°C до 50°C;

прилад ORP TESTER 169В (див. рис. 2.10,б). Призначено для вимірювання окислювального-відновлювального потенціалу. Діапазон вимірювань від 0 до ± 1999 мВ. Розрешення 1 мВ. Похибка ± 5 мВ. Робочій діапазон від 0°C до 50°C. Чим нижче показник тим менше потреба насичення води киснем.

прилад TDS-3 (див. рис. 2.10,в). Призначено для вимірювання рівня загальної мінералізації (солевмісту). Діапазон вимірювань від 0 до 9990 мг/л. Похибка ± 2 %. Робочій діапазон від 0°C до 80°C. Згідно величини показника 400 одиниць рахується, що вода придатна для споживання. Нижче цієї величини вода має покращені властивості.

Вимірювання параметрів водного середовища проводилось до і після оброблення у вібраційній машині відбором зразків води об'ємом 100 мл та занурення електродів приладів у воду з фіксацією показників на електронному табло.

2.6. Методика та спосіб фіксації зміни властивостей водних потоків після оброблення у вібраційній машині для знезаражування та зміни властивостей води

Дослідження [7,10,35] показали, що вода є відкритою, динамічною, структурно складною системою, у якій стаціонарний стан легко порушується при будь-якому зовнішньому впливі.

Також, велике значення має зміна коефіцієнту поверхневого натягу води, який можна кількісно оцінити по величині зміни водневого показника рН та

якісно по виду і розмірам кристалічних структур. Гідрокавітація здатна знижувати коефіцієнт поверхневого натягу рідини.

Відомі способи кріоскопічної кристалографії води для аналізу її структурної будови [111,112], але вони потребують особливих температурних вимог по проведенню досліджень. Було розроблено та реалізовано новий спосіб кристалооптичного аналізу структурної будови води, який простий по реалізації та не потребує особливих умов для його проведення [113] (пат. на корисну модель №128630).

Сутністю способу кристалооптичного аналізу структурної будови води та ступеню її активації і забруднення біологічними рештками є аналіз вигляду та розташування, розмірів та форма елементів структурних утворень осаду і кількість біологічних решток на одиницю площі висушеної краплі води, утвореної після незалежного способу активації води. Однією з основних умов кристалізації є пересичений стан розчину який виникає при висушуванні. У результаті фазових перетворень утворюються центри кристалізації, на яких і відбувається виділення речовини, що кристалізується. Таким чином, кінетика кристалізації визначається наступними умовами: пересиченням, виникненням мікрозародків (первинних аморфних часток), їхнім ростом і, нарешті, утворенням центрів кристалізації. У результаті взаємодії двох молекул (іонів) виникають дрібні структурні утворення, які поєднуються із третьою молекулою (іоном) і т.п. Спочатку можуть утворюватися короткі ланцюги або плоскі мономолекулярні шари. У цих умовах сили відштовхування молекул (іонів) друг від друга виявляються менше сил їхнього взаємного притягання й рівнодіюча цих сил приводить до агломерації даних молекул (іонів), до утворення ними елементів кристалічної ґратки, тобто до виникнення кристалічного зародка, що є елементарною часткою твердої фази.

Спосіб реалізується за методикою згідно схеми рис.2.11, сутність якої пояснюється креслеником, на якому зображено послідовність проведення аналізу структурної будови води та ступеню її активації і біологічного забруднення. Спосіб кристалооптичного аналізу структурної будови води та

ступеню її активації і забруднення біологічними рештками було застосовано для аналізу проб води, взятих з різних джерел, у вихідному та активованих станах.

Спосіб реалізується таким чином. Вода оброблювалася в обладнанні 1 за допомогою кавітаційного впливу. Після оброблення кавітацією протягом 20 хвилин відбиралася проба 2 (100 мл) та визначався водневий показник рН.

Проводилося нанесення на чисте знежирене предметне скло 3 краплі досліджуваної води та висушування її при кімнатній температурі до отримання осаду. Далі предметне скло з осадом від краплі води розташовувалось на столику мікроскопу 4 (МБС-10) і структурні утворення осаду підлягали розгляду та аналізу під мікроскопом з фіксацією на відеокамеру 5 з подальшою передачею на персональний комп'ютер 6 із створенням електронного файлу у вигляді мікрофотографії цифрового зображення.

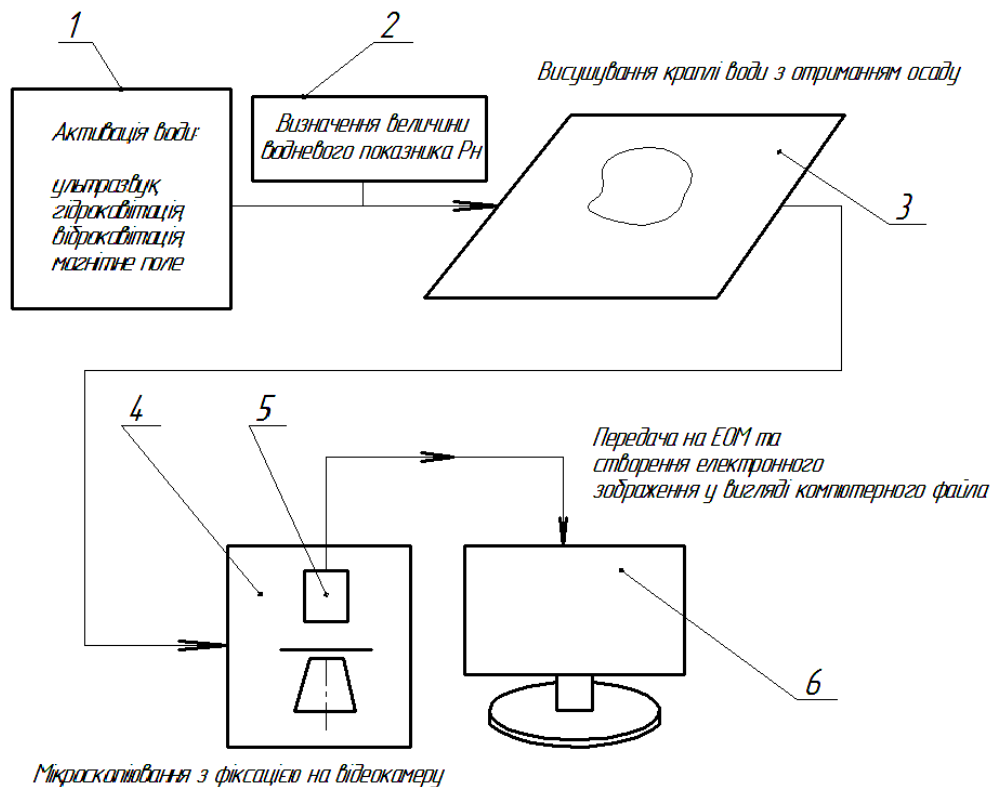


Рис.2.11 – Загальна схема методики проведення аналізу структурної будови води та ступеню її активації і біологічного забруднення

Перевагою способу кристалооптичного аналізу структурної будови води та ступеню її активації і забруднення біологічними рештками води є і його чутливість та значна чіткість відтворення результатів технологічних фізичних впливів на воду із метою її активації. Як показують експериментальні дослідження запропонованого способу можна якісно і кількісно проаналізувати структурну будову води та ступінь її активації, величину біологічного забруднення і наближення її по властивостям та характеристикам до більш якісної води до вживання. Запропонований спосіб кристалографічного аналізу структурної будови води та ступеню її активації і забруднення біологічними рештками може використовуватись для оптимізації технологічних параметрів процесів активації води на етапах її водопідготовки та водоочищення, для лабораторних аналізів структурної будови питної та побутової води, технологічної води для консервування та переробки харчових продуктів, води для відгодовування тварин та птиці.

2.7. Методика визначення ступеня знезаражування водних потоків після кавітаційного оброблення

Для визначення працездатності вібраційної машини по знезаражуванню води проведені дослідження впливу часу гідродинамічної кавітаційної обробки річкової води на зміну її бактеріального складу. Обробка води кавітацією у вібраційній машині проводилась протягом 10; 20 хвилин та згідно з ГОСТ 18963-73 (Методы санитарно-бактериологического анализа) були проведено нанесення води на споживче середовище. Сутність методу полягає у визначенні загального вмісту мезофільних, мезотрофних аеробів і факультативних анаеробів, здатних зростати на споживчому агарі при температурі $(37 \pm 0,5)^\circ\text{C}$ протягом (24 ± 2) годин, утворюючи колонії. Після завершення росту колоній була визначена їх кількість та проведено фотографування контрольного зразка та зразків оброблених гідрокавітацією за певний час.

2.8. Обробка експериментальних даних та оцінка точності отриманих результатів

Для зменшення випадкових помилок проводили контрольні вимірювання, а для видалення систематичних помилок усі вимірювальні прилади були повірені та протаровані. Основні досліди проводились як однофакторні, тобто змінювався один фактор при сталості всіх інших. Кількість основних дослідів вибиралося не менше п'яти згідно з рекомендаціями [114-117], а місця перегину кривих досліджувалась додатково п'ятьма дослідями.

Обробка результатів експериментів проводилась із застосуванням методів математичних статистики. Визначалось середнє арифметичне значення вимірювань:

$$\bar{X} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i, \quad (2.1)$$

де N – кількість вимірювань;

x_i – значення величини яка вимірюється в i - дослідженні.

Абсолютна похибка вимірювання визначалися за формулою:

$$\Delta X_i = X_i - \bar{X}. \quad (2.2)$$

Середнє значення відхилення змінної:

$$\delta = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N \Delta X_i^2}{N-1}}. \quad (2.3)$$

Величина стандартного відхилення середнього значення:

$$\delta_m = \frac{\delta}{N}. \quad (2.4)$$

Графічні залежності будували за середнім значенням відповідних серій досліджень.

РОЗДІЛ 3

АНАЛІТИЧНЕ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ВІБРАЦІЙНОЇ МАШИНИ ДЛЯ ЗНЕЗАРАЖУВАННЯ ТА ЗМІНИ ВЛАСТИВОСТЕЙ ВОДИ

3.1. Аналітична модель коливального руху робочого середовища у робочому органі вібраційної машини поршневого типу

Запропоновано конструкцію вібраційної машини поршневого типу з ексцентриковим приводом для знезаражування та зміни властивостей води [99], у якій для створення кавітаційного процесу використовується зворотно-поступальний рух рідини через отвір у поршні із гострими крайками на вході та виході. При цьому при коливаннях з отвору у поршні отримується пульсуючий струмінь рідини.

Застосування такого приводу дає можливість здійснювати жорсткий керований вплив на процес виникнення кавітаційних порожнин з утворенням кавітаційних пухирців шляхом підбору конструктивних параметрів обладнання та режимів його роботи [100].

Знезаражуюча дія кавітації заснована на ефектах, які виникають у турбулентних потоках рідини. Так при гідродинамічних коливаннях рідини тиск у рідині змінюється різнонаправлено: зростає або падає нижче атмосферного, виникають і зникають кавітаційні пухирці. При цьому стимулюються фазові переходи, підвищуються локальні температура і тиск.

Із аналізу диференціальних рівнянь (розділ 1) було встановлено, що головними параметрами для визначення критерію гідродинамічної кавітації є швидкість потоку рідини, максимальний тиск у рідині, при сплескуванні пухирця, та частота коливань водного середовища.

Для визначення максимального тиску при сплескуванні кавітаційних бульбашок від конструктивних параметрів вібраційної машини та режимів роботи приводу була побудована аналітична модель руху робочого середовища

у робочому органі – камері пульсації з отвором у поршні та розроблена її принципова схема, яка представлена на рис.3.1.

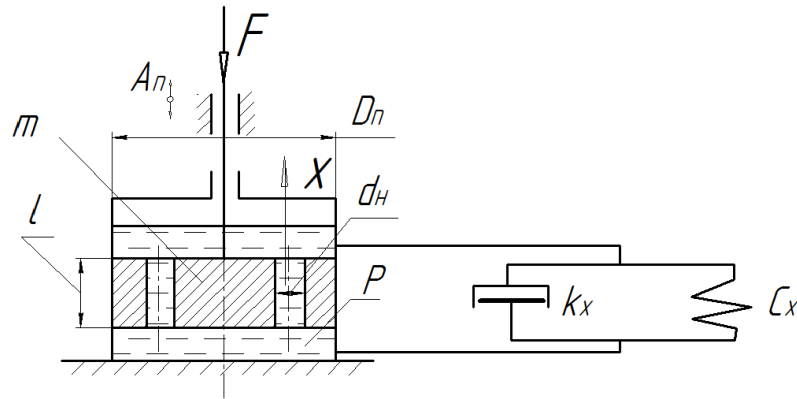


Рис.3.1 – Принципова схема робочого органу вібраційної машини

Для дослідження динаміки роботи вібраційної машини і аналізу впливу режимів роботи приводу та конструктивних параметрів на ефективність процесу знезаражування і зміну властивостей води з проведених аналітичних досліджень [109,118-120] запропоновано наступну систему диференціальних рівнянь:

$$\begin{cases} 2 \cdot A_n dS_n = \varepsilon A_o dS_o; \\ m\ddot{x} + k_x \dot{x} + c_x x = F \sin \omega t, \end{cases} \quad (3.1)$$

де $F = \frac{\pi \cdot D_n^2 \cdot P_{\max}}{4}$ – сила, що діє на шток робочого органу;

m – маса рідини, яка отримує коливальний рух;

D_n – діаметр поршня;

S_o – площа отвору насадка;

S_n – площа поршня;

A_n – амплітуда коливання поршня;

A_o – амплітуда коливання рідини в отворі;

P_{\max} – максимальний тиск у камері пульсації;

C_x – жорсткість пружного середовища рідини з пухирцями з урахуванням пружності стінок циліндра.

k_x – коефіцієнт демпфування;

ε – коефіцієнт, який враховує звуження потоку рідини в отворі, $\varepsilon = 0,4$.
[121].

При аналізі динамічної моделі використано наступні припущення при руху поршня униз (етап сплескування бульбашок): при руху рідини крізь отвір діє закон нерозривності рідини, температура води 20°C , ураховується кількість вмісту розчиненого повітря. Не враховується додаткове зростання максимального тиску з ростом швидкості потоку у насадку з появою гідродару.

В аналітичних дослідженнях будемо визначати зміну максимального тиску P_{max} у камері пульсації при ході поршня униз при куті повороту $\varphi = 0,25\pi$.

Як вказувалося раніше, основним критерієм ефективності процесу знезаражування і зміни властивостей рідини є величина максимального тиску у рідини при коливаннях робочого органу, тому необхідно визначити вплив на максимальний тиск рідини P_{max} у камері пульсації наступних параметрів вібраційної машини: f – частоти коливань віброприводу; A_n – амплітуди коливань поршня; розмірів: D_n – діаметра поршня; d_n – діаметра насадка.

З першого рівняння системи (3.1) – згідно закону нерозривності рідини можна записати наступну залежність:

$$x = A_n = \frac{2 \cdot D_n^2 \cdot A_n}{\varepsilon \cdot d_n^2}, \quad (3.2)$$

де A_n – амплітуда коливань рідини у насадку;

A_n – амплітуда коливань поршня в камері пульсації;

D_n – діаметр поршня;

d_n – діаметр насадка;

ξ – коефіцієнт урахування звуження потоку рідини у насадку.

Тоді швидкість рідини у насадку визначається наступною залежністю:

$$\dot{x} = \frac{2 \cdot D_n^2 \cdot A_n \cdot f}{\varepsilon \cdot d_n^2}, \quad (3.3)$$

де f – частота коливань віброприводу.

Прискорення рідини у насадку визначається наступною залежністю:

$$\ddot{x} = \frac{2 \cdot D_n^2 \cdot A_n \cdot f^2}{\varepsilon \cdot d_n^2}. \quad (3.4)$$

Тоді друге рівняння (1) можна записати у наступному вигляді:

$$m \frac{2 \cdot D_n^2 \cdot A_n}{\varepsilon \cdot d_n^2} f^2 + k \frac{2 \cdot D_n^2 \cdot A_n}{\varepsilon \cdot d_n^2} f + c \frac{2 \cdot D_n^2 \cdot A_n}{\varepsilon \cdot d_n^2} = \frac{\pi \cdot D_n^2}{4} P_{\max} \quad (3.5)$$

Отримане рівняння (3.5) є окремим випадком рішення системи (3.1), в якому розглядається рух поршня вниз при дії максимальної сили F приводу за цикл коливання. Під час ходу поршня вниз сила на штоку, за час циклу коливань, змінюється від нуля до максимального значення і відповідно створює максимальний тиск рідини в камері пульсації.

Провівши перетворення, отримаємо наступне рівняння для визначення максимального тиску рідини у камері пульсації [118-120] :

$$m \frac{8 \cdot A_n}{\pi \cdot \varepsilon \cdot d_n^2} f^2 + k \frac{8 \cdot A_n}{\pi \cdot \varepsilon \cdot d_n^2} f + c \frac{8 \cdot A_n}{\pi \cdot \varepsilon \cdot d_n^2} = P_{\max} \quad (3.6)$$

Демпфуючу здатність поршня з отворами k_x та жорсткість пружного середовища рідини з пухирцями з урахуванням пружності циліндра C_x знайдемо за формулою:

$$k_x = \frac{8 \cdot \pi \cdot D_n^4}{d_n^2} \mu \cdot l / d_N, \quad (3.7)$$

де μ – динамічний коефіцієнт густини, $\mu = 8,94 \cdot 10^{-4} \text{ Па} \cdot \text{с}$;

l – довжина отвору, $l = 0,045 \text{ м}$;

d_N – кількість отворів $d_N = 1$.

Уявний модуль пружності рідини C_x визначається за формулою Кортєвіча [122]. Звідки жорсткість пружного середовища рідини з пухирцями з урахуванням пружності стінок циліндра знаходиться за залежністю:

$$C_x = \frac{E_\Sigma \cdot E \cdot \delta_k}{E \cdot \delta_k + D_p \cdot E_\Sigma}, \quad (3.8)$$

де $E_{\text{сум}}$ – модуль об'ємної пружності газорідинної суміші;

E – модуль пружності матеріалу стінок циліндра; ($E = 2 \cdot 10^{11} \text{ Па}$);

δ_k – товщина стінок циліндра; $\delta_k = 5 \text{ мм}$;

D_n – діаметр поршня.

Вплив вмісту розчиненого повітря на пружність рідини (води) дається Д.Н. Поповим [123] у вигляді:

$$E_{\text{сум}} = \frac{E_{\text{pid}} \left[1 + \frac{V_{\text{nos}}}{V_{\text{pid}}} \left(\frac{P_0}{P} \right)^{1/k} \right]}{1 + \frac{E_{\text{pid}} V_{\text{nos}}}{k P V_{\text{pid}}} \left(\frac{P_0}{P} \right)^{1/k}}, \quad (3.9)$$

де E_{pid} – модуль об'ємної пружності рідини (для води $E_{\text{pid}} = 20 \cdot 10^8 \text{ Па}$);

V_{nos} – об'єм повітря;

V_{pid} – об'єм рідини;

p_0, p – абсолютні тиски, $p_0 = p_{\text{атм}}$;

k – показник адіабати (для повітря $k = 1,4$).

Рівняння (3.6) дозволяє оцінити вплив різних конструктивних параметрів вібраційної машини на величину тиску P_{max} при руху поршня униз (стискання рідини) із зміною частоти пульсацій. За допомогою програмного продукту Mathcad були проведені розрахунки та побудовані графіки залежності величини тиску P_{max} у камері пульсації від частоти при зміні розміру діаметра насадка d_n , при зміні амплітуди коливань A , при зміні розміру діаметра поршня D_n .

Величина максимального тиску визначалася підстановкою фізичних величин конструктивних параметрів машини і частотного діапазону роботи приводу машини в формулу (3.6). Значення параметрів при яких проводилися розрахунки наведено на рис.3.2.

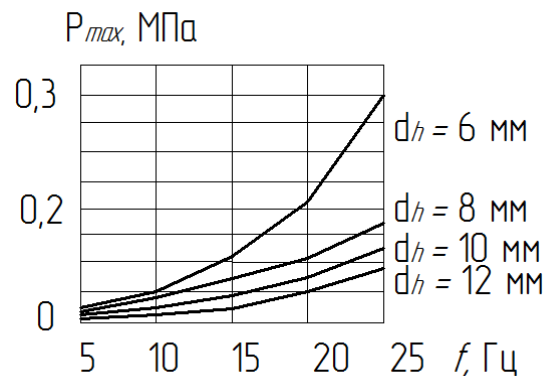


Рис.3.2 – Графіки залежності тиску P_{max} в рідині від частоти коливань f при зміні діаметра насадка d : амплітуда коливань $A_n = 2$ мм; діаметр поршня $D_n = 100$ мм; маса рідини, що коливається $m = 0,2$ кг

За допомогою програмного продукту Mathcad були проведені розрахунки за формулою (3.6) та побудовані графіки залежності величини тиску P_{max} у камері пульсації від частоти при зміні амплітуди коливань A та при зміні розміру діаметра поршня D_n , результати яких представлені у вигляді графіків на рис.3.3 і рис.3.4. [119,120].

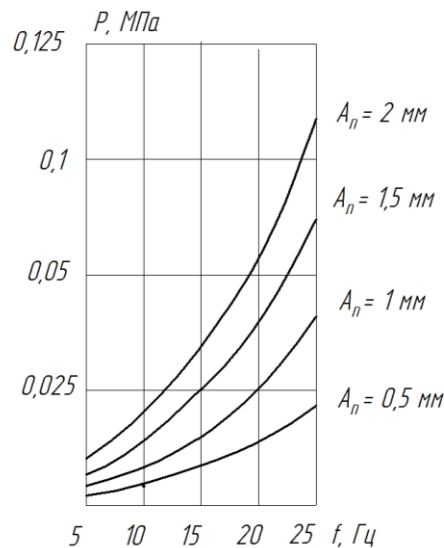


Рис.3.3 – Графіки залежності тиску P_{max} в рідині від частоти коливань f при зміні амплітуди коливань A_n : діаметр поршня $D_n = 100$ мм; діаметр насадка $d = 10$ мм; маса рідини, що коливається $m = 0,2$ кг

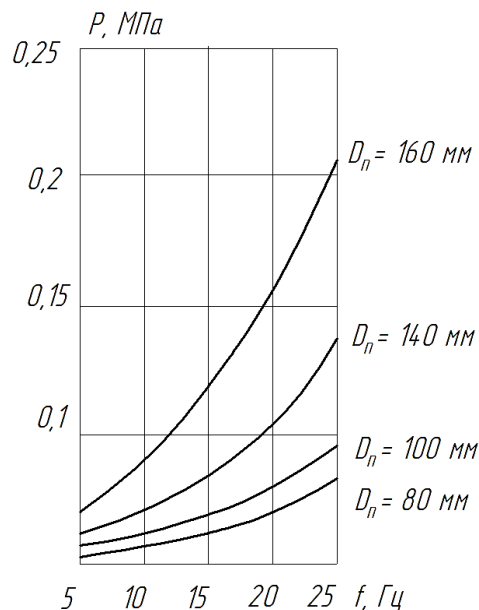


Рис.3.4 – Графіки залежності тиску P_{max} в рідині від частоти коливань f при зміні діаметра поршня D_n : діаметр насадка $d = 10$ мм; амплітуда коливань $A_n = 2$ мм; маса рідини, що коливається $m = 0,2$ кг

Проведені аналітичні дослідження впливу на максимальний тиск у камері пульсації конструктивних параметрів та режимів роботи приводу при ході поршня униз дав можливість оцінити їх вплив на зміну тиску у камері пульсації [109].

