

Голові разової спеціалізованої вченої ради PhD12410
Хмельницького національного університету,
доктору технічних наук, професору
В'ячеславу ХАРЖЕВСЬКОМУ

ВІДГУК

на дисертаційну роботу **Душенко Олександра Сергійовича** на тему
«Обґрунтування параметрів кавітаційно-магнітного обладнання для
водопідготовки котелень», представлену на здобуття наукового ступеня
доктора філософії з галузі знань 13 Механічна інженерія
за спеціальністю 131 Прикладна механіка

1. Актуальність теми та зв'язок з науковими планами і програмами

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

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

Початковий етап водопідготовки зазвичай не становить складностей і передбачає застосування стандартних фізичних методів, таких як механічна

фільтрація. Однак другий етап вимагає більш ретельного підходу, оскільки передбачає видалення розчинених мінеральних солей. Найбільш сучасним і високоефективним методом тонкої очистки води для котелень сьогодні є мембранні технології, зокрема зворотний осмос та ультрафільтрація. Загалом процес водопідготовки для котелень включає такі стадії: попереднє очищення від колоїдів, суспензій, іонів заліза та органічних речовин; демінералізацію або пом'якшення; видалення агресивних газів, таких як вуглекислий газ і кисень; а також кінцеву корекційну обробку. Частими помилками у водопідготовці котелень є ігнорування або неналежне виконання попереднього очищення; недостатньо ефективного налаштування пом'якшувальних установок; відсутність деаераторів або їх неправильна експлуатація; і фактична відсутність корекційної обробки води. Основними джерелами водопостачання для котелень є міські водопровідні системи, артезіанські свердловини та відкриті водойми.

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

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

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

Дисертаційна робота виконана у відповідності з планом наукових досліджень кафедри технології машинобудування та тематикою держбюджетної теми «Обґрунтування параметрів кавітаційно-магнітного обладнання для водопідготовки котелень» (№ державної реєстрації 0125U003531), де здобувач був виконавцем роботи, а також у рамках науково-дослідних робіт Хмельницького національного університету.

2. Аналіз змісту дисертації. Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих в дисертації

Дисертація є завершеною науково-дослідною працею, яка містить анотацію, зміст, вступ, чотири розділи, висновки, список використаних джерел та додатки.

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.

Вирішення науково-технічної задачі, а саме – підвищення якості та покращення складу води, яка поступає з муніципального водопостачання, артезіанських свердловин і водойм, шляхом створення конструкцій обладнання для попереднього оброблення дією кавітації та магнітного поля з метою пом'якшення та зміни її властивостей є актуальним науково-технічним завданням.

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

Проведено аналіз літературних джерел, які присвячені застосуванню кавітаційних процесів у різних технологіях з водними середовищами. Проведено патентний пошук та проаналізовано конструкції кавітаційного обладнання для

впливу на водні середовища, а також особливості конструкцій обладнання для впливу магнітного поля на водні середовища. Описано об'єкт дослідження.

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

У Другому розділі на основі аналізу сучасних досліджень будови молекули води та параметрів водневих зв'язків у рідині визначено основні фізичні фактори, що діють під час кавітаційно-магнітного оброблення водного середовища.

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

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

У Третьому розділі наведено план-програму проведення експериментальних досліджень, описана загальна методологія досліджень, проведених у роботі, що базується на системному підході для вирішення поставленого науково-технічного завдання.

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

Грунтовно описана методика проведення досліджень параметрів статичних кавітаторів за допомогою SolidWorks. Наведено методику проведення багатofакторного експерименту для визначення кінематичних та конструктивних характеристик обладнання кавітаційно-магнітного оброблення.

Описана методика та прилади для проведення досліджень структурного стану та визначення показників води до і після оброблення. Наведено методику обробки експериментальних даних та проведено оцінку точності отриманих результатів.

У Четвертому розділі наведено побудову аналітичної моделі роботи вібраційної машини для зміни складу та властивостей води, яка дозволила встановити вплив конструктивних параметрів та режимів роботи приводу обладнання на отримання максимальної продуктивності. У результаті проведених досліджень із застосуванням швидкісної відеозйомки встановлено реальні частотні границі режимів роботи вібраційної машини та амплітуди коливань поршня. Також у результаті проведення експериментальних досліджень встановлено, що оптимальна продуктивність вібраційної машини для зміни властивостей води знаходиться за наступних параметрів роботи приводу та конструктивних співвідношеннях: частота коливань приводу 19–21 Гц; амплітуда $A = 2$ мм; діаметр поршня $D_{\text{п}} = 100$ мм та діаметр насадка 10 мм.