У результаті проведених аналітичних досліджень встановлено, що із збільшенням частоти коливань, діаметра поршня та амплітуди коливань максимальний тиск у камері пульсації зростає. Також встановлено, що при збільшенні частоти коливань та зменшенні діаметра насадка максимальний тиск у камері пульсації зростає.

Треба зазначити, що при збільшенні діаметра поршня будуть зростати інерційні параметри машини, що призведе до збільшення реактивної маси (основи машини), зростуть енергетичні витрати приводу.

При зменшенні діаметра насадка, при певному діаметрі поршня, зменшується виток рідини крізь насадки в наслідок чого знижується продуктивність процесу знезаражування.

Тому у подальших експериментальних дослідженнях необхідно визначити реальні співвідношення конструктивних параметрів та режимів роботи вібраційного приводу при отриманні максимального тиску у робочому органі вібраційної машини.

3.2. Експериментальне дослідження впливу режимів роботи приводу на динамічні параметри вібраційної машини та визначення раціональних частот його коливання

Для підтвердження адекватності отриманих аналітичних залежностей було проведено експериментальні дослідження на фізичній моделі за методикою, описаною у розділі 2. У результаті проведених досліджень були отримані осцилограми де зафіксовано зміну тиску при варіації конструктивних параметрів та режимів роботи вібраційного приводу [109,135].

Аналіз отриманих осцилограм показав, що максимальний тиск ударної хвилі і максимальний тиск розрядження нижче атмосферного тиску не симетричні зміни швидкості руху поршня (рис.3.5).

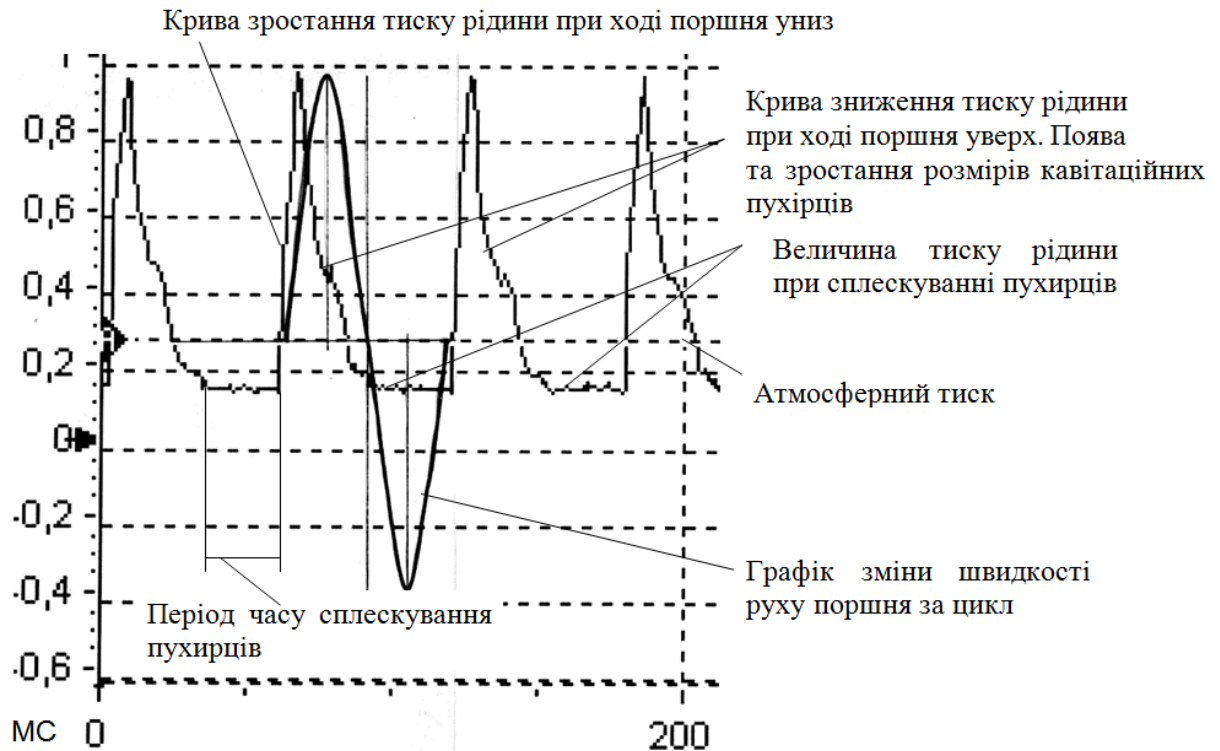


Рис.3.5 – Скріншот обробленого виду осцилограми зміни максимального тиску в робочому органі

З осцилограми рис.3.5. видно, що при ході поршня вгору зниження максимального тиску нижче атмосферного має період постійної величини, який пояснюється виникненням кавітаційних бульбашок і зростанням їх розмірів в цей період.

Осцилограми були оброблені з використанням графіка тарування і побудовані залежності максимального тиску від частоти і зміни співвідношення площі отвору до площі поршня при ході поршня вниз рис.3.6 і в гору рис.3.7.

Провівши порівняння залежностей, отриманих аналітично та експериментально (рис.3.6) встановлено, що з ростом частоти коливань поршня в робочому органі максимальний тиск рідини зростає, але збільшення величини співвідношення площі отвору до площі поршня S_o/S_n в два рази призводить до зменшення значення максимального тиску на 0,1 МПа при тій же частоті. Також, для з'ясування повної картини процесу, було визначено максимальний тиск струменя, що витікає з отвору у поршні за допомогою мембранного

датчика тиску. Залежність його від частоти коливань нанесено на сітку графіків рис.3.6 (нижня крива).

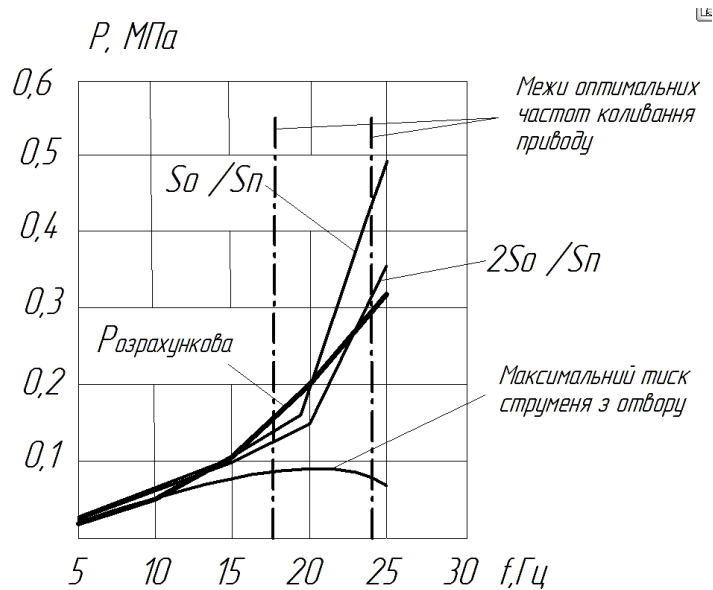


Рис.3.6 – Порівняльні графіки залежності максимального тиску в робочому органі від зміни частоти при ході поршня вниз: $A = 0,002\text{м}$;

$$D_n = 0,1 \text{ м}; d_o = 0,006\text{м}$$

Ця крива характеризує величину витрат рідини через отвір: чим більше тиск тим більше виток рідини.

Відмінність розрахункових значень максимального тиску на графіку 3.6 від експериментальних пояснюється тим, що при частотах від 22 до 25Гц зростає швидкість руху рідини і починається проявлятися ефект гідроудару [124], що збільшує величину миттєвого тиску у камері пульсації, яку можна визначити за залежністю.

$$\Delta P = \frac{2 \cdot \rho \cdot V_0 \cdot l}{t} = \frac{2 \cdot \rho \cdot f \cdot A \cdot l}{t}, \quad (3.10)$$

де ρ – щільність рідини, 1000кг/м^3 ;

V_0 – швидкість рідини у камері пульсації;

l – довжина камери пульсації;

t – час зміни напрямку течії рідини у камері пульсації;

A – амплітуда коливань поршня;

f – частота коливань поршня.

Встановлено, що зі збільшенням частоти коливань з 18Гц, в робочому органі вібраційної машини істотно збільшується обсяг бульбашок, надалі, при ході поршня вниз вони зникають і призводять до того, що через отвір зменшується витрата рідини, що і призводить до зменшення тиску струменя з отвору (див.рис.3.6, нижня крива максимального тиску струменя) [109].

На рис.3.7 показана експериментальна залежність зміни максимального тиску рідини відносно атмосферного при ході поршня вгору.

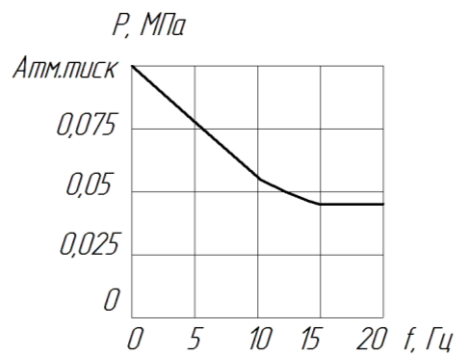


Рис.3.7 – Графік залежності падіння максимального тиску в робочому органі від зміни частоти при ході поршня вгору: $A = 0,002\text{м}$; $D_n = 0,1\text{ м}$;
 $d_o = 0,006\text{ м}$

Встановлено, що зі збільшенням частоти до 13Гц максимальний тиск в робочому органі падає до 0,05 МПа, а при подальшому зростанні частоти коливань приводу тиск в робочому органі стабілізується на величині 0,04 МПа.

Виходячи з аналізу графіка 3.6 запропоновано критерій оптимальності параметра максимальної продуктивності вібраційної машини поршневого типу, а саме: наявності максимального тиску робочого тіла у камері пульсації при максимальному тиску рідини на виході з отвору у поршні

$$G_{\max} = F(P_{\max \text{ роб.т.}} \Rightarrow P_{\max \text{ стр.}}).$$

Виходячи з аналізу графіка 3.6, рекомендується вибирати раціональний діапазон частот коливань робочого органу вібраційного машини в межах від 18 до 23Гц, коли максимальний тиск ще значний і зниження витрати рідини через отвір не суттєво. Проаналізувавши величину максимального тиску у камері пульсації при ході поршня уверх рис.3.7 видно, що тиск досягає величини 0,0048 МПа і значно вище тиску насичених парів 0,0012 МПа (при даних умовах) тому можна зробити висновок, що отримано першу стадію кавітації – газову.

3.3. Експериментальні дослідження впливу конструктивних параметрів та режимів роботи вібраційного приводу на виток струменя в отворі у поршні

У камері пульсації вібраційної машини проходять наступні процеси: при ході поршня вгору в камері пульсації тиск знижується нижче атмосферного і через отвір вода втягується в камеру пульсації зі швидкістю, яка залежить від частоти коливання поршня. При вході рідини в отвір у поршні лінії струму води викривляються, і виникає звуження потоку, яке враховується у ф.3.1. Одночасно з ростом швидкості протікання через отвір (частоти коливань) виникає кавітаційна каверна в отворі, заповнена бульбашками з газом і частково паром, які зриваючись з кавітаційної порожнини та потрапляють в камеру пульсації. Однак, при значних швидкостях (частотах коливань) втягування рідини в камеру пульсації, відбувається лавинний зріст обсягу газопо-парових бульбашок в отворі поршня, внаслідок чого в камеру пульсації потрапляє менший об'єм води. При ході поршня вниз в камері пульсації тиск зростає вище атмосферного і газопо-парові бульбашки сплескуються, зменшуючи обсяг рідини, що проходить через отвір у поршні, що призводить до зниження циркуляції об'ємів рідини у камері пульсації та зниження продуктивності обробки рідини. Чим більше тиск стиснення рідини в камері пульсації, тим інтенсивніше процес сплескування бульбашок і відповідно

процес дезінфекції. Тому, пошук оптимальних режимів роботи приводу для процесу знезараження проводився за критерієм зміни максимального тиску в камері пульсації за цикл при отриманні максимального тиску пульсуючого струменя рідини на виході з отвору за методикою на установці, описаною у п.п.2.4 розділу 2.

Провівши експериментальні дослідження по визначенню максимального тиску за період коливання на виході з отвору у поршні було отримано осцилограми, які оброблені за графіком тарування та побудовані залежності максимального пульсуючого тиску за період коливання від конструктивних параметрів та режимів роботи вібраційного приводу [110].

Графік 3.8 демонструє зміну величини максимального тиску пульсуючого струменя з отвору на початковій ділянці при зміні діаметру отвору від частоти коливань приводу.

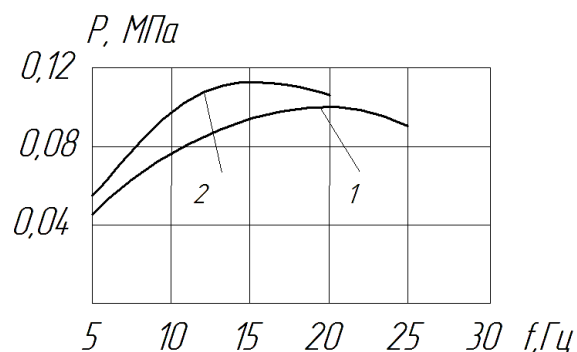


Рис.3.8 – Графік залежності величини максимального тиску пульсуючого струменя з отвору від діаметру при зміні частоти при ході поршня униз:

1 – $d_o = 0,006$ м; 2 – $d_o = 0,01$ м; при амплітуді коливань приводу

$A = 0,002$ м; $D_n = 0,1$ м;

З графіка рис.3.8 встановлено, що при діаметрі отвору $d_o = 0,01$ м тиск струменя збільшується, виток рідини збільшується але максимум досягається на менших частотах коливань (14-16 Гц). Зменшення частоти коливань приводу машини веде до зменшення кількості кавітаційних процесів за одиницю часу,

що призводить до зменшення продуктивності знезаражування. Тому при виборі діаметра отвору необхідно рекомендувати наступні розміри від 0,006 м до 0,008 м. Графік 3.9 демонструє зміну величини максимального тиску пульсуючого струменю з отвору на початковій ділянці при зміні амплітуди від частоти коливань приводу [110].

З графіка рис.3.9 встановлено, що при діаметрі отвору $d_o = 0,01$ м зміна амплітуди коливань призводить до зміни величини максимального тиску пульсуючого струменя наступним чином: при амплітуді коливань $A = 0,001$ мм величина максимального тиску пульсуючого струменя значно менша чим при амплітудах $A = 0,002$ мм, $A = 0,003$ мм.

При коливаннях приводу з амплітудою $A = 0,003$ мм величина максимального тиску пульсуючого струменя зміщується у сторону менших частот коливання приводу (10-12 Гц), що веде до зменшення продуктивності роботи вібраційної машини та зростанню динамічних навантажень на вузли машини.

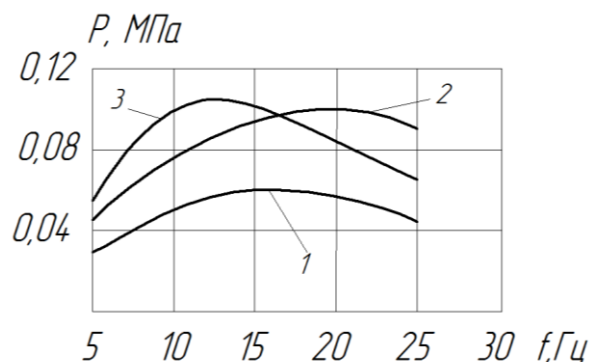


Рис.3.9 – Графік залежності величини максимального тиску пульсуючого струменю з отвору від амплітуди при зміні частоти при ході поршня униз:

1 – $A = 0,001$ м; 2 – $A = 0,002$ м; 3 – $A = 0,003$ м; $D_n = 0,1$ м; $d_o = 0,006$ м

Виходячи з аналізу залежностей на графіках рис.3.8 та 3.9 при виборі амплітуди коливань приводу вібраційної машини при її проектуванні рекомендовано вибирати амплітуду коливань $A = 0,002$ м [110].

3.4. Експериментальні дослідження за допомогою відео-фіксації процесу руху робочого тіла у камері пульсації та виникнення кавітаційних процесів

Для визначення реальної картини протікання рідини крізь насадок у коливальному режимі (з урахуванням виникнення кавітаційних процесів) було створену дослідну установку з прозорим каналом та проведена відеозйомка зворотно-поступального руху рідини у каналі для виявлення процесу виникнення кавітаційних процесів [109,119].

Були отримані фотографії кавітаційного процесу, який виникає при проходженні рідини крізь канал січенням 10x10 мм при коливаннях на різних частотах (від 0 до 24 Гц) при коливаннях з амплітудою $A = 0,002$ м та діаметрі поршня $D_n = 0,1$ м (рис.3.8 – рис.3.14)



Рис.3.8 – Фотографія прозорого каналу з рідиною, що коливається в момент втягування рідини у камеру пульсації: виникнення кавітаційної каверни та кавітаційних пухирців при частоті коливань 5 Гц



Рис.3.9 – Фотографія прозорого каналу з рідиною, що коливається в момент втягування рідини у камеру пульсації: виникнення кавітаційної каверни та кавітаційних пухирців при збільшенні частоти коливань до 10 Гц

На початковому етапі у момент втягування рідини у камеру пульсації при частоті коливань 5 Гц (рис.3.8) спостерігається виникнення кавітаційної каверни при вході у канал та в камері пульсації з'являються кавітаційні пухирці.

Із зростанням частоти до 10 Гц спостерігається значне зростання кількості кавітаційних пухирців та збільшення їх розмірів (рис.3.9).

Із зростанням частоти до 14 Гц відбувається зрив кавітаційної каверни при вході у канал, спостерігається рух кавітаційних пухирців у камеру пульсації (рис.3.10). Із зростанням частоти до 16 Гц спостерігається виникнення у камері пульсації появи великої кавітаційної каверни у наслідок розриву рідини по границях пухирців (рис.3.11).



Рис.3.10 – Фотографія прозорого каналу з рідиною в момент втягування рідини у камеру пульсації: виникнення кавітаційної каверни та кавітаційних пухирців при збільшенні частоти коливань до 14 Гц

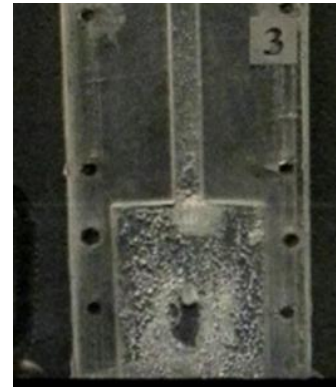


Рис.3.11 – Фотографія прозорого каналу з рідиною в момент втягування рідини у камеру пульсації: поява великого кавітаційного пухиря та кавітаційних пухирців при збільшенні частоти коливань до 16 Гц

На етапі руху рідини уверх рис. 3.12 показано момент сплескування бульбашок в камері пульсації та утворення каверни на вході у отвір.



Рис.3.12 – Фотографія прозорого каналу з рідиною в момент початку виштовхування рідини з камери пульсації: виникнення кавітаційної каверни та кавітаційних пухирців, що ще не сплеснулися при частоті коливань 10 Гц

На рис. 3.13 та рис.3.14 зафіксовано момент виштовхування рідини з камери пульсації: виникнення кавітаційної каверни та кавітаційні пухирці сплеснулися.



Рис.3.13 – Фотографія прозорого каналу з рідиною, що коливається, в момент виштовхування рідини з камери пульсації: виникнення кавітаційної каверни та сплескування кавітаційних пухирців при частоті коливань 5 Гц



Рис.3.14 – Фотографія прозорого каналу з рідиною, що коливається, в момент виштовхування рідини з камери пульсації: зростання кавітаційної каверни та сплескування кавітаційних пухирців при збільшенні частоти коливань до 10 Гц

При частоті коливань 5 Гц (рис.3.13) спостерігається каверна на вході у отвір та спостерігається збільшення її розмірів із збільшенням частоти коливань 10Гц, але у камері пульсації спостерігаються газові пухирці, які не сплеснулися, а газ у них стиснено, що відіграє негативну функцію – збільшення об'ємної пружності рідини у камері пульсації, що веде до зменшення об'єму рідини, що виштовхується (зменшується виток крізь канал, відповідно зменшується продуктивність процесу знезаражування).

У результаті проведених досліджень по візуалізації процесу зворотно-поступального протікання рідини крізь канал встановлено, що в залежності від частоти та амплітуди коливань і варіації конструктивних параметрів робочого органу у рідині виникають кавітаційні процеси: при ході поршня уверх створюється зниження тиску у камері пульсацій та поява кавітаційних каверн при вході у верхній частині каналу, а у камері пульсацій спостерігається зростання кількості кавітаційних пухирців та їх розмірів; при ході поршня униз спостерігається поява кавітаційних каверн при вході у нижній частині каналу, а у камері пульсації проходить сплескування кавітаційних пухирців але незначна кількість газонаповнених пухирців тільки стискаються до певних розмірів і вони виштовхуються з камери пульсації крізь канал [119].

Наявність такої пружної фази зменшує величину витoku рідини крізь отвір. Тому, визначення фактичних значень зміни тиску у камері пульсації при зміні режимів роботи приводу та конструктивних параметрів робочого органу з урахуванням кавітаційних процесів, при зворотно-поступальному протіканні рідини крізь отвір у поршні, необхідно визначити експериментальними дослідженнями.

3.5. Експериментальні дослідження енергетичних режимів роботи приводу вібраційної машини для знезаражування та зміни властивостей води

При створенні конструкцій різноманітних машин завжди ставиться завдання досягнення енергозбереження технологічного процесу та машин, що

проектуються. З метою визначення енерговитрат вібраційної машини поршневого типу [100,126] (див. рис.2.5) було проведено дослідження енерговитрат приводу при зміні частоти коливань поршня за допомогою варіації величини напруги на електродвигуні постійного струму з реєстрацією величини сили струму, що споживає ексцентриковий привод вібраційної машини для проведення технологічного процесу знезаражування та зміни властивостей води.

Прилад керування частотою коливань 4 оснащено амперметром та вольтметром постійного струму, що дозволяло при зміні напруги постійного струму змінювати частоту коливань поршня та контролювати зміну величини сили струму, який споживає електродвигун постійного струму 2.

З графіка (рис.3.15) встановлено, що сила струму зростає при збільшенні частоти коливань приводу при коливанні поршня на повітрі та при збільшенні частоти від 15 Гц і далі сила струму стає стала [126].

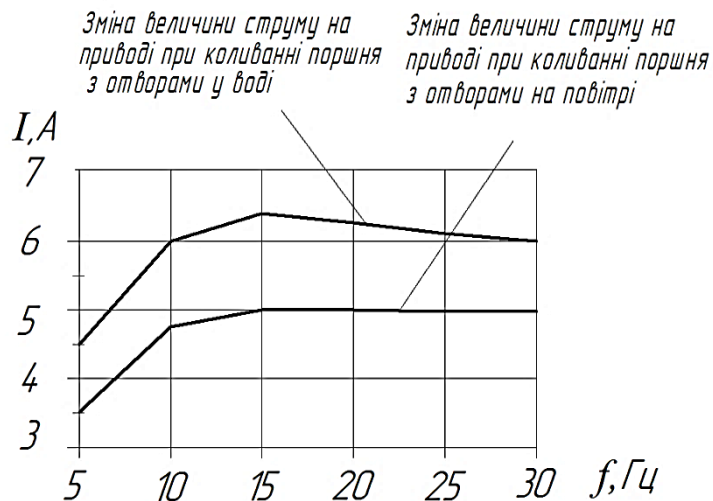


Рис.3.15 – Графіки залежності зміни сили струму приводу робочого органа вібраційної машини для знезаражування води від частоти коливання поршня в різних середовищах

Ця енергія витрачається на сили тертя у машині, інерційні сили та сили пружної системи.

Також з графіка (рис.3.15) встановлено, що сила струму зростає при збільшенні частоти коливань приводу та більше на 1,5А при коливанні поршня у воді чим на повітрі.

Відповідно до попередніх енерговитрат додаються витрати на генерацію ударних хвиль та кавітаційний процес у отворах в поршні, але починаючи з частоти 15 Гц сила струму знижується з 6,5 до 6 А, що говорить про утворення в камері пульсації з значної кількості бульбашок великих розмірів (виникає додатковий пружний елемент), що знижує виток (проходження) рідини крізь отвори у поршні та знижує швидкість перемішування води в камері пульсації – відповідно знижується продуктивність кавітаційної дії.

На основі отриманих вимірювань, побудовано графік витрат потужності приводу робочого органа вібраційної машини, представлений на рис.3.16. З якого встановлено, що потужність приводу на проведення коливань поршня у воді також має нелінійний характер (відхилення від штрихової лінії після частоти 15Гц) в наслідок виникнення значної кількості кавітаційних пухирців у камері пульсації вібраційної машини [126].

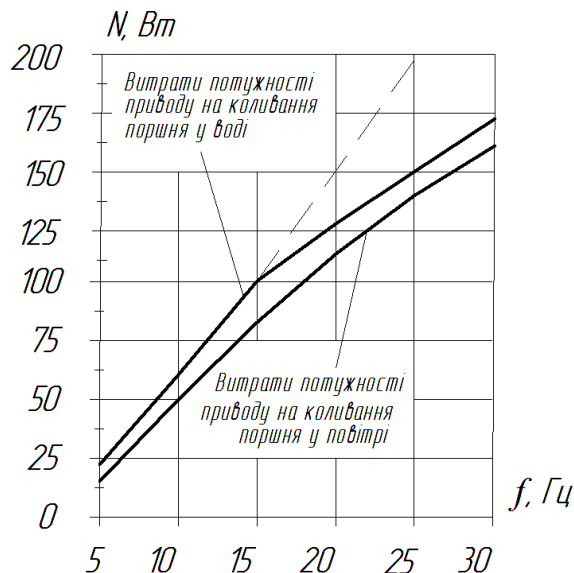


Рис.3.16 – Графіки залежності витрат потужності приводу робочого органа вібраційної машини для знезаражування води від частоти коливання поршня в різних середовищах

Результатом аналізу фізичних та фізико-механічних явищ, що протікають в процесі кавітаційної обробки води, стало рівняння балансу енерговитрат на роботу приводу вібраційної машин поршневого типу.

Загальні енерговитрати на виконану роботу $A_{заг.випр}$ можна представити як суму наступних видів робіт:

$$A_{заг.випр} = A_{мех.випр.} + A_{нагрів} + A_{кавіт\ реакції}, \quad (3.10)$$

де $A_{мех.випр.}$ – робота, яка витрачається на інерційні сили та тертя в обладнанні;

$A_{нагрів.}$ – робота на нагрівання води та елементів обладнання (без урахування дисипації тепла в повітря);

$A_{кавіт\ реакції}$ – робота, що необхідна для протікання кавітаційних реакцій.

При проведенні дослідів по обробленні води при амплітуді коливань 0,002 м було визначено загальну роботу, що виконав привод обладнання на різних частотах коливань за період $t = 15$ хв.

Розрахунок величини роботи на загальні витрати приводу проводився за формулою:

$$A_{заг.випр} = U \cdot I \cdot t, \quad (3.11)$$

де U – напруга в мережі живлення електродвигуна, В;

I – сила струму, що його споживає електродвигун приводу, А ,

t – тривалість часу обробки, с.

Результати розрахунків $A_{заг.випр.}$ представлені у табл.3.1.

Таблиця 3.1

Загальна робота приводу, витрачена на коливання поршня у воді

№	Параметр	Зміна параметрів та результат розрахунку					
1	U , (В)	5	10	15	20	25	30
2	I , (А)	4.5	6	6.4	6.2	6	5.9
3	$A_{заг. витр.}$, (Дж)	20250	54000	86400	111600	135000	159300

Механічні втрати при роботі обладнання на холостому ходу у повітрі були визначені експериментально та розраховані за залежністю (3.11) і представлені у таблиці 3.2.

Таблиця 3.2

Загальна робота приводу, витрачена на механічні витрати при коливання поршня у повітрі

№	Параметр	Зміна параметрів та результат розрахунку					
1	U , (В)	5	10	15	20	25	30
2	I , (А)	3.5	4.8	5	5	4.9	4.9
3	$A_{мех. витр.}$, (Дж)	15750	43200	67500	90000	110250	132300

Експериментально [126] було встановлено, що частина роботи витрачається на розігрів рідини та елементів машини. Було визначено зміну температури нагрівання води та елементів обладнання при амплітуді 0,002 м та частоті коливань приводу 15 Гц ($U=15\text{В}$), яка склала $\Delta t = 3^{\circ}\text{С}$ за період 15 хв. Нагрівалась вода $m_1 = 1,0$ кг, сталевий корпус масою $m_2 = 1,6$ кг, пластмасовий поршень $m_3 = 0,3$ кг. Робота, витрачена на нагрівання води та елементів машини, визначалася за формулою:

$$A_{нагрів} = c_1 \cdot m_1(t_2 - t_1) + c_2 \cdot m_2(t_2 - t_1) + c_3 \cdot m_3(t_2 - t_1), = 11120 \text{ Дж}, \quad (3.12)$$

де $c_1 = 4190$ Дж/кг – теплоємність води;

$c_2 = 500$ Дж/кг – теплоємність заліза;

$c_3 = 1900$ Дж/кг – теплоємність пластмаси.

Робота приводу на виконання кавітаційних реакцій за період 15 хвилин визначалася за формулою:

$$\begin{aligned} A_{\text{кавіт.реакції}} &= A_{\text{заг.випр}} - (A_{\text{мех.випр.}} + A_{\text{нагрів}}) = \\ &= 86400 - (67500 + 11120) = 7780 \text{ Дж.} \end{aligned}$$

Проведемо аналіз процесів перетворення складу води, на які витрачається енергія при проходженні кавітаційних реакцій. Експериментальними дослідженнями [57] було визначено, що за той же період обробки (15 хв.) змінюється склад газового наповнення водного середовища. Отримані результати досліджень процесу кавітаційного впливу показали, що вплив гідрокавітації збільшує вміст азоту у бідістеляті води до 5 разів [77].

Після аналізу отриманих результатів, якщо врахувати те, що азот береться з повітря, а аміак розчиняється у воді, то від'ємне значення вільної енергії Гібса при змінному тиску можливе за умов від'ємної різниці кінцевих та початкових об'ємів реагуючих речовин та продуктів реакції, що дає можливість проведення реакції за даних умов:

$$\Delta V = V_k - V_n, \quad \Delta V < 0, \quad (3.13)$$

де ΔV – зміна об'ємів;

V_k – об'єм продуктів реакції;

V_n – об'єм речовин, що вступають у реакцію.

Тоді протікання кавітаційних реакції можливе при умовах, тобто:

$$\left(\frac{\partial \Delta G}{\partial p}\right)_T = \Delta V, \quad \Delta V < 0, \quad (3.14)$$

де ΔG – зміна вільної енергії Гібса;

p – тиск;

T – температура.

Ці умови підтверджуються також розрахунками:

$$\begin{aligned} \Delta G_{\text{реакції}} &= \Delta G_{\text{Fe(OH)}_2} + \Delta G_{\text{NH}_3} - \Delta G_{\text{H}_2\text{O}} - \Delta G_{\text{N}_2} - \Delta G_{\text{Fe}} = \\ &= -115,57 \frac{\text{ккал}}{\text{моль}} + 2 \left(-3,976 \frac{\text{ккал}}{\text{моль}} \right) - 2 \left(-56,690 \frac{\text{ккал}}{\text{моль}} \right) - \\ &- 3 \cdot 0 \frac{\text{ккал}}{\text{моль}} - 3 \cdot 0 \frac{\text{ккал}}{\text{моль}} = -10,1408 \frac{\text{ккал}}{\text{моль}} = -42,38 \frac{\text{кДж}}{\text{моль}}. \end{aligned} \quad (3.15)$$

Отже, розрахунки показали, що $\Delta G < 0$, звідси висновок – реакція можлива за даних умов.

Зменшення протягом кавітаційної обробки концентрації нітритів та збільшення концентрації нітратів можна пояснити поступовим окисненням нітритів (N^{3+}) до нітратів (N^{5+}) киснем повітря. Зростанням ступеня окиснення нітритів до нітратів можна пояснити збільшенням валентності атомарного азоту ($\text{N}^{3+} \rightarrow \text{N}^{5+}$) та наявністю органічних речовин, які містяться у воді. Отриманий ефект пояснюється тим, що при закритті кавітаційних бульбашок виникає зміна статичної електрики на поверхні бульбашки, значний тиск та температура. Усе це спричинює гемолітичний розрив ковалентних зв'язків у молекулі води та утворення радикальних частинок H^+ та іонів OH^- і O , що мають підвищену окиснювальну здатність. Хоча значна частина іонів H^+ і залишається у потоці рідини, вони характеризуються високою рухливістю і можуть швидко дифундувати з потоку. Іони OH^- , навпаки, накопичуються, що загалом призводить до зростання показника рН.

Отже, розрахована енергія, яка витрачається на виконання роботи кавітаційних реакцій, має достатню величину для проходження кавітаційних перетворень складу води.

Отриманий розподіл робіт, витрачених на різні процеси, дозволяє розрахувати коефіцієнт витрат енергії на кавітаційні реакції при роботі вібраційної машини за певний період (як приклад приведено його розрахунок за період 15 хвилин).

$$K_{\text{кавіт.реакції}} = \frac{A_{\text{кавіт.реакц.}}}{A_{\text{заг.випр.}}} = \frac{7780}{86400} = 0,1. \quad (3.16)$$

Висновки до розділу 3

1. Побудовано аналітичну модель коливального процесу робочого середовища у вібраційній машині та отримано рівняння залежності максимального тиску у камері пульсації від конструктивних параметрів та режимів роботи приводу машини. Результатами його аналізу стали графічні залежності.

2. Зростання максимального тиску при зменшенні діаметра насадка у поршні має різні наслідки: з однієї сторони зростання максимального тиску, що призводить до активного руйнування мікробної флори, а з іншої зменшення витоку рідини крізь насадок у поршні та активному перемішуванні рідини у ємкості вібраційної машини, що призводить до падіння продуктивності процесу.

3. Запропоновано критерій оптимальності параметра максимальної продуктивності вібраційної машини поршневого типу, а саме: наявності максимального тиску робочого тіла у камері пульсації при максимальному тиску рідини на виході з отвору у поршні $G_{\text{max}} = F(P_{\text{max роб.т.}} \Rightarrow P_{\text{max стр.}})$.

4. З аналізу експериментальних графіків тиску встановлено, що зі збільшенням частоти коливань поршня зростає тиск у камері робочого органу завдяки виникненню ефекту гідравлічного удару.

5. У результаті проведених експериментальних досліджень сили удару струменю з отвору у поршні, встановлено залежності впливу амплітуди та частоти на силу удару струменя в камері пульсації розміром 0,1 м. За умови збереження максимального перемішування водного середовища у ємкості машини та продуктивності рекомендовано використовувати амплітуду коливань 0,002 м.

6. Дослідження по візуалізації процесу зворотно-поступального протікання рідини крізь отвір у поршні показали, що вже при незначних частотах його коливань від 10 Гц проявляється ефект появи кавітаційних каверн у отворі, кавітаційного росту та сплескування парогазових пухирців повітря у камері пульсації вібраційної машини.

7. У результаті аналізу експериментальних та аналітичних витрат енергії приводу вібраційної машини поршневого типу встановлено напрями розподілу витрат потужності приводу машини при зміні частоти коливань приводу за основними видами: механічні, нагрівання середовища та кавітаційні реакції.

8. Отримані залежності витрат потужності привода робочого органу вібраційної машини для знезаражування води від частоти коливання поршня показали, що енерговитрати на процес знезаражування та зміни властивостей потребують від 100 до 175 Вт, що говорить про енергощадність в порівнянні з іншими видами обладнання, призначеного для знезаражування.

9. Експериментальні та аналітичні дослідження підтвердили можливість проходження кавітаційних хімічних реакцій та зміни складу водного середовища при використанні вібраційної машини поршневого типу. Отримані результати можуть бути враховані при розробленні технологій та конструкцій вібраційного обладнання для очищення стічних вод промислових, комунальних підприємств, тваринницьких комплексів тощо.

РОЗДІЛ 4

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРАЦЕЗДАТНОСТІ ВІБРАЦІЙНОЇ МАШИНИ ДЛЯ ЗНЕЗАРАЖУВАННЯ І ЗМІНИ ВЛАСТИВОСТЕЙ ВОДИ ТА МЕТОДИКА ЇЇ ПРОЕКТУВАННЯ

Дослідження, що спрямовані на пошуки новітніх конструктивних рішень машин із досконалою динамікою роботи за умови їх придатності для промислового застосування, залишаються не тільки вагомим науково-технічним завданням, а і суспільною проблемою. Тому дослідження працездатності вібраційної машини для знезаражування та зміни властивостей води, створення методики її проектування та розроблення на основі цього нових конструкцій вібраційних машин і зумовлюють актуальність порушеного завдання.

4.1. Експериментальне дослідження працездатності вібраційної машини по знезаражуванні водних потоків

Для визначення працездатності вібраційної машини по знезаражуванню води проведені дослідження впливу часу гідродинамічної кавітаційної обробки річкової води на зміну її бактеріального складу [127,128].

Режими оброблення та конструктивні співвідношення параметрів машини: співвідношення діаметра отвору до діаметра поршня $d_o / D_n = 0,06$; амплітуда коливань приводу $A = 0,002$ м; частота коливань приводу $f = 22$ Гц. Температура води 20°C . Вода взята з річки Південний Буг. Результати досліджень представлено на рис.4.1.

Обробка води кавітацією у вібраційній машині проводилась протягом 10; 20 хвилин та згідно з ГОСТ 18963–73. Після було проведено нанесення води на зразки з споживчим середовищем. Сутність методу полягає у визначенні загального вмісту мезофільних, мезотрофних аеробів і факультативних анаеробів, здатних зростати на споживчому агарі при температурі $(37 \pm 0,5)^{\circ}\text{C}$

протягом (24 ± 2) годин, утворюючи колонії. Після завершення росту колоній, через 24 години було проведено фотографування контрольного зразка та зразків, оброблених гідрокавітацією за певний час (рис. 4.1).

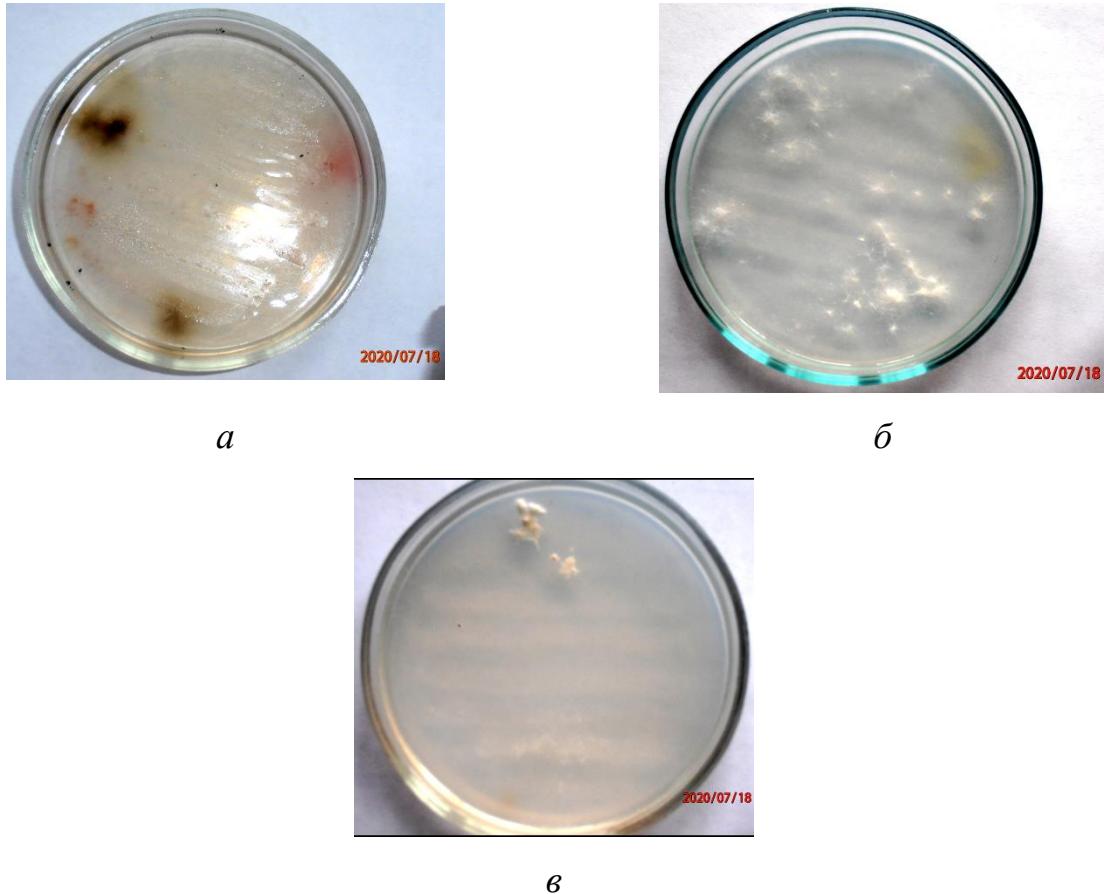


Рис. 4.1 – Фотографії росту колоній на контрольному зразку та після оброблення кавітацією: *a* – зразок з нанесеною річковою водою не обробленою кавітацією; *б* – зразок з нанесеною річковою водою обробленою кавітацією 10 хвилин; *в* - зразок з нанесеною річковою водою обробленою кавітацією 20 хвилин

У результаті проведених досліджень [127,128] встановлено, що після оброблення кавітацією річкової води деякі види колоній бактерій знищуються (рис.4.1,б (виглядають червоним та коричневим кольором на рис.4.1,а), а кількість деяких колоній бактерій зменшується у десятки разів після оброблення 20 хвилин кавітацією (світлий колір, рис.4.1,в).

Підсумовуючи вищесказане, можна стверджувати, що застосування вібраційної машини поршневого типу призводить до зміни основних властивостей води та підтверджує працездатність її для попереднього безреагентного знезаражування [127,128].

Дослідження перебігу інактивації, залежно від початкового забруднення, показали, що вже на перших етапах впливу кавітації спостерігається зменшення концентрації мікроорганізмів. На основі проведених досліджень отримано підтвердження теоретичних припущень щодо механізму інактивації за наявності кавітації, що обґрунтовується динамічною дією парогазової фази, подрібненням дисперсних частинок, зміною фізико-хімічних параметрів рідкої фази, утворенням молекул мономерів та хімічно-активних сполук. Кавітаційний вплив зумовлюється механічним руйнуванням клітин і їхньою хімічною деградацією під час контактування з радикалами і пероксидом водню.

Результати експериментальних досліджень процесу інактивації патогенних мікроорганізмів та їхнє узагальнення дають змогу підтвердити раніше обґрунтований вибір технологічних і конструктивних рішень [119] та на основі отриманих залежностей розрахувати основні конструктивні параметри кавітаційних модулів, що забезпечить високу продуктивність обладнання і зменшить його собівартість.

4.2. Експериментальне дослідження зміни основних показників водного середовища після оброблення у вібраційній машині

В експериментальних випробуваннях по впливу кавітації на зміну властивостей водного середовища досліджувалась зміна основних параметрів водопровідної та річкової води, а саме: зміна рН з часом оброблення кавітацією, зміна окислювального відновлювального потенціалу з часом оброблення та зміна вмісту загальної мінералізації з часом (показник – TDS). Результати досліджень [128,129] приведені на рис. 4.2.

Показник загальної мінералізації TDS за період кавітаційного оброблення 20 хвилин зростає, а надалі знижується. Це говорить про утворення нерозчинних у воді карбонатів CaCO_3 , MgCO_3 , оксикарбонатів $\text{Mg}_2(\text{OH})_2\text{CO}_3$ і гідроокисів $\text{Fe}(\text{OH})_2$, які з часом випадають в осад і тому зменшується загальна концентрація вмісту розчинених речовин.