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

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

Проведено експериментальні дослідження зміни структури води кристало-оптичним методом та визначення показників води під час магнітно-кавітаційного оброблення. У результаті застосування комплексної дії гідрокавітації у статичному кавітаторі, та вібраційному кавітаторі з омагнічуванням потоку статичним магнітним полем з градієнтом напруженості вздовж потоку рідини отримано створення інтенсивних умов проведення окислювальних та водневих реакцій у реальних режимах роботи обладнання водопідготовки, які показали зміни параметрів окислювального відновлювального потенціалу водного середовища за часом оброблення та зміною показника вмісту загальної мінералізації за часом, а також показника рН водопровідної води за часом оброблення, що свідчить про покращення якості водного середовища.

Проведено техніко-функціональний аналіз та запропоновано методологію проектування основних вузлів конструкції вібраційної машини і обладнання, а також вибір технологічних режимів для зміни складу та властивостей води для котелень.

Одержані результати були використані у розробленні рекомендацій для проектування ефективного обладнання водопідготовки для тепломереж на першому етапі, що дасть можливість зменшити навантаження на обладнання під час застосування мембранних технологій – зворотного осмосу та ультрафільтрації на другому етапі, зменшення накипоутворення. Визначено

енергетичні витрати запропонованого обладнання для зміни складу та властивостей води для котелень.

Висновки сформульовані чітко, вони повністю висвітлюють отримані в роботі результати. За своїм рівнем висновки відповідають вимогам, які висуваються до результатів дисертації на здобуття наукового ступеня доктора філософії.

Список літератури достатньо повно охоплює предметну галузь та відображає опрацювання автором патентних матеріалів та іноземних джерел.

ДОДАТКИ до роботи містять список публікацій здобувача, акти впровадження результатів дисертаційного дослідження та патент і моделювання.

Наукові положення, висновки і рекомендації дисертаційної роботи Душенка Олександра Сергійовича обґрунтовані коректним використанням математичного апарату, практичним впровадженням результатів дисертаційних досліджень.

Наукові положення, висновки та рекомендації, сформульовані в дисертації, логічно випливають із результатів, отриманих за допомогою чітких викладок з коректним використанням принципів системного аналізу, методів аналізу та моделювання процесів, принципів побудови баз знань та формування логічного висновку.

3. Наукова новизна одержаних результатів

До найбільш суттєвих і науково нових результатів дисертаційної роботи, на мою думку, можна віднести:

1. Вперше побудовано аналітичну модель для визначення максимального тиску у камері пульсації, що дало можливість визначати продуктивність вібраційної машини очищення та зміни властивостей води в залежності від конструктивних параметрів та режимів роботи приводу.

2. Результати проведених досліджень із застосуванням швидкісної відеозйомки дозволили визначити раціональні режими роботи вібраційної машини, що дозволило встановити оптимальну продуктивність вібраційної машини очищення та зміни властивостей води яка досягається за наступних параметрів роботи приводу та конструктивних співвідношеннях: частота

коливань приводу 19–21 Гц за амплітуди $A = 2$ мм; діаметра поршня $D_p = 100$ мм та діаметра насадка 10 мм.

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

4. Одержав подальший розвиток метод оцінки зміни основних властивостей води та експериментально підтверджено, що магнітні і кавітаційні процеси у статичному кавітаторі та вібраційній машині покращують основні характеристики водного середовища, а саме: зростає рН, зменшується коефіцієнт поверхневого натягу, зменшується вміст розчинених солей. Вважаю, що наукові результати здобувача є вагомим внеском у розвиток створення, теоретичного обґрунтування та експериментального дослідженні технологічних процесів водопідготовки комбінованим методом – шляхом поєднання дії кавітації та магнітного поля для забезпечення якості підготовки води.

4. Достовірність отриманих результатів і висновків

Достовірність отриманих результатів забезпечується коректною постановкою задачі, мети та завдань дисертаційного дослідження, які розв'язуються послідовно та аргументовано. Достовірність наукових положень, висновків та рекомендацій підтверджується відповідністю методології дослідження поставленої науково-технічної задачі, повнотою розгляду на теоретичному та експериментальному рівнях об'єкта дослідження, застосуванням комплексу методів, адекватних предмету дослідження.

Дослідження динаміки руху приводу вібраційної машини здійснювалися шляхом фізичного і математичного моделювання динамічної системи на основі положень теорії математичного моделювання, теорії коливань, гідромеханіки із застосуванням обчислювальної техніки. В дослідженнях застосовано рототабельне планування трифакторного експерименту.