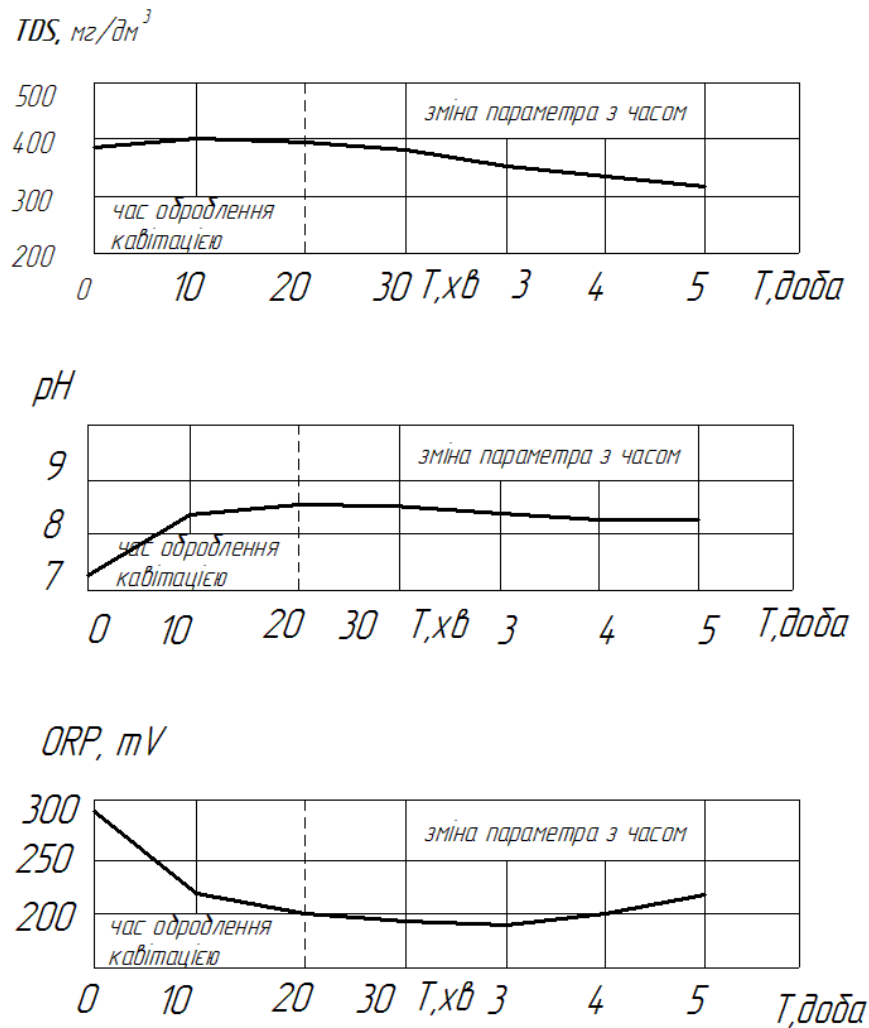


Рис. 4.2 – Зміна основних показників TDS, pH, ORP водопровідної води з часом, обробленої кавітацією: параметри приводу амплітуда $A = 2$ мм; частота $f = 20$ Гц; діаметр отвору у поршні $d_n = 0,006$ м

Зростання показника pH за період оброблення говорить про розрив водневих зв'язків у молекулах, але з часом він стабілізується на рівні 8,4 pH. Зниження показника ORP від 300 до 180 мВ говорить про підвищення

окислювального відновлювального потенціалу рідини, який з часом збільшується до 240 мВ.

Проведено експериментальне дослідження впливу кавітації на основні показники води з річки (р. Південний Буг): TDS, рН, ОРР. Результати досліджень [128,129] представлені у вигляді графіків на рис. 4.3 з яких видно, що застосування при обробленні води впливу кавітації збільшує рН до 9,0 од. Це говорить про розрив водневих зв'язків між молекулами рідини.

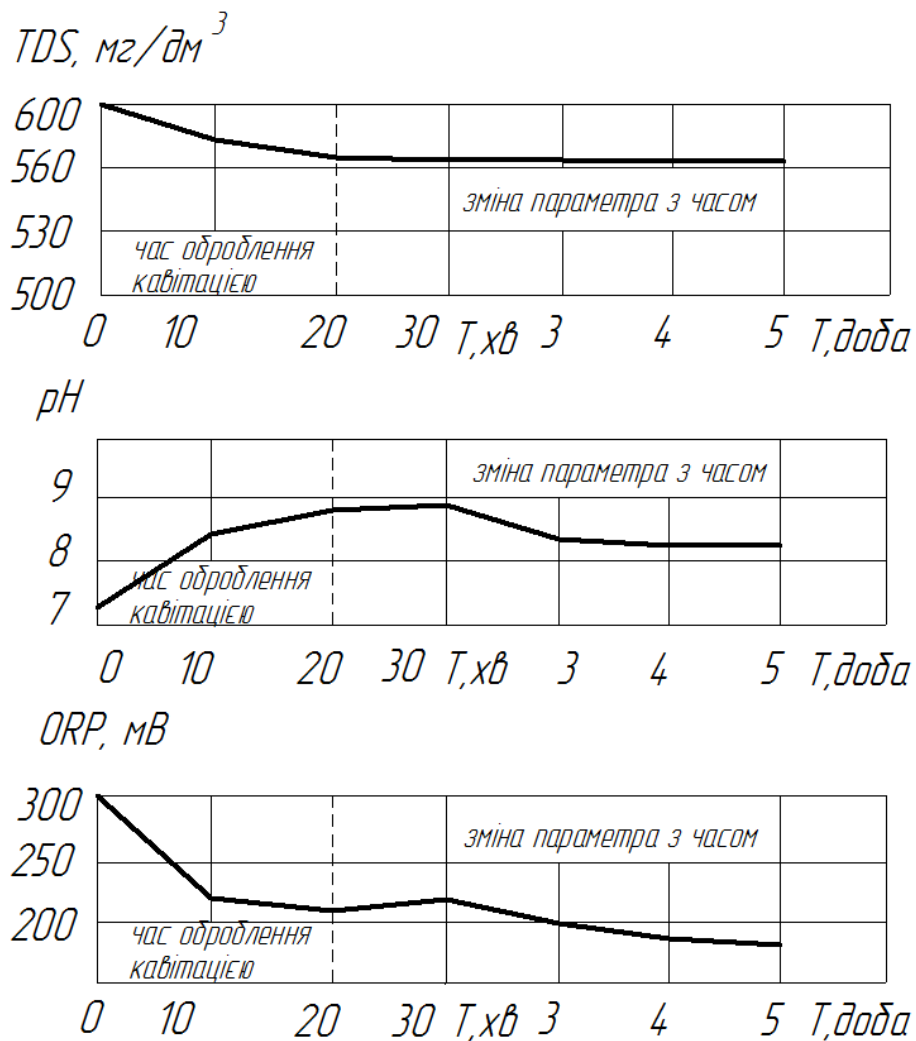


Рис. 4.3 – Зміна показників TDS, рН, ОРР води з річки з часом під впливом дії кавітації: параметри приводу амплітуда $A = 2$ мм; частота $f = 20$ Гц; діаметр отвору у поршні $d_n = 0,006$ м

Показник ORP за період оброблення 20 хвилин знижується, але потім за першу годину збільшується, завдяки реакціям окиснення та надалі з часом падає після випадіння окиснених речовин у осад.

Зміна вмісту загальної мінералізації з часом (показник TDS) спостерігається у сторону зменшення від 600 мг/дм^3 до 570 мг/дм^3 , також на відміну від складу води водопровідної, у річковій воді залишається у зрівноваженому стані значна частка окиснених органічних забруднень, яка на фотографіях (рис. 4.4,*а*, рис. 4.4,*б*) виглядає світлими вкрапленнями.

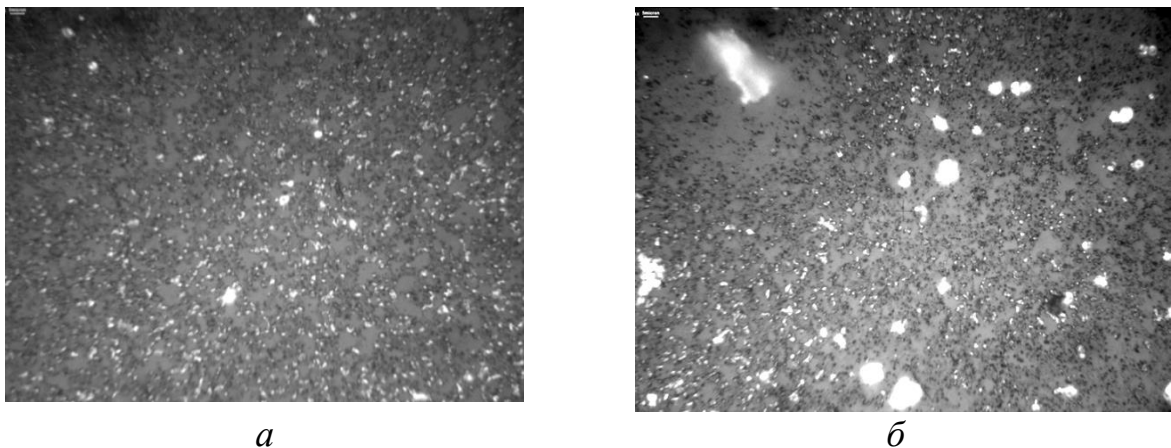


Рис. 4.4 – Фотографія структурної будови кристалів на різних ділянках осаду краплі води з річки, обробленої протягом 20 хвилин кавітацією: *а* – збільшення ($1 \text{ см} = 25 \text{ мкм}$); *б* – збільшення ($1 \text{ см} = 15 \text{ мкм}$)

Загальна структурна будова кристалів на різних ділянках осаду краплі води з річки, обробленої кавітацією показує, що спостерігається рівномірний розподіл та округла форма кристалів осаду. Це пояснюється зниженням поверхневого натягу, розривом водневих зв'язків, структуризацією води.

Результати дослідження зміни показників водопровідної води, обробленою кавітацією у вібраційній машині поршневого типу показали, що після оброблення за період 20 хвилин, збільшується концентрації вільних іонів водню у воді та з часом відстою води цей показник становить 8,4 рН. Це призводить до зменшення її кислотності. Зменшується показник окислювально-відновлювального потенціалу ORP, що говорить про насичення киснем

рідинного середовища. Показник TDS (рівня загальної мінералізації) після оброблення за період 20 хвилин, збільшується, що говорить про утворення нових сполук (окиснення Ca та Mg), які з часом випадають в осад та з часом спостерігається зменшення показника 400 до 330 одиниць, що говорить про поліпшення властивостей води [128,129].

4.3. Експериментальне дослідження працездатності вібраційної машини по зміні властивостей водного середовища та його структурної будови кристалооптичним аналізом

Дослідження зразків водного середовища, по встановленню зміни властивостей водного середовища та його структурної будови, проводились згідно методики, наведеної у другому розділі на основі патенту на корисну модель способу №128630 [112].

Результати кристалооптичного аналізу структурної будови води та ступеню її активації і забруднення біологічними рештками проілюстрована на рис.4.5-4.12 де, як приклад, відображено електронні зображення мікрофотографії проб води, взятих з різних джерел, у вихідному стану та після оброблення у вібраційній машині при різноманітному збільшенні.

Аналіз вигляду кристалооптичної структури проби води питної водопровідної у вихідному стані (рис. 4.5) показав, що форма кристалів осаду, особливо у крайовій зоні, говорить про певну упорядковану кластерну структуру води із значним поверхневим натягом.

Аналіз вигляду кристалооптичної структури (рис. 4.6) води питної водопровідної у вихідному стані, а саме характерної ділянки осаду із збільшенням у 10 разів показав, що структура осаду має нерівномірний характер, спостерігається висока щільність та кристалічні утворення, що свідчить про не зрівноважений енергетичний стан води. Кількісний аналіз вимірювання водневого показника рН проби води водопровідної у вихідному стані показав значення рН 7,2 од.

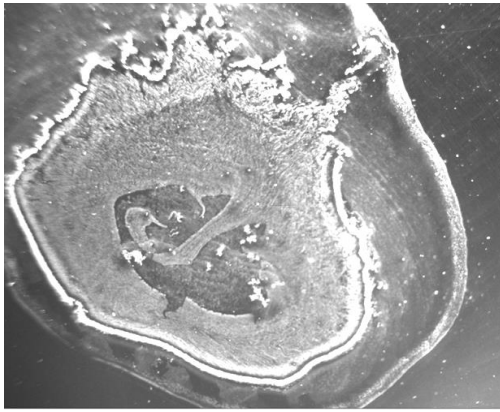


Рис. 4.5 – Фотографія структурної будови кристалів на різних ділянках осаду краплі води водопровідної у вихідному стані, збільшеною у 10 разів

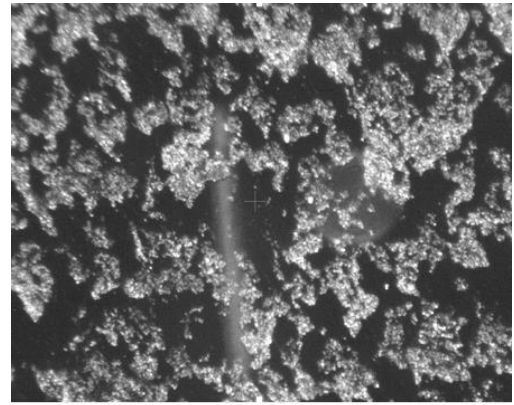


Рис. 4.6 – Фотографія структурної будови кристалів на окремій ділянці осаду краплі води водопровідної у вихідному стані, збільшеною у 40 разів

Аналіз вигляду кристалооптичної структури (рис. 4.7) проби води питної водопровідної, обробленою гідрокавітацією, (збільшено у 10 разів) та кристалооптичної структури (рис.4.8) тієї ж води (збільшено у 40 разів) показав більш рівномірне розташування осаду, що говорить про зменшення поверхневого натягу та дрібнозернистий розподіл кристалічних утворень.

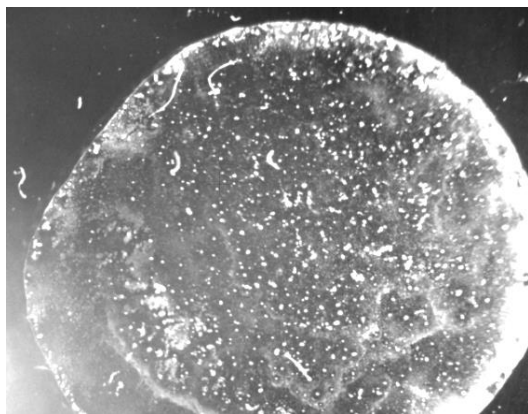


Рис. 4.7 – Фотографія структурної будови кристалів на різних ділянках осаду краплі води водопровідної, обробленої протягом 20 хвилин кавітацією, збільшеною у 10 разів

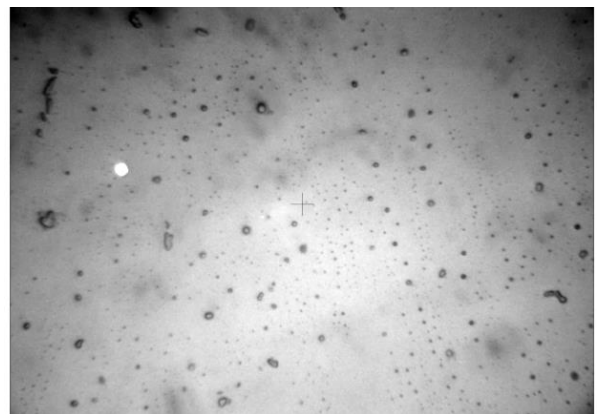


Рис. 4.8 – Фотографія структурної будови кристалів на різних ділянках осаду краплі води водопровідної, обробленої протягом 20 хвилин кавітацією, збільшеною у 40 разів

Це пояснюється структуризацією води – подрібненням її кластерної структури, відсутністю росту дендритних структур. Кількісний аналіз вимірювання водневого показника рН проби води показав збільшення значення до рН 8,4 од.

Аналіз вигляду кристалооптичної структури (рис.4.9) проби води з річки Південний Буг у вихідному стані (збільшено у 10 разів) та кристалооптичної структури (рис.4.10) тієї ж води (збільшено у 40 разів) показав, що структура осаду має нерівномірний характер розподілення зон кристалізації, спостерігається ріст дендритних кристалічних утворень, що свідчить про незрівноважений енергетичний стан води. Утворення світлого кольору – рештки біологічного забруднення. Кількісний аналіз вимірювання водневого показника рН проби води показав значення рН 7,1 од.

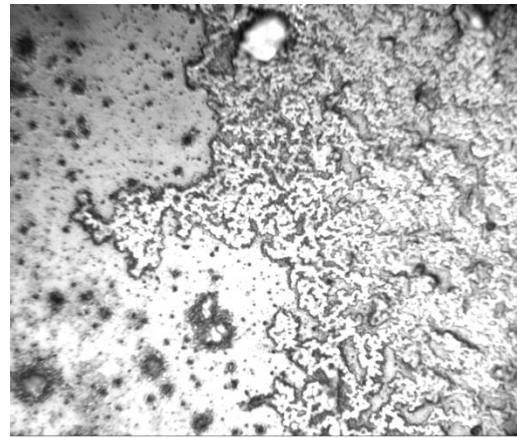
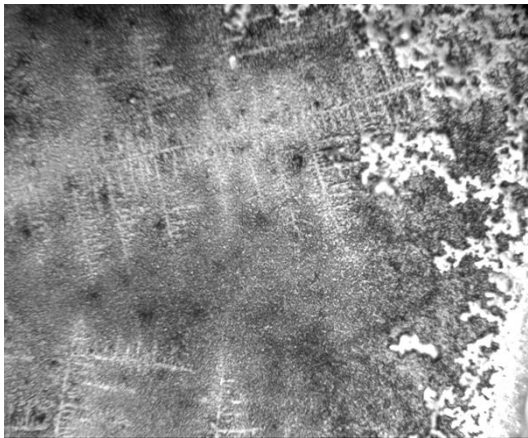


Рис.4.9 – Фотографія структурної будови кристалів на різних ділянках осаду краплі води з річки у вихідному стані, збільшеною у 10 разів

Рис.4.10 – Фотографія структурної будови кристалів на різних ділянках осаду краплі води з річки у вихідному стані, збільшеною у 40 разів

Аналіз вигляду кристалооптичної структури (рис. 4.11) проби води з річки, обробленою гідрокавітацією, (збільшено у 10 разів) та кристалооптичної структури (рис.4.12) тієї ж води (збільшено у 40 разів) показав, що спостерігається рівномірний розподіл та зрівноважена форма кристалів осаду.

Це пояснюється зниженням коефіцієнту поверхневого натягу, розривом водневих зв'язків, структуризацією води.

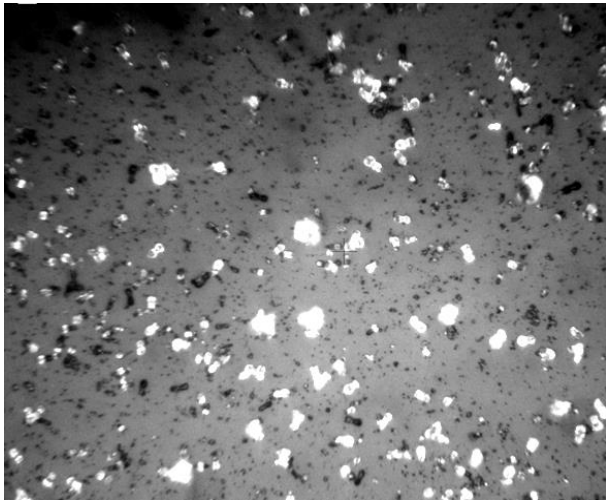


Рис. 4.11– Фотографія структурної будови кристалів на дільниці осаду краплі води з річки, обробленої протягом 20 хвилин кавітацією, збільшеною у 10 разів

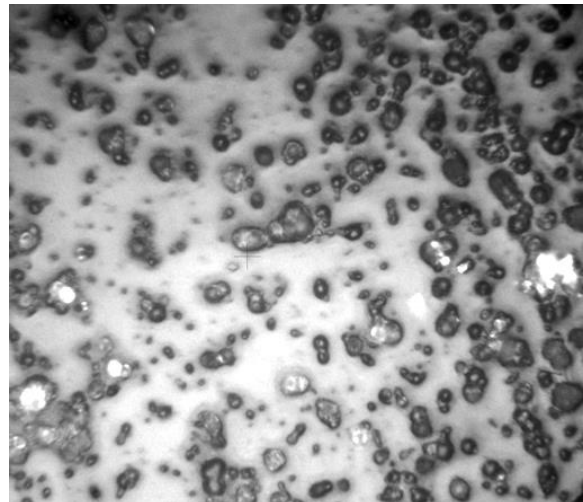


Рис. 4.12 – Фотографія структурної будови кристалів на дільниці осаду краплі води з річки, обробленої протягом 20 хвилин кавітацією, збільшеною у 40 разів

Крім цього можна провести кількісний аналіз забруднення води біологічними рештками, які виглядають на зразку як утворення світлого кольору, методом підрахунку кількості частинок на певній площі зразка.

Застосування способу кристалооптичного аналізу структурної будови води, ступеню її активації та ступеню забруднення біологічними рештками води, його чутливість та чіткість відтворення результатів технологічного впливу кавітації на воду підтвердило працездатність конструкції, запропонованої вібраційної машини.

Як показали результати експериментального дослідження [128,129] при застосуванні запропонованого способу можна швидко, якісно і кількісно проаналізувати структурну будову води та ступінь її активації, величину біологічного забруднення і наближення її по властивостям до більш якісного стану при застосування у різних технологіях.

4.4. Методика та особливості проектування вузлів ексцентрикового приводу вібраційної машини

Після визначення співвідношення геометричних параметрів співвідношення діаметру отвору у поршні до діаметра камери пульсації – від 0,06 до 0,1м та сили гідродинамічного тиску на поршень [119], вибору амплітуди (від 2 до 2,5 мм) та частоти коливань (від 16 до 20 Гц) розраховується діаметр шийки вала під ексцентрик.

В місці посадки ексцентрика на вал діє сила F :

$$F = F_{in} + F_{din}, \quad (4.1)$$

де $F_{in} = m \cdot A \cdot f$ – сила інерції, яка утворюється коливальним рухом;

A – амплітуда коливань;

f – частота коливань;

m – маса рухомих частин устаткування;

$F_{din} = P_{max} \cdot S$ – динамічна сила, що виникає внаслідок виникнення тиску P_{max} в камері пульсації, який діє на площу поршня S .

Проводиться розрахунок розміру вала під ексцентриком:

$$M_{32} = F \cdot L, \quad (4.2)$$

де L – довжина консолі вала під ексцентриком.

Діаметр вала під ексцентриком визначаємо за формулою:

$$d_e = \sqrt[3]{\frac{M_{32}}{0,1 \cdot [\sigma_{32}]}} \quad (4.3)$$

де $[\sigma_{32}] = 45$ МПа для Сталі 45.

Після розрахунку розмірів вала підбираються конструктивні параметри ексцентрика. Найменший розмір стінки ексцентрика, з точки зору технологічності виготовлення, приймається товщиною один мм. Тоді внутрішній діаметр підшипника можна визначити за залежністю:

$$d_{\text{вн}}^{\text{підш}} = d_{\text{кул}}^{\text{зов}} \geq d_{\text{вала}} + e + 1\text{мм}, \quad (4.4)$$

де $d_{\text{вн}}^{\text{підш}}$ – внутрішній діаметр підшипника;

$d_{\text{кул}}^{\text{зов}}$ – зовнішній діаметр ексцентрика;

$d_{\text{вала}}$ – діаметр вала під ексцентрика;

e – величина ексцентриситету.

Для поршня діаметром від 100 до 120 мм рекомендується вибрати діаметр повзуна від 10 до 12 мм. Вузол повзун-втулка необхідно змащувати консистентним мастилом.

Вісь, яка з'єднує повзун з шатуном, виготовляється індивідуально точінням у розмір, який отримується після одночасного розвірчування отворів у зборі повзуна з шатуном. Це робиться для зменшення втрати амплітуди коливань повзуна (відсутність зазору у з'єднанні) та шумових характеристик вузла.

Наступний етап розрахунку, з метою запобігання заклинювання та швидкого зношування вузла повзун-втулка, проводиться визначення довжини втулки l в залежності від конструктивного вибору діаметра повзуна d та для перевірки умов заклинювання вузла рекомендується користуватись приведеними нижче умовами (4.5, 4.6) [130].

Для визначення кута μ наведемо приклад його розрахунку застосувавши розрахункову схему представлену на рис.4.13.

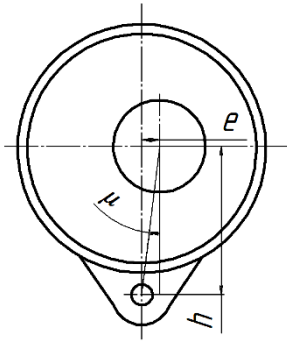


Рис. 4.13 – Схема розташування конструктивних параметрів для визначення кута μ

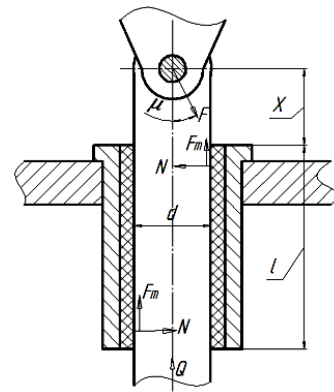


Рис. 4.14 – Схема сил для визначення довжини втулки повзуна в залежності від діаметра та кута μ

$$\operatorname{tg} \mu = \frac{e}{h}, \quad (4.5)$$

де e – величина ексцентриситету (від 2 до 2,5 мм);

h – величина відстані від осі валу до осі отвору повзуна.

У поступальній парі результуюча сила тертя F_m залежить не лише від матеріалів поверхонь, що труться, які враховуються коефіцієнтом тертя f , але й від точки прикладання та спрямовування сили і розмірів повзуна. При створенні сили дії на повзун Q сила F від ексцентрика, яка зсуває повзун у втулці та складає з віссю повзуна кут μ (див. рис.4.14), визначається за формулою [130]:

$$F = \frac{Q}{\cos \mu - f \cdot \sin \mu \left(1 + \frac{2x - f \cdot d}{l} \right)}, \quad (4.6)$$

де F – сила, яка діє від ексцентрика;

Q – сила, яка діє повздовж осі повзуна;

f – коефіцієнт тертя;

x – відстань від осі вісі ексцентрика до торця втулки;

l – довжина втулки;

μ – кут зсуву сили, яка діє від ексцентрика до осі повзуна,

і буде тим менше, чим більше довжина l втулки, і чим менше розмір d та відстань x . Якщо будуть виконуватися умови:

$$\operatorname{tg}\mu = \frac{1}{f\left(1 + \frac{2x - f \cdot d}{l}\right)} \quad \text{або} \quad x \geq \frac{1}{2} \frac{1}{f \cdot \operatorname{tg}\mu} - 1 + \frac{f \cdot d}{l}, \quad (4.7)$$

то повзун заклинить, і його рух стане неможливим.

Після визначення розмірів повзуна: діаметра та довжини перевіряємо пару повзун – напрямна втулка на стійкість проти зношування за формулою:

$$P = \frac{F_{\max}}{d \cdot l} \leq [P], \quad (4.8)$$

де F_{\max} – максимальна сила, що зсуває, Н;

d – діаметр повзуна, мм ;

l – довжина втулки, мм;

$[P]$ – допустиме значення тиску для втулки з фторопласту, (від 2,5 до 25 МПа).

Ущільнення поршня з камерою пульсації здійснюється за допомогою гумових кілець V – подібного січення, для цього поршень робиться збірним. Для гасіння паразитних коливань необхідно застосовувати масивну основу машини та встановлювати її на вібраційні опори. Ексцентриковий привод з повзуном необхідно закривати кожухом.

4.5. Обґрунтування параметрів компенсаційної пружної системи вібраційної машини з ексцентриковим приводом

Дослідження, пов'язані з питаннями підвищення ефективності захисту від негативного впливу коливань свідчать про те, що захист машинних агрегатів за допомогою пружинних гасників є одним з обов'язкових елементів технічної конструкції машин. Ефективність пружинних гасників пов'язана насамперед з

наявним потенціалом для відтворення необхідної динамічної характеристики пристрою в реальному режимі часу, що дозволяє запобігти руйнуванню елементів машини. Основна мета захисту від негативного прояву коливань полягає в ізоляції визначеного об'єкту від негативного впливу джерела коливань за допомогою пружних елементів [133,134].

Проте паразитарні коливання, що виникають при роботі приводу в момент проходження ексцентриком двох бокових положень, і спричинені появою сил інерції від нерівноваженої маси шатуна, у свою чергу, негативно впливають на роботу вузла шток-втулка і призводять до його прискореного зношування. Для зменшення негативного впливу сил інерції та поліпшення динамічних характеристик машини в конструкцію машини введена компенсаційна пружна система [133,134].

Для аналізу параметрів пружної системи запропонованої конструкції вібраційної машини розроблена її принципова схема, яка представлена на рис.4.15.

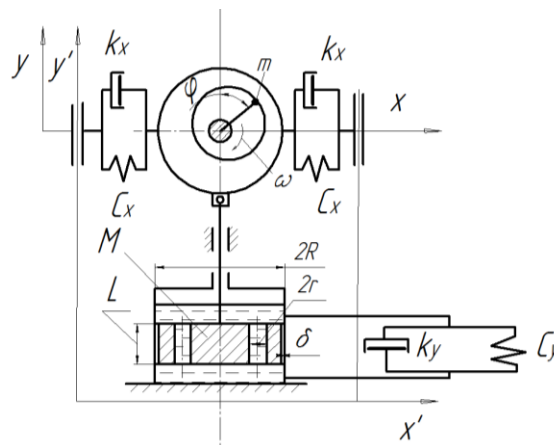


Рис. 4.15 – Принципова схема вібраційної машини з ексцентриковим приводом: m – маса ексцентрикового вузла; C_x – жорсткість пружної системи вібромашини по осі x ; C_y – жорсткість газорідинної суміші по осі y ; k_x – коефіцієнт здатності до демпфування пружної системи по осі x ; k_y – коефіцієнт здатності до демпфування газорідинної суміші по осі y ; R – радіус поршня; L – глибина отвору у поршні; r – радіус отвору в поршні; δ – зазор між поршнем та циліндром

Для дослідження динаміки роботи машини і аналізу режимів роботи її проводу необхідно визначити параметри пружної системи, а саме: жорсткість пружної системи C_x , її конструктивні параметри та коефіцієнт здатності до демпфування k_x .

З метою встановлення параметрів компенсаційної пружної системи вібраційної машини був проведений кінематичний та динамічний аналіз роботи її ексцентрикового приводу [133,134].

Для цього розроблена кінематична схема ексцентриково-шатунного механізму приводу машини (рис.4.16) із визначенням положення центрів мас його ланок та створені їх 3D-моделі у середовищі SolidWorks (рис.4.17 і рис.4.18).

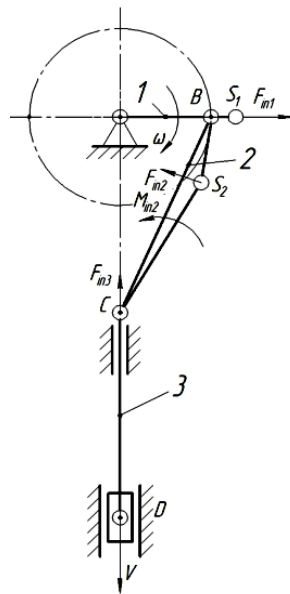


Рис. 4.16 – Кінематична схема ексцентриково-шатунного механізму приводу машини: 1 – ексцентрик; 2 – шатун; 3 – повзун

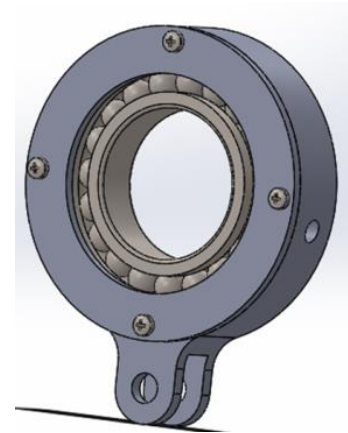


Рис. 4.17 – 3D-модель шатуна (ланка 2)

Наступним етапом аналізу механізму було встановлення для його ланок маси, координат центра мас та моментів їх інерції в середовищі SolidWorks. На

рис.4.19 представлені результати цього розрахунку для шатуна як найбільш важливої ланки ексцентриково-шатунного механізму.

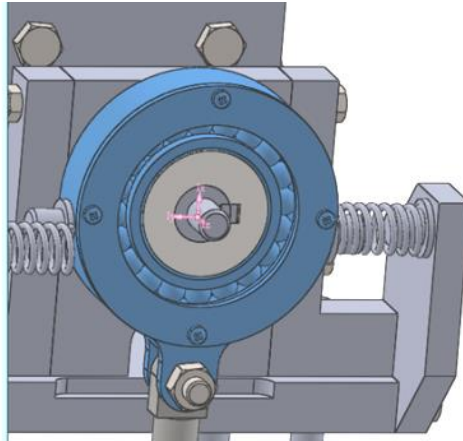


Рис.4.18 – 3D-модель вузла шатуна

Массовые характеристики: выбранные компоненты		
Система координат: -- по умолчанию --		
Центр тяжести и моменты инерции выводятся в координатной системе Сборки:		
* Включает массовые характеристики одного или нескольких скрытых компонентов		
Масса = 383.19159 граммов		
Объем = 71849.73051 кубические миллиметры		
Площадь поверхности = 41010.41318 квадратных миллиметров		
Центр тяжести: (миллиметры)		
X = 0.94099		
Y = -3.18603		
Z = -0.10887		
Основные оси инерции и основные моменты инерции: (граммов * квадратные миллиметры)		
центр тяжести		
Ix = (0.01852, 0.99981, 0.00600)		Px = 253560.64635
Iy = (-0.99983, 0.01852, 0.00000)		Py = 314906.73871
Iz = (-0.00011, -0.00600, 0.99998)		Pz = 536560.05571
Моменты инерции: (граммов * квадратные миллиметры)		
Определяются в центре тяжести и выравниваются относительно системы координат		
Ixx = 314885.70446	Ixy = 1135.65486	Ixz = 31.46433
Iyx = 1135.65486	Iyy = 253591.87705	Iyz = 1698.38085
Izx = 31.46433	Izy = 1698.38085	Izz = 536549.85926
Моменты инерции: (граммов * квадратные миллиметры)		
Вычисляется с помощью системы координат вывода.		
Ixx = 318779.94891	Ixy = -13.15792	Ixz = -7.79147
Iyx = -13.15792	Iyy = 253935.71747	Iyz = 1831.29493

Рис. 4.19 – Результати розрахунку координат центра маси вузла шатуна та моментів інерції в середовищі SolidWorks

Окрім того, аналітичним методом з використанням програмного продукту Mathcad для шатуна визначені швидкості, прискорення, кутова

швидкість, а також величина та напрямок дії сили інерції. Для виконання цих розрахунків був створений масив постійних та змінних величин.

Як сталі величини приймаємо:

$$m_1 := 0.115 \quad m_2 := 0.383 \quad m_3 := 2.054 \quad \frac{1}{m} := 0.054$$

$$J_{S1} := 0.002 \quad J_{S2} := 0.031 \quad \varphi_0 := 0 \quad \frac{N}{mm} := 36 \quad ,$$

як змінні:

$$r := 0.001 \quad l_{AS1} := 0.00108 \quad y_{S2.fi90} := 0.00446$$

$$\omega_1 := 400 \quad a_2 := 0.00094$$

де r – зміщення кривошипа (прийняті значення 1, 1,5 і 2мм);

ω – частота обертання кривошипа (прийняті значення 400, 600, 800 і 1000 об/хв.).

Початкове положення кривошипа прийнято для випадку, коли кривошип знаходиться в крайньому правому положенні.

Координати центра мас шатуна визначені із використанням методу замкнених векторних контурів за формулами:

- координата центру мас по осі X

$$x_{S2}(\varphi_1) := \frac{(a_2 \cdot b_2 \cdot \cos(\varphi_1))}{\sqrt{b_2^2 \cdot \cos(\varphi_1)^2 + a_2^2 \cdot \sin(\varphi_1)^2}}; \quad (4.9)$$

- координата центра мас по осі Y

$$y_{S2}(\varphi_1) := \frac{a_2 \cdot b_2 \cdot \sin(\varphi_1)}{\sqrt{b_2^2 \cdot \cos(\varphi_1)^2 + a_2^2 \cdot \sin(\varphi_1)^2}} - y_{S2.fi90} + r \quad . \quad (4.10)$$

Аналоги відповідних швидкостей та прискорень точок шатуна визначені за формулами:

- аналог кутової швидкості шатуна

$$\dot{\varphi}_2 = \frac{d\varphi_2}{d\varphi_1}; \quad (4.11)$$

- аналог кутового прискорення шатуна

$$\varphi_2'' = \frac{d^2 \varphi_2}{d\varphi_1^2}; \quad (4.12)$$

- аналог прискорення центру мас шатуна

$$s_{S2}'' = \sqrt{x_{S2}''^2 + y_{S2}''^2}. \quad (4.13)$$

- кутове прискорення шатуна

$$\varepsilon_2 = \omega_1^2 \varphi_2''. \quad (4.14)$$

Сили та моменти сил інерції, що діють на шатун механізму, визначені за формулами:

- сила інерції шатуна

$$F_{in2} = m_2 a_{S2}; \quad (4.15)$$

- момент інерції шатуна

$$M_{in2} = J_{S2} \varepsilon_2 \quad (4.16)$$

За результатами розрахунків були побудовані: траєкторія руху центра мас шатуна, графік зміни напрямку сили інерції та залежності сили інерції і моменту інерції шатуна від кута повороту ексцентрика (рис.4.20 - рис.4.23).

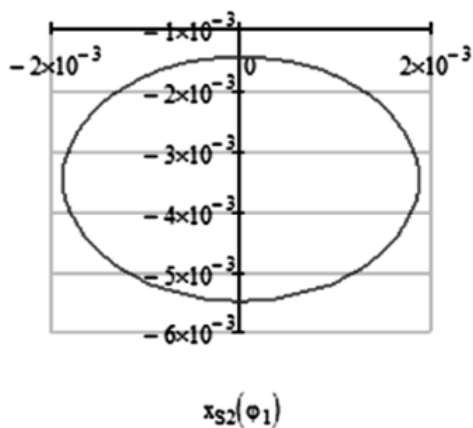


Рис. 4.20 – Траєкторія руху центра мас шатуна

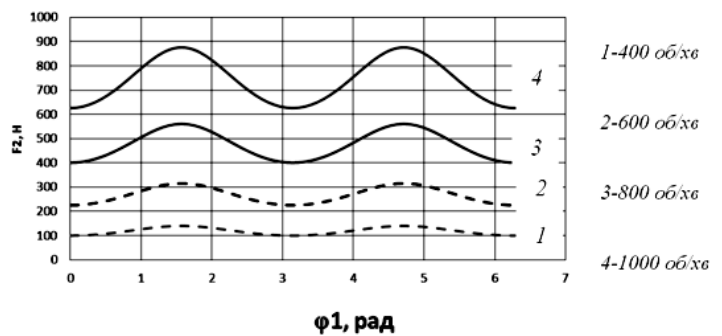


Рис. 4.21 – Графік зміни сили інерції шатуна від кута повороту ексцентрика φ_1 з ексцентриситетом $r = 2$ мм при різних частотах обертання ротора електродвигуна

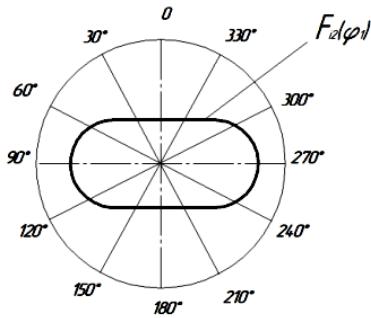


Рис. 4.22 – Графік зміни напрямку сили інерції шатуна від кута повороту кривошипа

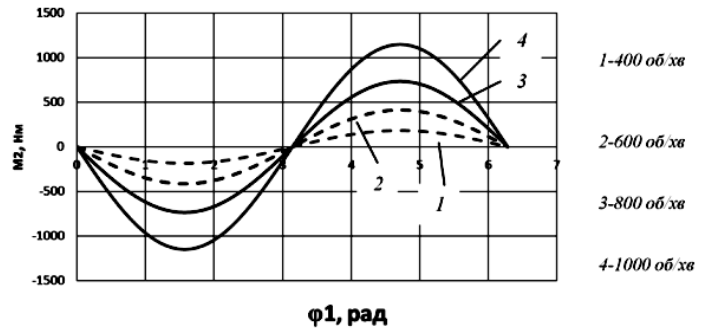


Рис. 4.23 – Графік зміни моменту сили інерції шатуна від кута повороту ексцентрика з ексцентриситетом $r = 2$ мм при різних частотах обертання ротора електродвигуна

З графіка на рис. 4.21 знайдемо максимальну величину сили інерції шатуна, яка становить $F_2 = 561$ Н. Для цього значення сили інерції проведемо розрахунок силових та конструктивних параметрів пружного елемента – циліндричної гвинтової пружини (див. рис.4.18).

Діаметр дроту пружини визначаємо за формулою:

$$d = \sqrt[3]{\frac{8kF_2 D_{сер}}{\pi\tau}} = \sqrt[3]{\frac{8 \cdot 1,2 \cdot 6,15 \cdot 13,2}{3,14 \cdot 750 \cdot 0,5}} = \sqrt[3]{0,6615} = 1,2 \text{ мм}, \quad (4.17)$$

де $D_{сер}$ – середній діаметр пружини, який приймаємо, виходячи із конструктивних розмірів машини, $D_{сер} = 13,2$ мм;

k – коефіцієнт кривизни витків, який приймаємо із врахуванням індексу пружини; якщо $i > 8$, то $k = 1,1 \dots 1,2$;

τ – розрахункове значення напружень кручення, яке приймають із міркувань $\tau = (0,5 \dots 0,8) [\tau_k]$, де $[\tau_k]$ – допустимі напруження для пружин із сталі 60С2, $[\tau_k] = 750$ МПа;

$F_2 = 6,149$ Н – сила стиснення пружини при робочій деформації, яка відповідає максимальній величині сили інерції шатуна.

Зовнішній діаметр пружини (рис.4.24) визначаємо як:

$$D_{зов} = D_{сер} + d = 13,2 + 1,2 = 14,4 \text{ мм}, \quad (4.18)$$

де d – діаметр дроту пружини; $D_{сер}$ – середній її діаметр.

Внутрішній діаметр пружини визначаємо як:

$$D_{вн} = D_{сер} - d = 13,2 - 1,2 = 12 \text{ мм}. \quad (4.19)$$

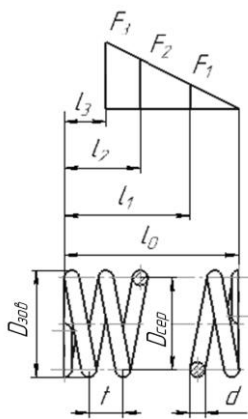


Рис. 4.24 – Основні параметри пружини

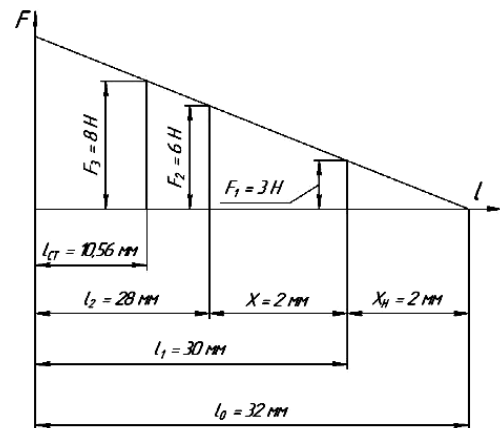


Рис. 4.25 – Характеристика пружини

Максимальну величину стиснення пружини у змонтованому стані X_k визначаємо за формулою:

$$X_k = \frac{X \cdot F_2}{F_2 - F_1} = \frac{2 \cdot 6,1}{6,1 - 3,05} = 4 \text{ мм}, \quad (4.20)$$

де X – хід пружини в робочому стані, $X = 2$ мм (див. рис.4.25);

F_2 – сила пружини при робочій деформації, $F_2 = 6,149$ Н;

F_1 – сила пружини при попередній деформації, $F_1 = 0,5 \cdot F_2 = 0,5 \cdot 6,1 = 3,05$ Н.

Тоді число робочих витків:

$$n = \frac{Gd^4 X_k}{8F_2 D_{сер}^3} = \frac{7,85 \cdot 10^4 \cdot 1,2^4 \cdot 4}{8 \cdot 6,1 \cdot 13,2^3} = 6, \quad (4.21)$$

де G – модуль зсуву для пружинної сталі, прийнято $G = 7,85 \cdot 10^4$ МПа ;

Повне число витків пружини:

$$n_1 = n + n_2 = 6 + 3,0 = 9, \quad (4.22)$$

де n – число робочих витків;

n_2 – число доповнюючих опорних витків, приймаємо $n_2 = 3$.

Коефіцієнт жорсткості пружини визначаємо як:

$$c_x = \frac{F_2 - F_1}{X} = \frac{6,149 - 3,05}{2} = 1,55 \text{ Н / мм}, \quad (4.23)$$

де X – робочий хід пружини, $X = 2$ мм;

$F_2 = 6,149$ Н – сила стиснення пружини при робочій деформації;

F_1 – сила пружини при попередній деформації;

Тоді робоча деформація пружини визначиться як:

$$S_2 = \frac{F_2}{c_x} = \frac{6,149}{1,55} = 3,97 \text{ мм}. \quad (4.24)$$

Демпфуюча здатність пружини k_x визначається як потенціальна енергія, яку поглинає пружина за один цикл, тобто:

$$k_x = \xi \cdot \frac{F_2 \cdot S_2}{X} = 0,6 \cdot \frac{6,149 \cdot 3,97}{2} = 7,324 \text{ Н} \cdot \text{м}, \quad (4.25)$$

де ξ – коефіцієнт поглинання енергії за цикл стиснення-розтягування пружини, $\xi = 0,6$ [133].

4.6. Визначення потужності електродвигуна вібраційної машини

Для вибору типу електродвигуна та його потужності застосовується результати по визначенню максимального тиску у камері пульсації (рис.3.2-рис.3.4) з урахуванням раціональних частот коливань приводу (див. розділ 3) $f = 20$ Гц (1200 об/хв.).

Розрахунок сили на штокові поршня проводимо за формулою:

$$Q = \frac{\pi \cdot D_n^2}{4} P, \quad (4.26)$$

де D_n^2 – діаметр поршня, мм;

P – тиск у камері пульсації, МПа (вибираємо з рис.3.2-рис.3.4).

Розрахунок крутного моменту на валу ексцентрика проводимо за формулою:

$$M_{кр} = Q \cdot A, \quad (4.27)$$

де Q – сила на штокові поршня, Н;

A – плече, на яке прикладена сила від штока, дорівнює амплітуді коливань, м.

Потужність електродвигуна розраховуємо за формулою:

$$N = \frac{M_{кр} \cdot n}{9549} \text{ кВт}. \quad (4.28)$$

де n – число обертів двигуна.

4.7. Загальна методика проектування вібраційної машини поршневого типу для знезаражування та зміни властивостей води

Виходячи з того, що застаріли водогони та трубопроводи не дають достатнього ступеню подачі знезараженої (хлором) води до споживача,

розвинута вторинна патогенна флора у них потребує додаткового знезаражування та очищення при безпосередньому вживанні.

При проектуванні вібраційних машин з ексцентриковим приводом необхідно проводити конструктивні розрахунки окремих вузлів та дотримуватись певних взаємозв'язків параметрів конструкції робочого органу та режимів роботи вібраційного приводу машини.

Ексцентриковий привод найбільш раціонально використовувати в низькочастотних вібраційних машинах, а також в установках із фіксованою амплітудою коливань. Цей тип приводу здатний створювати великі збуджуючі зусилля при невисоких частотах коливань.

На рис.4.26 показана схема вібраційної машини з позначенням основних вузлів, які потребують конструктивних розрахунків для досягнення працездатності при її роботі: 1 – вузол ексцентрикового вібратора, 2 – вузол втулки повзуна (штока).

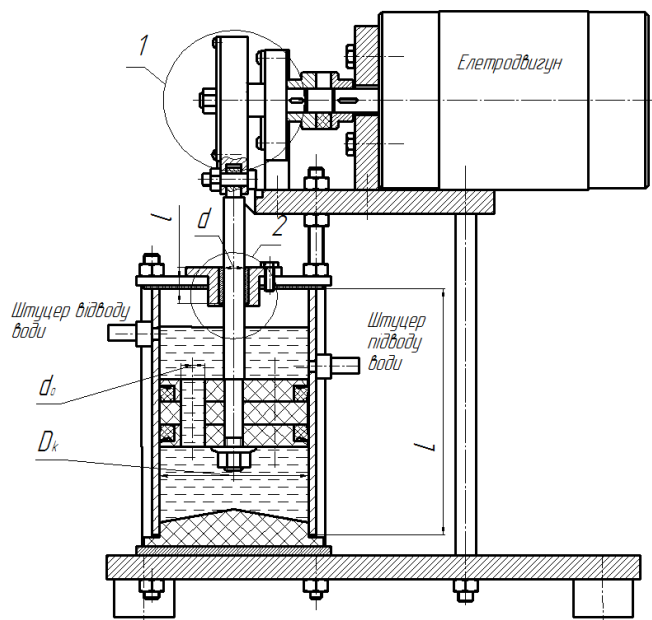


Рис. 4.26 – Схема вібраційної машини: 1 – ексцентриковий вібратор;
2 – шатунний вузол; d – діаметр повзуна; D_k – діаметр камери пульсації;
 L – довжина камери пульсації; l – довжина втулки під шток; d_o – діаметр отвору
у поршні

Призначення вібраційної машини: знезаражування та покращення якості питної води, отриманої з водопроводу та колодязя. Отримані результати можуть бути враховані при розробленні технологій та конструкцій вібраційного обладнання для знезараження та покращення якості питної води з природних джерел, в тому числі з підземних вод, при індивідуальному та колективному водокористуванні у невеликих населених пунктах, окремих господарствах, багатоквартирних будинках, а також на дачних ділянках.

Характеристика основних параметрів вібраційної машини наведено у таблиці 4.1.

Табл.4.1

Основні параметри вібраційної машини поршневого типу

№ п.п	Показник	Величина показника
1	Габарити вібраційної машини, мм	600 x 600 x 400
2	Продуктивність знезаражування, л/год.	40
3	Потужність електродвигуна, Вт	250-300
4	Частота коливань приводу, Гц	18 - 23
5	Амплітуда коливань приводу, мм	2
6	Діаметр камери пульсації, мм	100
7	Діаметр отвору у поршні, мм	6-8
8	Довжина камери пульсації, мм	400-500
9	Ступінь знезаражування, %	80

Послідовність проектування

1. На першому етапі проектування вибирають конструктивні розміри поршня камери пульсації D_k від 100 до 120 мм та діаметр отвору у поршні d_o від 6 до 8 мм. Довжину камери пульсації L приймаємо від 400 до 500 мм.

2. З графіка рис.3.6 вибираємо раціональний діапазон частоти коливань приводу від 18 до 23 Гц. та амплітуду коливань поршня $A = 0,002$ м.

3. Проводимо розрахунок крутного моменту та потужності електродвигуна за формулами підрозділу 4.6.

4. Далі проводимо визначення конструктивних параметрів (рис. 4.26) вузла ексцентрикового вібратора та вузла втулки повзуна (штока) за формулами підрозділу 4.4.

5. Проводимо розрахунок пружної системи вібраційної машини за методикою та формулами підрозділу 4.5.

6. Створюється 3-D модель вібраційної машини у програмному продукті SolidWorks, з якої легко отримати робочі креслення деталей.

На рис.4.26 показано місця встановлення штуцерів для підводу та відводу рідинного середовища. Вхідний кран для регулювання подачі водного середовища не вказано.

Вібраційна машина може бути виконана багато каскадного компонування з метою підвищення продуктивності [101].

Висновки до розділу 4

1. У результаті проведених експериментальних досліджень по знезаражуванню річкової води встановлено, що після оброблення кавітацією 20 хвилин, деякі види колоній бактерій знищуються повністю, а загальна кількість колоній бактерій зменшується до 80%.

2. У результаті експериментальних досліджень зміни показників водопровідної води, обробленої кавітацією у вібраційній машині поршневого типу, встановлено, що після оброблення за період 20 хвилин, збільшується концентрації вільних іонів водню у воді, відповідно показник рН збільшується до 8,4 рН, зменшується показник ORP, що говорить про насичення киснем рідинного середовища, зменшення показника TDS 420 до 330 одиниць говорить про зменшення солевого складу, а в цілому про поліпшення властивостей води.

3. Запропоновано узагальнену методологію для розрахунку конструктивних параметрів та вибору раціональних режимів роботи приводу вібраційної машини для впливу на властивості води та її знезаражування.

4. У результаті кінематичного та динамічного аналізу параметрів ексцентрикового приводу вібраційної машини встановлено величини силових та конструктивних параметрів компенсаційної пружної системи вібраційної машини, а саме: жорсткості пружної системи C_x та її здатності до демпфування k_x . Ці параметри можуть бути використані у подальшому при конструюванні та розрахунках основних параметрів, вибору режимів роботи приводу вібраційної машини.

5. Наведено методику визначення потужності електродвигуна приводу вібраційної машини.

6. Застосування вібраційної машини поршневого типу призводить до зміни основних властивостей води та підтверджує її працездатність з метою попереднього безреагентного знезаражування.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішена актуальна науково-технічна задача машинобудування, яка має важливе народногосподарське значення, що полягає у розробленні вібраційного обладнання для кавітаційного знезаражування і зміни властивостей води з визначенням його конструктивних параметрів і раціональних режимів роботи приводу та створенню методики його розрахунків.

Більш детально основні результати і висновки сформульовані наступним чином:

1. Проведений аналіз стану наукових досліджень застосування вібраційних технологій у процесах знезаражування та зміни властивостей води показав, що кавітаційна обробка рідин, має різноманітні технологічні можливості в біологічному знезаражуванні води і постає доцільність не лише у поглибленому вивченні та дослідженнях технологічних можливостей кавітаційної обробки, а і у напрямі створення конструкцій вібраційних машин, що реалізують її можливості, спроможних органічно поєднати ефективність способів збурення кавітації.

2. Аналіз сучасних конструкцій обладнання та машин для кавітаційного впливу на рідинне середовище показав переваги і недоліки різних конструкцій обладнання і вібраційних приводів. Найбільш ефективним приводом вібраційної машини визначено привод ексцентрикового типу, у якому встановлюється жорсткий зв'язок амплітуди коливань з частотою коливань. Застосування такого приводу дає можливість здійснювати жорсткий керований вплив на процес виникнення кавітаційних порожнин з утворенням кавітаційних бульбашок шляхом підбору конструктивних параметрів машини і режимів роботи приводу. Результати аналізу літературних джерел і патентного огляду дали можливість сформулювати мету та задачі для досягнення поставленої мети.

3. При аналізі експериментальних досліджень кавітації в низькочастотних

звукових полях була виявлена аналогія з фізико-хімічними ефектами між низькочастотній і ультразвуковій кавітації, а основними параметрами, які впливають на інтенсивність процесу є значення максимального тиску P_{max} в порожнині бульбашки та значення частотного характеру коливань рідини.

4. Запропоновано критерій оптимальності параметра максимальної продуктивності вібраційної машини поршневого типу, а саме: наявність максимального тиску робочого тіла у камері пульсації при максимальному тиску рідини на виході з отвору у поршні $G_{max} = F(P_{max\text{ роб.т.}} \Rightarrow P_{max\text{ стр.}})$.

5. Побудовано аналітичну модель коливального процесу робочого середовища у вібраційній машині та отримано рівняння залежності максимального тиску у камері пульсації від конструктивних параметрів та режимів роботи приводу машини. Результатами аналізу стали графічні залежності та рекомендації по вибору величин цих параметрів.

6. У результаті проведених експериментальних досліджень сили удару струменю з отвору у поршні, встановлено залежності впливу амплітуди та частоти на силу удару струменя в камері пульсації розміром 0,1 м. За умови збереження максимального перемішування водного середовища у ємкості машини та продуктивності рекомендовано використовувати амплітуду коливань 0,002 м.

7. Теоретично та експериментально встановлено раціональні частотні границі роботи вібраційного приводу машини, які лежать у межах від 18 до 23Гц при амплітуді коливань 0,002м, та визначено співвідношення її конструктивних параметрів: при діаметрі поршня 0,1м рекомендовано застосовувати діаметр отвору у поршні від 0,006 до 0,008 м.

8. Дослідження по візуалізації процесу зворотно-поступального протікання рідини крізь отвір у поршні показали, що вже при незначних частотах його коливань від 10 Гц проявляється ефект появи кавітаційних каверн у отворі, кавітаційного росту та сплескування парогазових пухирців повітря у камері пульсації вібраційної машини.

9. Отримані залежності витрат потужності привода робочого органа вібраційної машини для знезаражування води від частоти коливання поршня показали, що енерговитрати на процес знезаражування та зміни властивостей потребують від 100 до 175 Вт, що говорить про енергоощадність в порівнянні з іншими видами обладнання, призначеного для знезаражування.

10. Одержав подальшого розвитку метод оцінки зміни основних властивостей води та експериментально встановлено, що після оброблення за період 20 хвилин, збільшується концентрації вільних іонів водню у воді, відповідно показник рН збільшується до 8,4 рН, зменшується показник ORP, що говорить про насичення киснем рідинного середовища, зменшення показника TDS 420 до 330 одиниць говорить про зменшення солевого складу, а в цілому про поліпшення властивостей води

11. Експериментально досліджено процес інактивації патогенної флори води вібраційною кавітаційною обробкою та встановлено зниження росту колоній бактерій до 80%.

12. У результаті кінематичного та динамічного аналізу параметрів ексцентрикового приводу вібраційної машини встановлено величини силових та конструктивних параметрів компенсаційної пружної системи вібраційної машини, а саме: жорсткості пружної системи C_x та її здатності до демпфування k_x . Ці параметри можуть бути використані у подальшому при конструюванні та розрахунках основних параметрів, вибору режимів роботи приводу вібраційної машини.

13. Запропоновано узагальнену методологію для розрахунку раціональних конструктивних і технологічних параметрів вібраційної машини для впливу на властивості води та її знезаражування. Отримані результати можуть бути враховані при розробленні технологій та конструкцій вібраційного обладнання для очищення стічних вод промислових, комунальних підприємств, тваринницьких комплексів тощо.

14. Технологію кавітаційної обробки водних середовищ низькочастотними коливаннями, конструктивні схеми вібраційних машин, оптимальні

співвідношення конструктивних параметрів та рекомендації по вибору раціональних режимів роботи приводу передано Хмельницькому НДЕКЦ, Надвірнянському «Коопзаготпромторг» до впровадження.

15. Наукові положення, 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».

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Запольський А. К. Водопостачання, водовідведення та якість води. Підр. К. Вища школа, 2005. 672 с.
2. Физика и техника мощного ультразвука: в 3-х кн. / ред. Л.Д. Розенберг. М. Наука, 1967-1970 Кн. 3. Физические основы ультразвуковой технологии. 1970. 687 с.
3. Ельпинер И. Е. Биофизика ультразвука. М. Наука, 1973. 384 с.
4. Пирсол И. Кавитация : пер. с англ. Ю.Ф. Журавлев. под ред. с предисл. и дополнением Л. А. Зпштейна. М. Мир, 1975. 92 с.
5. Шутилов В. А. Основы физики ультразвука. Учеб. пособие. Л. Изд-во Ленингр. ун-та, 1980. 280 с.
6. Новицкий Б. Г. Применение акустических колебаний в химико-технологических процессах (Процессы и аппараты химической и нефтехимической технологии). М. Химия, 1983. 192 с.
7. Маргулис М. А. Основы звукохимии (химические реакции в акустических полях). Учеб. пособие для хим. и хим.-технол. спец. вузов. М. Висш. шк., 1984. 272 с.
8. Агранат Б. А., Дубровин, М. Н., Хавский Н. Н. Основы физики и техники ультразвука. Учеб. пособие для вузов. М. Высш. шк., 1987. 352 с.
9. Федоткин И. М. Немчин. А. Ф. Использование кавитации в технологических процессах. Киев: Вища школа, 1984. 68 с.
10. Ганиев Р. Ф., Кобаско Н. И., Кулик В. В. Колебательные явления в многофазных средах и их использование в технологии / под ред. Р. Ф. Ганиева. К. Техника, 1980. 142 с.
11. Hydrodynamic cavitation as a novel approach for wastewater treatment in woodfinishing industry / Badve M., Gogate P., Pandit A., Csoka L. *Separation and purification technology*. 2013. Vol. 106. P. 15-21.
12. Inactivation of microorganisms by low-frequency high-power ultrasound: A simple model for the inactivation mechanism / Gao S., Lewis G., Ashokkumar M.,

Hemar Y. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2014. № 21. P. 454-460.

13. Hydrodynamic cavitation reactor for efficient pretreatment of lignocellulosic biomass. / Nakashima K., Ebi Y., Shibasaki-Kitakawa N., Soyama H., Yonemoto T. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2016. Vol. 55 (70). P. 1866-1871.

14. Doosti M., Kargar R., Sayadi M. Water treatment using ultrasonic assistance: A review. *Proceedings of the International Academy of Ecology and Environmental Sciences*. 2012. №2. P. 96-110.

15. Dyussenov K. The Using of Controlled Cavitation Processes in Some Engineering and Agricultural Application. *Universal Journal of Engineering Science*. 2013. № 1. P. 89-94.

16. Madhu G., Rajanandam K., Thomas Ashly. Cavitation Techniques for Wastewater Treatment: A Review. *The IUP Journal of Chemical Engineering*. 2010. №. 3. P. 58-79.

17. Comparison between Hydrodynamic and Acoustic Cavitation in Microbial Cell Disruption / M. Capocelli, M. Prisciandaro, A. Lancia, D. Musmarra. *Chemical Engineering Transaction*. 2014. Vol. 38. P. 13-18.

18. Caupin F., Herbert E. Cavitation in water: a review / *C.R. Physique* 7. 2006. P. 1000 - 1017.

19. Al-Hashimi A., Mason T., Joyce E. Combined Effect of Ultrasound and Ozone on Bacterianin Water. *Environmental Science Technology*. 2015. Vol. 49. Issue 19. P. 11697-11702.

20. Gogate P., Tayal R., Pandit A.. Cavitation: a technology on the horizon. *Current science*. 2002. №.1. P. 35-43.

21. Effectiveness of ultrasound for the destruction of Mycobacterium sp. strain (6PY1) / Bsoula A., Magnina J., Commenges-Bernolea N., Gondrexona N., Willisonb J., Petriera C. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2010. №.1. P. 106-110.

22. Herbert E. Balibar S., Caupin F. Cavitation pressure in water. *Physical Review*. 2006. №74. P. 1 - 22.

23. Kesari K., Behari J. Ultrasonic impact on bacterial population in sewage

sample. *International Journal of Environment, and Waste Management*. 2008. №3. P. 233 - 244.

24. Remediation and disinfection of water using jet generated cavitation/ K. Kalumuck, G. Chahine, C. Hsiao, J. Choi. *Fifth International Symposium on Cavitation*. 2003. November 1-4. P. 1-8.

25. Upadhyay K. Khandate A. Ultrasound Assisted Oxidation Process for the Removal of Aromatic Contamination from Effluents: A Review . *Universal Journal of Environmental Research Technology*. 2012. Vol. 2. Issue 6. P. 458-464.

26. Jess C., Salveson A. Emerging Disinfection Technologies. *Florida Water Resources Journal*. 2006. P. 4-6.

27. Water and Wastewater Disinfection by Ultrasound Irradiation - a Critical Review / Naddeo V., Cesaro A., Mantzavinos D., Fatta-Kassinos P., Belgiorno V. *Global Nest Journal*. 2014. Vol. 16. N3. P. 561-577.

28. Uses of ultrasound in the biological decontamination of water./ Mason T., Duckhouse H., Joyce E., Lorimer J. *WCU 2003*, Paris, September 7-10. P. 423-426.

29. Mohammad H. Effectiveness of ultrasound on the destruction of E. coli. *American Journal of Environmental Sciences*. 2005. №1. P. 187-189.

30. Hendricks David W. Water treatment unit processed: physical and chemical. *CRC Press*, 2006. P.1266.

31. Trussel R. Rhodes, Kerry J. Howe, David W Hand. MWHs Water Treatment Principles and Desing. *John Wiley & Sons*, 2012. P. 1920.

32. Хірна Т. В. Ефективність та відповідність гігієнічним вимогам фізико-хімічних способів знезаражування води (Огляд літератури). *Анали Мечнівського Інституту*. №1. 2006. С. 1-11.

33. Інноваційні нанотехнології активації і знезаражування води та вібраційне обладнання: монографія / Р.І. Сілін та ін. Хмельницький: ХмЦНІІ, 2013. 252 с.

34. Кавітаційна обробка та її вплив на склад води / Р.І. Сілін, А.І. Гордєєв, В.В. Третько, І.І. Сорока. *Вісник ТУП*. №3. 2002. С. 253-257.

35. Сілін Р. І., Гордєєв А. І. Вібраційні коливання та їх вплив на склад води. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2004. №3 (35). С. 104-108.
36. Сілін Р. І., Гордєєв А. І. Вібраційні машини для зміни властивостей води. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2013. №4 (72). С. 123-128.
37. Вітенько Т. М. Гідродинамічна кавітація у масообмінних хімічних і біологічних процесах : монографія. Тернопіль, 2009. 224 с.
38. Вітенько Т. М. Механізм та кінетичні закономірності інтенсифікуючої дії гідродинамічної кавітації у хіміко-технологічних процесах : автореферат дис. на здобуття наукового ступеня д-ра техн. наук : 05.17.08. Львів, 2010. 36 с.
39. Шевчук Л. І., Старчевський В. Л. Кавітація. Фізичні, хімічні, біологічні та технологічні аспекти: монографія. Л. Видавництво Львівської політехніки, 2014. 376 с.
40. Шевчук Л. І., Афтаназів І. С., Строган О. І. Вібраційний електромагнітний кавітатор резонансної дії. *Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні. Український міжвід. наук.-техн. зб. Нац. ун-ту «Львівська політехніка»*. Вип. №45. 2011. С. 374-380.
41. Низькочастотні віброрезонансні кавітатори: монографія / Л.І. Шевчук, І.С. Афтаназів, О.І. Строган, В.Л. Старчевський. Львів: Видавництво Львівської політехніки. 2013. 173 с.
42. Строган О. І. Вібраційні електромагнітні пристрої резонансної дії для активації рідинних субстанцій /Дисертація канд. тех. наук. Львів: НУ «Львівська політехніка», 2015. 214 с.
43. Некоз О. І., Літвіненко О. А., Логвінський Р. В. Кавітаційна технологія очищення стічних вод від токсичних речовин. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2012. №2 (66). С. 112-115.
44. Кнэпп Р. Дейли Дж. Хеммит. Ф. Кавитация : пер. с англ. / Р. Кнэпп, Дж. Дейли, Ф. Хеммит. М. Мир, 1974. 687 с.
45. Эпштейн Л. А. Возникновение и развитие кавитации. Труды ЦАГИ. 1959. № 655. С. 41-118.

46. Арзуманов Э. С. Кавитация в местных гидравлических сопротивлениях. М. Энергия, 1978. 304 с.
47. Рождественский В. В. Кавитация. Л. Судостроение, 1977. 240 с.
48. Перник А. Д. Проблемы кавитации. 2-е изд. Л. Судостроение, 1966. 248 с.
49. Блехман И. И., Джанелидзе Г. Ю. Вибрационное перемещение. М. Наука, 1964. 412 с.
50. Гончаревич И. Ф. Вибротехника – нетрадиционные решения. М. Машгиз, 1986. 160 с.
51. Лавендел Э. Э. Синтез оптимальных вибромашин. Рига. Зинатне, 1970. 252 с.
52. Повидайло В. А., Силин Р. И, Щигель В. А. Вибрационные устройства в машиностроении. К. Машгиз, 1962. 111 с.
53. Потураев В. Н., Франчук В. П., Надутый В. П. Вибрационная техника и технологии в энергоемких производствах : монография. Днепропетровск. НГА Украины, 2002. 186 с.
54. Пристрій для очистки стічної води / Р.І. Сілін, А.І. Гордєєв, В.О. Павлик: пат. на винахід 48400 Україна: МПК C02F1/46. № u2001064234: заяв. 19.06.2001; опубл.15.08.2002, Бюл. № 8.
55. Устаткування для обробки води / Р.І. Сілін, А.І. Гордєєв, В. В. Третько, І. І. Сорока: пат. на корисну модель 10347 Україна: МПК B01F5/00. № u200503620: заяв. 18.04.2005; опубл.15.11.2005, Бюл. № 11.
56. Кавітаційний пристрій для обробки води / Р.І. Сілін, А.І. Гордєєв, О.А. Гордєєв, В.В. Третько, Є. А. Урбанюк: пат. на корисну модель 25775 Україна: МПК B01F 5/00. № u200702555: заяв. 12.03.2006; опубл.27.08.2007, Бюл. №13.
57. Вібраційний кавітатор для зміни властивостей води / Р.І. Сілін, А.І. Гордєєв, О.А. Гордєєв, В.В. Третько, Є.А. Урбанюк: пат. на корисну модель

25811 Україна: МПК В01F 5/00. № u200703370: заяв. 28.03.2007; опубл.27.08.2007, Бюл. № 13.

58. Пристрій для кавітаційно-магнітної обробки води / Р.І. Сілін, А.І. Гордєєв, Б.А. Баран, Є.А. Урбанюк: пат. на корисну модель 37257 Україна : МПК С02F 1/48. № u200806742: заяв. 16.05.2008; опубл. 25.11.2008, Бюл. №22.

59. Вібраційна установка для зміни властивостей води із насосним ефектом / Р.І. Сілін, А.І. Гордєєв, О.А. Гордєєв: пат. на корисну модель 35939 Україна: МПК В01F 5/00. № u200805677: заяв. 30.04.2008; опубл. 10.10.2008, Бюл. №19.

60. Вібраційний пристрій для біологічної активації води / Р.І. Сілін, А.І. Гордєєв, Р.С. Сілін, О.А. Гордєєв: пат. на корисну модель 54071 Україна: МПК С02F 1/30. № u201005159: заяв. 28.04.2010; опубл. 25.10.2010, Бюл. №20.

61. Спосіб очищення та знезаражування стічних вод / Р.І. Сілін, А.І. Гордєєв: пат. на корисну модель 54072 Україна : МПК С02F 1/34. № u201005160: заяв. 28.04.2010; опубл. 25.10.2010, Бюл. №20.

62. Вібраційне обладнання для очищення й знезаражування стічних вод / Р.І. Сілін, А.І. Гордєєв: пат. на корисну модель 54073 Україна : МПК С02F 1/34. № u201005164: заяв. 28.04.2010; опубл. 25.10.2010, Бюл. № 20.

63. Вібраційний пристрій для очистки та підготовки питної води / Р.І. Сілін, А.І. Гордєєв, В.П. Франчук, Р.С. Сілін, В.І. Кухар: пат. на корисну модель 83891 Україна : МПК С02F 1/34. № u201214677: заяв. 21.12.2012. опубл.10.10.2013, Бюл. №19.

64. Пристрій для гідрокавітаційного знезаражування води / Р.І. Сілін, А.І. Гордєєв, О.А. Гордєєв, В.Г. Мігаль, А.Л. Ганзюк: пат. на корисну модель 116031 Україна: МПК С02F 9/00. № u 2016 10060: заяв. 03.10.2016; опубл. 10.05.2017, Бюл. № 9.

65. Кавітаційний пристрій для очищення та знезараження стічних вод / Т.І. Веретільник : пат. 61782 Україна : МПК С02Р 1/34 С02Р 3/06. № u 201101003: заяв. 31.01.2011; опубл. 25.07.2011, Бюл. № 14.

66. Спосіб очищення стічних вод від амонійного азоту / А.М.

Мальований, Й.Й. Ятчишин, М.С. Мальований: пат. 69354 Україна: МПК C02P 1/28, C02P 3/30. № u201112243: заяв. 19.10.2011 ; опубл. 25.04.2012, Бюл. № 8.

67. Спосіб очищення і знезаражування стічних вод / Р.Р. Харів, І.М. Трушенко: пат. 35132 Україна: МПК C02P 9/00, C02P 1/02, C02P 1/32. № и200809727: заяв. 25.07.2008; опубл. 26.08.2008, Бюл. № 16.

68. Спосіб підготовки питної води / О.Р. Гащин, Т.М. Вітенько: пат. 41748 Україна: МПК 7 C02B 1/00. № и200813959: заявл. 04.12.2008; опубл. 10.06.2009, Бюл. № 11.

69. Кавітаційний реактор / О.І. Некоз, О.А. Литвиненко, О.А. Колногуз: пат. 43719 Україна: МПК (2009) B012 5/00 B0P 19/00 C02B 1/780. № и200903621: заяв. 13.04.2009; опубл. 25.08.2009, Бюл. № 16.

70. Федоткин И. М. Гулый С. И. Кавитация. Кавитационные энергетические аппараты и установки. К. Арктур А. 1998. 130 с.

71. Федоткин И. М. Немчин А. Ф. Использование кавитации в технологических процессах. Киев: Вища школа, 1984. 68 с.

72. Юдаев В. Ф. Гидромеханические процессы в роторных аппаратах с модуляцией проходного сечения потока обрабатываемой среды. Теор. основы хим. технол. 1994. Т. 28, № 6. С. 581 - 590.

73. Промтов М. А. Пульсационные аппараты роторного типа. Теория и практика. М. Машиностроение-1, 2001. 260 с.

74. Вітенько Т. М. Інтенсифікація процесів кондиціонування води з використанням гідродинамічного кавітаційного реактора. Автореф. канд. дис. – Львів: ДУ “Львівська політехніка”, 1996. 17 с.

75. А.с. 610896 СССР, МКИ Д21В 1/36. Гидродинамический кавитационный реактор / Р.А. Солоницын, А.В. Яхно, С.Ф. Пилипенко. № 2406966/29-12; заявл. 04.10.76; опубл. 15.06.78, Бюл. № 22.

76. Маргулис М. А. Звукохимические реакции и сонолюминисценция. М. Химия, 1986. 288 с.

77. Сілін Р. І., Гордєєв А. І. Вібраційне обладнання на основі гідропульсатора: монографія. Хмельницький: ХНУ, 2007. 386 с.
78. Інноваційні нанотехнології активації і знезаражування води та вібраційне обладнання: монографія / Р.І. Сілін, А.І. Гордєєв і ін. Хмельницький: ХмЦНТІ, 2013. 252 с.
79. Знак З. О., Сухацький Ю. В., Мних Р. В. Розвиток кавітаційно-флотаційного процесу очищення стічних вод в аспекті реалізації сучасних концепцій синтезу хіміко-технологічних систем. *Вісник Національний університет "Львівська політехніка"*, вип. 787. 2014. С.75-79.
80. Sangave, P. C., Pandit A. B. Ultrasound and enzyme assisted biodegradation of distillery wastewater. *Journal of Environmental Management*, Vol. 80. 2006. pp. 36-46.
81. Guo Z., Feng R. Ultrasonic irradiation-induced degradation of low-concentration bisphenol A in aqueous solution. *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 163. 2009. pp. 855-860.
82. Петренко Н. Ф., Мокієнко А. В., Платов С. М. Нові технології окислення та знезараження води, вдосконалені процеси окислення (огляд літератури). *Актуальні проблеми транспортної медицини*, вип. 2 (52). 2018. С. 22 -31.
83. 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.
84. Ashokkumar M. (Ed.). *Theoretical and experimental sonochemistry involving inorganic systems*. Springer Science+Business Media B. V., 2011. 404 p.
85. Гультекін І., Інс Н. Х. Ультразвукове руйнування бісфенолу-А: робочі параметри. *Ультразвукова сонохімія*, вип. 15, 2008. С. 524-529.
86. Sangave P. C., Пандіт А. Б. Ультразвук та ферменти сприяли біодеградації стічних вод лікєро-горілочного заводу. *Журнал екологічного менеджменту*, вип. 80, 2006. С. 36-46.

87. Determination of the ultrasonic effectiveness in advanced waste water treatment / S. Nasser, F. Vaezi A. H. Mahvi, R. Nabizadeh, S. Haddadi. Iran. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, Vol. 3, 2006. pp. 109-114.

88. Шевчук Л. І., Афтаназів І. С., Строган О. І., Старчевський В. Л. Низькочастотні вібраційні резонансні кавітатори. Видавництво Львівської політехніки, 2013. 176 с.

89. Целень Б. Я., Столітня Н. В. Вплив способу дискретно-імпульсного введення енергії на рН кислотного розчину. *Міжнародний науковий журнал «Інтернаука». Технічні науки*, №6(28), 2017. С. 72-77.

90. Акуличев В. А. Кавитация в криогенных и кипящих жидкостях. М. Наука, 1978. 220 с.

91. Розенберг Л. Д. Кавитационная область. *Мощные ультразвуковые поля* / под ред. Л. Д. Розенберга. М. Наука, 1968. Ч. 6. С. 221 - 266.

92. Новицкий Б. Г. Применение акустических колебаний в химико-технологических процессах. М. Химия, 1983. 192 с.

93. Акуличев В. А. Пульсации кавитационных полостей. *Мощные ультразвуковые поля* / под ред. Л.Д. Розенберга. М. Наука, 1968. Ч. 4. С. 129 - 166.

94. Основы физики и техники ультразвука: Учеб. пособие для вузов / Б.А. Агранат, М.Н. Дубровин, Н.Н. Хавский и др. М. Высш. шк., 1987. 352 с.

95. Гідродинамічний 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.

96. 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.

97. Установка по очищению й знезараженню води та пристрій для обробки води / І.О. Труфан, Ю.Р. Фрідман, Г.Р. Фрідман, С.І. Борозенцев: пат.

на корисну модель 84383 Україна: МПК C02F 1/34. № u200712964: заяв. 23.11.2007; опубл. 10.10.2008, Бюл. №19.

98. 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.

99. Вібраційний пристрій для стічних вод та знезараження / Радомир Сілін, UA, Анатолій Гордєєв, UA, Algimantas Vubulis, LT, Vytautas Jurenas: патент 5773 Латвія : МПК C02F1/34; заявл. 2010.01.07; опубл. 26.09.2011.

100. Вібраційна машина для знезараження водних середовищ / А. І. Гордєєв, Н.О. Костюк: пат. на корисну модель 126495 Україна: МПК C02F 1/00, № u201810090: заяв. 02.01.2018: опубл. 28.08.2018, Бюл. №12.

101. Вібраційна машина для знезаражування води та її очистки / А.І. Гордєєв, А.Л. Ганзюк, О.В. Кравчук, В.В. Кравчук, В.П. Нездоровін, Н.О. Костюк : пат. на корисну модель 140291 Україна : МПК C02F 9/00, №u 2019 08456: заяв. 17.07.2019: опубл. 10.02.2020, Бюл. №3.

102. Спиваковский А. О., Гончаревич И. Ф. Вибрационные конвейеры, питатели и вспомогательные устройства. М.: Машиностроение, 1972. 328 с.

103. Ярошевич М. П., Ярошевич Т. С. Динаміка розбігу вібраційних машин з дебалансним приводом. Луцьк: ЛНТУ, 2010. 220 с.

104. Ланець Олексій. Основи розрахунку та конструювання вібраційних машин. Книга 1. Теорія та практика створення вібраційних машин з гармонійним рухом робочого органа : навч. посібник. Львів, Видавництво Львівської політехніки, 2018. 612 с.

105. Ланець О. С. Високоєфективні міжрезонансні вібраційні машини з електромагнітним приводом (Теоретичні основи та практика створення) : монографія. Львів, Вид-во Нац. ун-ту «Львівська політехніка», 2008. 324 с.

106. Бауман В. А., Быховский И. И. Вибрационные машины и процессы в строительстве. Учебное пособие для студентов строительных и автомобильно-дорожных вузов. М.: Высшая школа, 1977. 255 с.

107. Варсанюфьев В. Д., Кузнецов О. В. Гидравлические вибраторы. Ленинград : Машиностроение, 1979. 143 с.
108. Обертюх Р. Р., Искович-Лотоцкий Р. Д. Генератори імпульсів тиску основна ланка гідроімпульсного приводу. *Вісник Вінницького інституту*, 1995, 31. С.42-47.
109. Dynamic processes in the pulsation chamber vibration machine for disinfection of water / Nazar Kostyuk, Anatoliy Hordieiev, Algimantas Bubulis, Oleksii Hordieiev. *Journal of Vibroengineering - Mechanical vibrations and applications*. Vol. 23. Is.4. 2021. 799-809 pp. (Scopus) <https://doi.org/10.21595/jve.2021.21637>.
110. Костюк Н. О. Експериментальні дослідження впливу конструктивних параметрів та режимів роботи вібраційного приводу машини на тиск пульсуючого струменю рідини з отвору у поршні. *Materialy XVII Mezinarodni vedecko-prakticka konference. «Dny vedy – 2021»*. 22 - 30 brezna 2021 roku. Vol. 3. Praha. Publishing House «Education and Science». 2021. С. 42-46.
111. Эмото Масару Послания воды. Тайные коды кристаллов льда / Перев. с англ. М. ООО Издательский дом «София», 2005. 96 с.
112. Спосіб криоскопічної кристаллографії води для аналізу її структурної будови / В.Л. Старчевський, Л.І. Шевчук, І.С. Афтаназів, О.І. Строган: патент на корисну модель 75230 Україна: МПК А61L 2/00, В01J 19/00. № u 2012 05681: заяв. 10.05.2012. опубл.26.11.2012, Бюл. №22.
113. Спосіб кристалооптичного аналізу структурної будови води та ступеня її активації і забруднення біологічними рештками / А.Л. Ганзюк, В.П. Олександренко, А.І. Гордеев, Н.О. Костюк : пат. на корисну модель 128630 Україна : G01N 21/3577, №u 2018 04393 : заяв. 20.04.2018: опубл. 25.09.2018, Бюл. № 18.
114. Красовский Г. И., Филаретов Г. Ф. Планирование эксперимента. Минск: БГУ, 1982. 302 с.
115. Адлер Ю. П., Маркова Е. В., Грабовский Ю. В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. М. Наука, 1976. 279 с.

116. Душинський В. В. Основи наукових досліджень [Теорія і практикум з програмним забезпеченням]. К. НТУУ «КПІ», 1988. 408 с.
117. Веденяпин Р. П. Общая методика экспериментального исследования и обработки опытных данных. М. Колос, 1965. 289 с.
118. Костюк Н. О., Гордєєв А. І., Гордєєв О. А. Аналітичний аналіз динамічних параметрів вібраційної машини для знезараження та зміни властивостей води. *Materiały XVI Międzynarodowej naukowo-praktycznej konferencji. «Strategiczne pytania światowej nauki – 2020»*. 07 - 15 lutego 2020 roku. Volume 9. Techniczne nauki. Przemysł. Nauka i studia. 2020. С. 33-36.
119. Костюк Н. О., Гордєєв А. І., Гордєєв О. А. Обґрунтування динамічних та конструктивних параметрів для знезаражування та зміни властивостей води. *Вісник Хмельницького національного університету*. Технічні науки. 2019. № 6. С. 40-48.
120. Костюк Н. О., Гордєєв А. І., Урбанюк Є. А. Створення математичної моделі вібраційної машини для знезаражування водних середовищ. *Збірник наукових праць міжнар. конф. молод. наук. «Сучасні технології в механіці»*, 19-21 квітня 2018р. Хмельницький: ФОП Мельник А. А. 2018. С. 88-93.
121. Альтшуль А. Д. Гидравлические сопротивления. М. Недра, 1982. 224 с.
122. Альтшуль А. Д. Гидравлика и аэродинамика (основы механики жидкости). М. Издательство литературы по строительству, 1965. 274 с.
123. Попов Д. Н. Нестационарные гидромеханические процессы. М. Машиностроение, 1982. 240 с.
124. Костюк Н. О., Гордєєв А. І. Обґрунтування динамічних параметрів робочого органу вібраційної машини для знезаражування та зміни властивостей води. *«XIII Українсько-Польські наукові діалоги». Тези наукових праць міжнародної наукової конференції*. 16-19 жовтня 2019р. Хмельницький – Кам'янець-Подільський: ХНУ, 2019. С. 85-86.
125. Костюк Н. О., Гордєєв А. І. Вібраційна машина для знезаражування водних середовищ. *Materiały XIV Międzynarodowej naukowo-praktycznej*

konferencji. «Kluczowe aspekty naukowej działalności – 2018». 07 - 15 stycznia 2018 roku. Volume 9. Techniczne nauki. Przemysł. Nauka i studia. 2018. С. 10-13.

126. Костюк Н. О., Гордєєв А. І., Гордєєв О. А. Дослідження розподілу енерговитрат приводу вібраційної машини поршневого типу для знезаражування та зміни властивостей води. *Вісник Хмельницького національного університету*. Технічні науки. 2020. №6. С. 73-78.

127. Костюк Н. О., Гордєєв А. І., Нездоровін В. П. Експериментальні дослідження працездатності вібраційної машини для знезаражування і зміни властивостей води та етапи її проектування. *Вісник Хмельницького національного університету*. Технічні науки. 2020. № 4. С. 112-119.

128. Дослідження працездатності вібраційної машини для знезаражування і зміни властивостей води / Н.О. Костюк, А.І. Гордєєв, О.А. Гордєєв, А.Л. Ганзюк. *Materialy XVI Międzynarodowej naukowo-praktycznej konferencji. «Nauka i inowacja – 2020»*. 07 - 15 października 2020 roku. Volume 8. Techniczne nauki. Przemysł. Nauka i studia. 2020. С. 96-101.

129. Інноваційні технології активації і знезаражування води / А.І. Гордєєв, Н.О. Костюк, В.В. Кравчук, В.М. Кулик. *Енергозбереження Поділля*. Хмельницький центр нових технологій і інновацій. 2018. №1 (65). С. 9-18.

130. Кожевников С. Н. Механизмы : справочник / С. Н. Кожевников, Я. И. Есипенко, Я. М. Раскин ; под ред. С. Н. Кожевникова. – Изд. 4-е, перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1976. – 784 с.

131. Вульфсон И. И. Колебания машин с механизмами циклового действия. Л.: Машиностроение, 1990. – 389 с.

132. Вибрации в технике. Справочник. В 6-ти т. / Ред. В.Н. Челомей (пред.). – М.: Машиностроение, 1980 – Т.3. Колебания машин, конструкций и их элементов / Под ред. Ф.М. Диментберга и К.С. Колесникова. 1980. 544 с. – С53-54.

133. Костюк Н. О., Гордєєв А. І., Урбанюк Є. А. Обґрунтування параметрів компенсаційної пружної системи вібраційної машини з

ексцентриковим приводом. *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*. 2018. № 6. т. 2. С. 19-26.

134. Костюк Н. О., Гордєєв А. І. Обґрунтування силових параметрів при розрахунках пружної системи вібраційної машини для знезаражування води. *Тези доповідей XVII-ї Міжнародної науково-технічної конференції. «Вібрації в техніці та технологіях»*. 11-12 жовтня 2018р. Львів: Національний університет «Львівська політехніка», 2018. С. 60-61.

135. Костюк Н. О., Гордєєв А. І., Гордєєв О. А. Визначення частотних параметрів роботи приводу вібраційної машини для знезаражування та зміни властивостей води. *Матеріали XVI міжнародна научна практична конференція «Динаміката на съврементата наука – 2020»*. 15 - 22 юли 2020 г. Vol. 4 София, «БялГРАД-БГ ОДД». 2020. С. 88-92.

Додаток А

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у закордонних наукових виданнях, що індексуються у міжнародних наукометричних базах даних Scopus, Web of Science:

1 Dynamic processes in the pulsation chamber vibration machine for disinfection of water / Nazar Kostyuk, Anatoliy Hordieiev, Algimantas Bubulis, Oleksii Hordieiev. *Journal of Vibroengineering - Mechanical vibrations and applications*. Vol. 23. Is.4. 2021. 799-809 pp. (Scopus) <https://doi.org/10.21595/jve.2021.21637>.

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

2. Костюк Н. О., Гордєєв А. І., Урбанюк Є. А. Обґрунтування параметрів компенсаційної пружної системи вібраційної машини з ексцентриковим приводом. *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*. 2018. № 6. т. 2. С. 19-26.

3. Костюк Н. О., Гордєєв А. І., Гордєєв О. А. Обґрунтування динамічних та конструктивних параметрів вібраційної машини для знезаражування та зміни властивостей води. *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*. 2019. № 6. С. 40-48.

4. Костюк Н. О., Гордєєв А. І., Нездоровін В. П. Експериментальні дослідження працездатності вібраційної машини для знезаражування і зміни властивостей води та етапи її проектування. *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*. 2020. № 4. С. 112-119

5. Костюк Н. О., Гордєєв А. І., Гордєєв О. А. Дослідження розподілу енерговитрат приводу вібраційної машини поршневого типу для знезаражування та зміни властивостей води. *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*. 2020. №6. С. 73-78.

Патенти України на корисну модель:

6. Патент України №126495 Вібраційна машина для знезаражування водних середовищ / Н.О. Костюк, А.І. Гордеєв. Заяв. 02.01.2018; реєстраційний номер заявки у 2018 00099 Оpubл. 25.06.2018, Бюл. № 12

7. Патент України №128630 Спосіб кристалооптичного аналізу структурної будови води та ступеня її активації і забруднення біологічними рештками / А.Л. Ганзюк, В.П. Олександренко, А.І. Гордеєв, Н.О. Костюк. Заяв. 20.04.2018; реєстраційний номер заявки у 2018 04393 Оpubл. 25.09.2018, Бюл. № 18.

8. Патент України №140291 Вібраційна машина для знезаражування води та її очистки / А.І. Гордеєв, А.Л. Ганзюк, О.В. Кравчук, В.В. Кравчук, В.П. Нездоровін, Н.О. Костюк, Заяв. 17.07.2019; реєстраційний номер заявки у 2019 08456 Оpubл. 10.02.2020, Бюл. № 3.

Статті в інших виданнях України:

9. Інноваційні технології активації і знезаражування води / А.І. Гордеєв, Н.О. Костюк, В.В. Кравчук, В.М. Кулик. *Енергозбереження поділля. Хмельницький центр нових технологій і інновацій*. 2018. №1 (65). С. 9-18.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

10. Костюк Н. О., Гордеєв А. І. Вібраційна машина для знезаражування водних середовищ. *Materialy XIV Międzynarodowej naukowo-praktycznej konferencji. «Kluczowe aspekty naukowej działalności – 2018»*. 07 - 15 stycznia 2018 roku. Volume 9. Techniczne nauki. Przemysł. Nauka i studia. 2018. С. 10-13.

11. Костюк Н. О., Гордеєв А. І., Урбанюк Є. А. Створення математичної моделі вібраційної машини для знезаражування водних середовищ. *Збірник наукових праць міжнар. конф. молод. наук. «Сучасні технології в механіці»*, 19-21 квітня 2018р. Хмельницький: ФОП Мельник А. А. 2018. С. 88-93

12. Костюк Н. О., Гордеєв А. І. Обґрунтування силових параметрів при розрахунках пружної системи вібраційної машини для знезаражування води.

Тези доповідей XVII-ої Міжнародної науково-технічної конференції. «Вібрації в техніці та технологіях». 11-12 жовтня 2018р. Львів: Національний університет «Львівська політехніка», 2018. С. 60-61.

13. Костюк Н. О., Гордєєв А. І. Обґрунтування динамічних параметрів робочого органу вібраційної машини для знезаражування та зміни властивостей води. *XIII Українсько-Польські наукові діалоги: Тези наукових праць міжнародної наукової конференції.* 16-19 жовтня 2019р. Хмельницький – Кам'янець-Подільський: ХНУ, 2019. С. 85-86

14. Костюк Н. О., Гордєєв А. І., Гордєєв О. А. Аналітичний аналіз динамічних параметрів вібраційної машини для знезараження та зміни властивостей води. *Materiały XVI Międzynarodowej naukowo-praktycznej konferencji. «Strategiczne pytania światowej nauki – 2020».* 07 - 15 lutego 2020 roku. Volume 9. Techniczne nauki. Przemysł. Nauka i studia. 2020. С. 33-36.

15. Дослідження працездатності вібраційної машини для знезаражування і зміни властивостей води / Н.О. Костюк, А.І. Гордєєв, О.А. Гордєєв, А.Л. Ганзюк. *Materiały XVI Międzynarodowej naukowo-praktycznej konferencji. «Nauka i inowacja – 2020».* 07 - 15 października 2020 roku. Volume 8. Techniczne nauki. Przemysł. Nauka i studia. 2020. С. 96-101.

16. Костюк Н. О., Гордєєв А. І., Гордєєв О. А. Визначення частотних параметрів роботи приводу вібраційної машини для знезаражування та зміни властивостей води. *Матеріали XVI міжнародна научна практична конференція «Динаміката на съвременната наука – 2020».* 15 - 22 юли 2020 г. Vol. 4 София, «БялГРАД-БГ ОДД». 2020. С. 88-92

17. Костюк Н. О. Експериментальні дослідження впливу конструктивних параметрів та режимів роботи вібраційного приводу машини на тиск пульсуючого струменю рідини з отвору у поршні. *Materiały XVII Mezinarodni vedecko-prakticka konference. «Dny vedy – 2021».* 22 - 30 brezna 2021 roku. Vol. 3. Praha. Publishing House «Education and Science». 2021. С. 42-46.

Додаток Б
АКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ



АКТ
передачі результатів
дисертаційної роботи на здобуття ступеня доктора філософії
Костюка Назара Олеговича

Комісія у складі голови – заступника директора центру, завідувача відділу криміналістичних видів досліджень Хмельницького НДЕКЦ Кравчука Олега Вікторовича, членів комісії: професора кафедри технології машинобудування Хмельницького національного університету (ХНУ) Гордєєва Анатолія Івановича, аспіранта кафедри технології машинобудування ХНУ Костюка Назара Олеговича, склала цей акт про те, що результати наукових досліджень та практичних рекомендацій дисертаційної роботи на здобуття ступеня доктора філософії Костюка Н.О. за темою «Обґрунтування параметрів вібраційної машини для знезаражування та зміни властивостей води» та результати, що отримані при виконанні держбюджетної теми «Обґрунтування конструктивних параметрів, режимів роботи приводу та дослідження працездатності вібраційної машини для знезаражування і зміни властивостей води» (№ державної реєстрації 0120U101484), передані Хмельницькому НДЕКЦ і прийняті для використання та впровадження.

Зокрема із теоретичних та практичних результатів роботи було використано:

- метод оцінки зміни основних властивостей води та експериментальне підтвердження, що кавітаційні процеси у вібраційній машині поршневого типу покращують основні характеристики водного середовища, а саме зростає рН, зменшується коефіцієнт поверхневого натягу, зменшується вміст солевих домішок.
- технологію кавітаційної обробки водних середовищ низькочастотними коливаннями, конструктивні схеми вібраційних машин, параметри оптимальних співвідношень конструктивних параметрів та рекомендації по вибору раціональних режимів роботи приводу;
- комплект робочих креслень вібраційної машини поршневого типу для знезаражування та зміни властивостей води та рекомендації по її налагодженню.

Використання цих результатів дасть змогу підвищити якість проведення експертних досліджень, завдяки застосуванню знезараженого водного середовища з активними властивостями.

Заступник директора центру, завідувач відділу криміналістичних видів досліджень Хмельницького НДЕКЦ, доктор наук з державного управління, кандидат юридичних наук, доцент

Кравчук О. В.

Професор кафедри технології машинобудування ХНУ, доктор технічних наук, професор

Гордєєв А.І.

Аспірант кафедри технології машинобудування ХНУ

Костюк Н.О.

ЗАТВЕРДЖУЮ»
 Директор Надвірнянський
 «КЗПТ» «Кобзаготпромторг»
 Романюк В.Д.
 01783780
 2021р

АКТ

передачі результатів дисертації доктора філософії
 Костюка Назара Олеговича

Комісія у складі: голови – директора Надвірнянського «КЗПТ» Романюка В.Д.; членів комісії: головного технолога Насадюка Р.І., аспіранта Костюка Н.О. склала цей акт про те, що результати наукових досліджень дисертації доктора філософії Костюка Н.О. за темою «Обґрунтування параметрів вібраційної машини для знезаражування та зміни властивостей води» передані на Надвірнянське «КЗПТ» і прийняті для використання та впровадження.

Зокрема із теоретичних та практичних результатів роботи було використано:

- рекомендації по застосуванню результатів кавітаційного процесу знезаражування та зміни показників води, а саме: збільшення концентрації вільних іонів водню у воді та з часом відстою води цей показник становить 8,4 рН, що призводить до зменшення її кислотності; зменшення показника окислювально-відновлювального потенціалу ORP говорить про насичення киснем рідинного середовища; показник TDS (рівень загальної мінералізації) після оброблення зменшується з 420 до 330 одиниць, що говорить про поліпшення якості солевого складу води;
- технологію та конструктивну схему і оптимальні режими роботи вібраційної машини для знезаражування та зміни властивостей води.

Використання цих результатів підвищило якість продукції, яка виготовляється.

Голова комісії

Романюка В.Д.

Члени комісії:

Насадюк Р.І.

Костюк Н.О.



ЗАТВЕРДЖУЮ»

Ректор Хмельницького національного
університету,
д.т.н., професор Скиба М.Є.

02 2021 р.

АКТ

**про впровадження у навчальний процес в Хмельницькому національному
університеті результатів дисертації доктора філософії Костюка Н.О. за темою
«Обґрунтування параметрів вібраційної машини для знезаражування та зміни
властивостей води»**

Даний акт складений про те, що в навчальному процесі на кафедрі технології машинобудування при викладанні дисципліни «Інженерне моделювання та проектування технологічних процесів і конструкцій в машинобудуванні» впроваджені і використовуються наступні результати дисертації доктора філософії Костюка Н.О., а саме:

- розроблено концепцію побудови та методіку інженерних розрахунків вібраційних машин для знезаражування і зміни властивостей рідинних субстанцій, завдяки яким інженери та науковці, які працюють у цій галузі, матимуть можливість впроваджувати у виробництво високоефективні та надійні зразки вібраційних машин;
- експериментально встановлені нові співвідношення конструктивних параметрів вібраційних машин для знезаражування та зміни властивостей води та визначено частотні границі роботи вібраційного ексцентрикового приводу машини;

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 інженерної механіки
Хмельницького національного університету,
д-р техн. наук, професор

Олександренко В.П.

Завідувач кафедри технології машинобудування
Хмельницького національного університету,
канд. техн. наук, доцент

Урбанюк Є.А.

Додаток В

ПАТЕНТИ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ УКРАЇНИ





МІНІСТЕРСТВО
ЕКОНОМІЧНОГО
РОЗВИТКУ І ТОРГІВЛІ
УКРАЇНИ

УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **126495** (13) **U**
(51) МПК (2018.01)
C02F 1/00

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

<p>(21) Номер заявки: u 2018 00099</p> <p>(22) Дата подання заявки: 02.01.2018</p> <p>(24) Дата, з якої є чинними права на корисну модель: 25.06.2018</p> <p>(46) Публікація відомостей про видачу патенту: 25.06.2018, Бюл.№ 12</p>	<p>(72) Винахідник(и): Костюк Назар Олегович (UA), Гордєєв Анатолій Іванович (UA)</p> <p>(73) Власник(и): Костюк Назар Олегович, вул. Інститутська, 7, гуртожиток № 4, кім. 201, м. Хмельницький, 29013 (UA), Гордєєв Анатолій Іванович, вул. Водопровідна, 44/1, кв. 4, м. Хмельницький, 29000 (UA)</p>
--	--

(54) ВІБРАЦІЙНА МАШИНА ДЛЯ ЗНЕЗАРАЖУВАННЯ ВОДНИХ СЕРЕДОВИЩ

(57) Реферат:

Вібраційна машина для знезаражування водних середовищ містить корпус з циліндричною ємністю, в яку встановлено на штоку поршень з ущільненнями, у якому є наскрізні отвори, шток з'єднаний шатуном з ексцентриковим вібратором, вал якого з'єднаний муфтою із приводом. В неї введено на упорах пружні елементи, які розташовані між підшипниковим корпусом шатуна та упорними щоками, закріпленими на планці та пластині.

UA 126495 U





УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **128630** (13) **U**
 (51) МПК
G01N 21/79 (2006.01)
G01N 21/3577 (2014.01)

МІНІСТЕРСТВО
 ЕКОНОМІЧНОГО
 РОЗВИТКУ І ТОРГІВЛІ
 УКРАЇНИ

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

<p>(21) Номер заявки: u 2018 04393</p> <p>(22) Дата подання заявки: 20.04.2018</p> <p>(24) Дата, з якої є чинними права на корисну модель: 25.09.2018</p> <p>(46) Публікація відомостей про видачу патенту: 25.09.2018, Бюл.№ 18</p>	<p>(72) Винахідник(и): Ганзюк Андрій Леонідович (UA), Олександренко Віктор Петрович (UA), Гордєєв Анатолій Іванович (UA), Костюк Назар Олегович (UA)</p> <p>(73) Власник(и): Ганзюк Андрій Леонідович, вул. Озерна, 10/1-б, кв. 18, м. Хмельницький, 29015 (UA), Олександренко Віктор Петрович, вул. Інститутська, 3, кв. 70, м. Хмельницький, 29013 (UA), Гордєєв Анатолій Іванович, вул. Водопровідна, 44/1, кв. 4, м. Хмельницький, 29000 (UA), Костюк Назар Олегович, вул. Інститутська, 7, гуртожиток № 4, кім. 201, м. Хмельницький, 29013 (UA)</p>
--	---

(54) СПОСІБ КРИСТАЛООПТИЧНОГО АНАЛІЗУ СТРУКТУРНОЇ БУДОВИ ВОДИ ТА СТУПЕНЯ ЇЇ АКТИВАЦІЇ І ЗАБРУДНЕННЯ БІОЛОГІЧНИМИ РЕШТКАМИ

(57) Реферат:

Спосіб кристалооптичного аналізу структурної будови води та ступеня її активації і забруднення біологічними рештками включає нанесення на чисте знежирене предметне скло краплі досліджуваної води. Воду висушують при кімнатній температурі та проводять мікроскопування з отриманням електронного зображення мікрофотографії за допомогою відеокамери та персонального комп'ютера з попереднім визначенням водневого показника рН об'єму води, що досліджується, і з якого отримано досліджуваний зразок.

UA 128630 U





УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **140291** (13) **U**

(51) МПК (2020.01)

C02F 9/00**C02F 1/34** (2006.01)

МІНІСТЕРСТВО РОЗВИТКУ
ЕКОНОМІКИ, ТОРГІВЛІ ТА
СІЛЬСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА
УКРАЇНИ

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

<p>(21) Номер заявки: u 2019 08456</p> <p>(22) Дата подання заявки: 17.07.2019</p> <p>(24) Дата, з якої є чинними права на корисну модель: 10.02.2020</p> <p>(46) Публікація відомостей про видачу патенту: 10.02.2020, Бюл.№ 3</p>	<p>(72) Винахідник(и): Гордєєв Анатолій Іванович (UA), Ганзюк Андрій Леонідович (UA), Кравчук Олег Вікторович (UA), Кравчук Віктор Васильович (UA), Нездоровін Василь Павлович (UA), Костюк Назар Олегович (UA)</p> <p>(73) Власник(и): Гордєєв Анатолій Іванович, вул. Водопровідна, 44/1, кв. 4, м. Хмельницький, 29000 (UA), Ганзюк Андрій Леонідович, вул. Озерна, 10/1-6, кв. 18, м. Хмельницький, 29015 (UA), Кравчук Олег Вікторович, вул. Світанкова, 106, м. Хмельницький, 29016 (UA), Кравчук Віктор Васильович, вул. Світанкова, 106, м. Хмельницький, 29016 (UA), Нездоровін Василь Павлович, вул. Гастелло, 6/2, кв. 24, м. Хмельницький, 29009 (UA), Костюк Назар Олегович, вул. Інститутська, 7, гуртожиток № 4, кім. 201, м. Хмельницький, 29013 (UA)</p>
---	---

UA 140291 U

(54) ВІБРАЦІЙНА МАШИНА ДЛЯ ЗНЕЗАРАЖУВАННЯ ВОДИ ТА ЇЇ ОЧИСТКИ**(57) Реферат:**

Вібраційна машина для знезаражування води та її очистки містить дві колонії з циліндричними ємностями, з'єднаними трубопроводами, камери пульсації з отвором, штоки, з'єднані з ексцентриковим вібратором, вал якого з'єднаний муфтою із приводом. В камеру пульсації введено втулку, крізь яку проходить шток, на якому розташовано диск з отворами з однієї сторони, а з іншої встановлено мембрану з дисками. При цьому параметри конструкції вибирають за умови:

$$S_o = 0,3S_d,$$

де S_o - площа отворів у диску;

S_d - площа диска з отворами,

$$D_x = (12...14)d_o,$$

де D_x - діаметр дисків у мембрані;

d_o - діаметр отвору у камері пульсації.

Додаток С

Вигляд осцилограм пульсуючого тиску рідини у камері пульсації
вібраційної машини

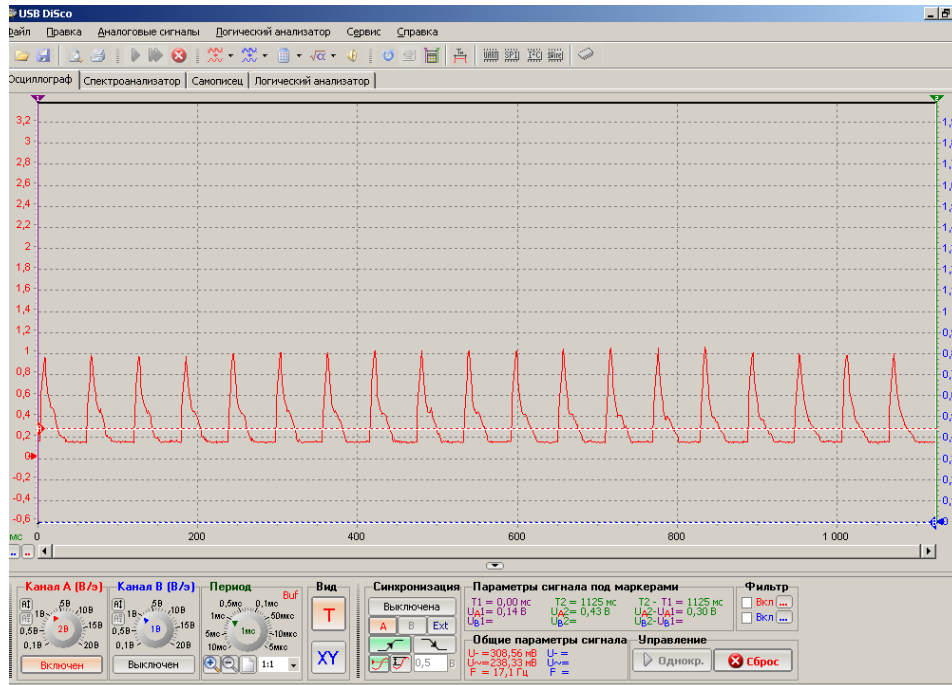


Рис.1С – Осцилограма пульсуючого тиску у камері пульсації: частота 17 Гц; у поршні два отвори 6 мм; амплітуда 2 мм

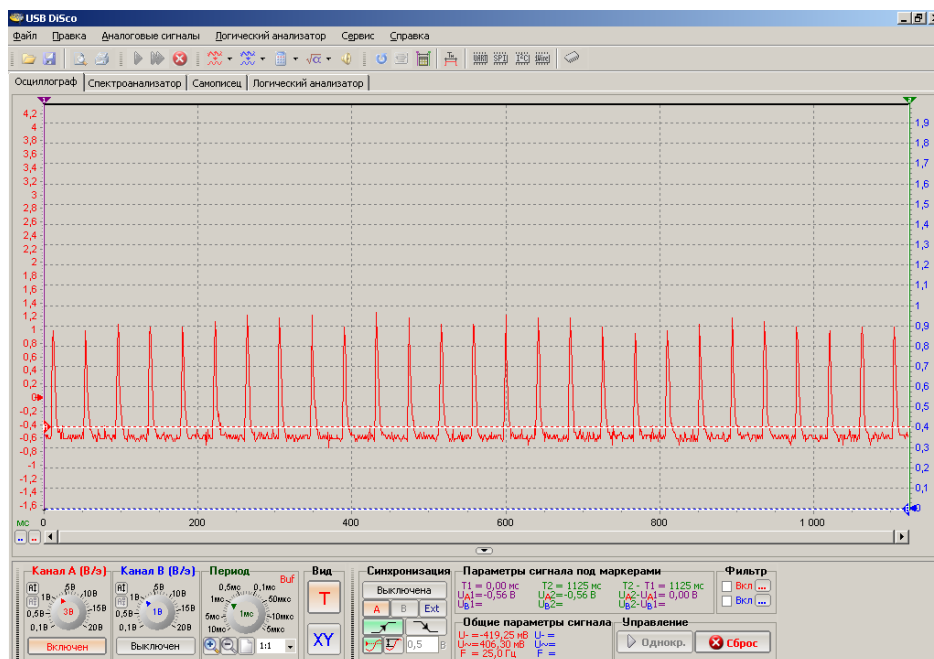


Рис.2С – Осцилограма пульсуючого тиску у камері пульсації: частота 24 Гц; у поршні два отвори 6 мм; амплітуда 2 мм

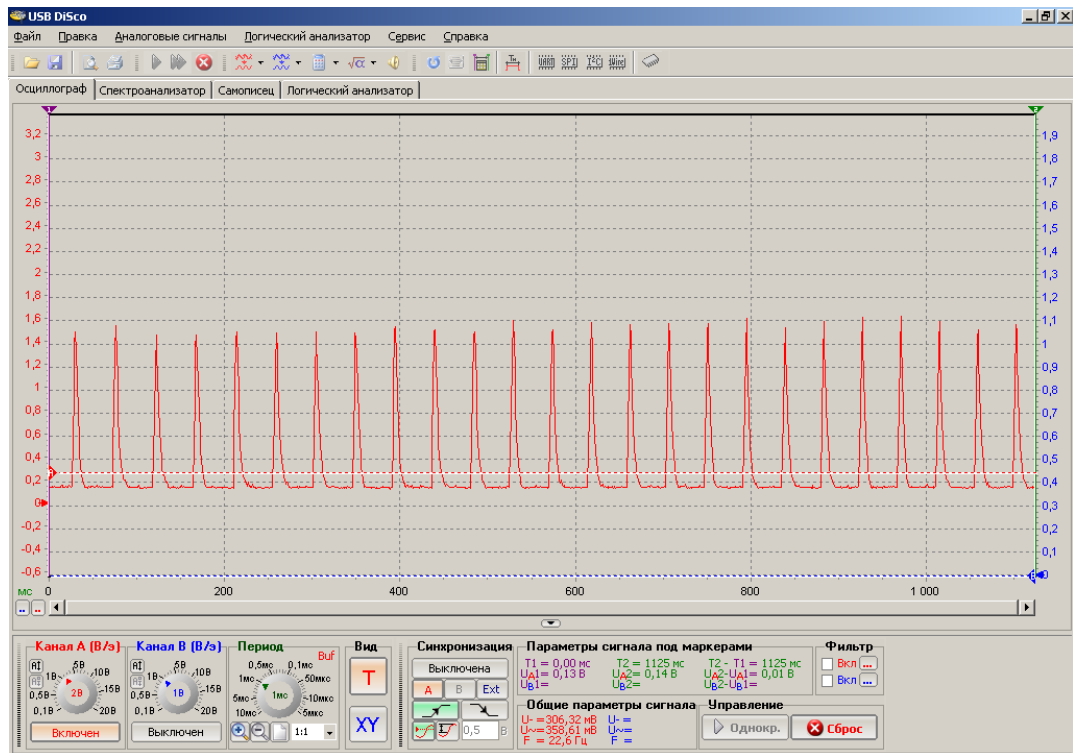


Рис.2С – Осциллограмма пульсующего тиску у камері пульсації: частота 23 Гц; у поршні один отвір 6 мм; амплітуда 2 мм