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

Моделювання процесів протікання рідини крізь насадок з визначенням величини кавітаційного впливу різних за конструкцією насадків на зміну властивостей та складу води для дослідження було використано програмний продукт SolidWorks Flow Simulation. Обробка результатів експериментальних досліджень виконана з використанням сучасного математичного апарату.

Достовірність результатів базується на обґрунтованості припущень, результатах експериментальних досліджень, правильному аналізі отриманих результатів, а також на успішній їх апробації на науково-технічних конференціях.

5. Практична цінність одержаних результатів та рекомендації щодо їх подальшого використання

Практичне значення отриманих результатів для машинобудування полягає у створенні нового технічного рішення, а саме обладнання і конструкції вібраційної машини, що захищено патентом на корисну модель України (№ 126495). При цьому найбільшу практичну цінність мають наступні одержані результати:

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

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

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

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

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

6. Оформлення дисертації, дотримання вимог академічної доброчесності та повнота викладу наукових положень та результатів в опублікованих працях

Дисертаційна робота має логічну структуру. Основні висновки і рекомендації логічно витікають із результатів, які наведено у розділах роботи.

Проведено перевірку дисертації на наявність академічного плагіату, отримані результати свідчать про високу індивідуальність роботи. По всьому тексту дисертації простежується авторський стиль. У дисертації не виявлено текстових запозичень і використання наукових результатів інших науковців без посилань на відповідні джерела.

Усі основні положення та найбільш важливі результати дисертації, подані до захисту, опубліковані в необхідному обсязі у фахових наукових виданнях України, пройшли відповідну апробацію на міжнародних науково-технічних конференціях.

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

Дисертаційна робота оформлена відповідно до вимог наказу МОН України від 12 січня 2017 р. № 40 «Про затвердження вимог до оформлення дисертації».

7. Недоліки та зауваження до дисертаційної роботи

1. Під час моделювання кавітаційних процесів у насадках, різних за конструкцією, прийнято як найкращий насадок – ступеневий на вході та на виході. З обґрунтування цього технічного рішення не до кінця є зрозуміло якими критеріями користувався здобувач?

2. Здобувачем визначено, з проведених досліджень, діапазон частотних коливань приводу вібраційної машини, а не конкретну її величину. Чому це так запропоновано?

3. Деякі деталі окремих рисунків (у розділі 4: рис. 4.12, стор. 128 та рис. 4.15, стор. 130, складні для читання, через надто малий шрифт. Можливо варто було використати інші формати рисунків, щоб покращити сприйняття та розуміння інформації представленої на них.

4. У розділі 1 для підписів Рис 1.2 – Рис 1.5 слід було дати посилання у квадратних дужках на літературні джерела, звідки взяті ці рисунки.

5. На сторінках 80 та 81 у хімічних формулах відсутні знаки «мінус» та «плюс».

6. У тексті дисертації тричі використано однакові Рис. 1.27. (стор. 67), Рис. 3.6. (стор. 94) та Рис. 4.1. Принципова схема вібраційної машини кавітаційної підготовки води для тепломереж: A – амплітуда коливань приводу; f – частота коливань приводу; D – діаметр камери пульсації; d – діаметр насадка (стор. 117). Потрібно пояснити таке використання однотипних рисунків.

7. У дисертаційній роботі проведено планування експерименту, однак не представлені поверхні відгуку. Потрібно пояснити їх відсутність.

8. У дисертаційній роботі зустрічаються деякі граматичні та стилістичні помилки.

Однак вище зазначені зауваження не є принциповими, істотно не впливають на зміст дисертаційної роботи та не знижують її наукової новизни та практичної цінності.

8. Висновки

Представлена дисертація є завершеною науково-дослідною працею, яка містить нові науково обґрунтовані результати. У дисертації розв'язано актуальну науково-прикладну задачу в галузі механічної інженерії, яка має важливе народногосподарське значення, що полягає у вирішенні технологічного забезпечення якості водопідготовки комбінованим методом – шляхом поєднання дії кавітації та магнітного поля.

Тема і зміст дисертації відповідають спеціальності 131 – Прикладна механіка.

Отже, з огляду на актуальність теми дисертації, обґрунтованість наукових положень, висновків та рекомендацій, сформульованих у дисертації, їх новизну та практичну цінність, повноту викладу в наукових публікаціях, відсутність порушень академічної доброчесності, вважаю, що дисертація цілком відповідає вимогам пп. 6, 7, 8, 9 «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. № 44. Здобувач Душенко Олександр Сергійович заслуговує на присудження наукового ступеня доктора філософії в галузі знань 13 Механічна інженерія за спеціальністю 131 Прикладна механіка.

Офіційний опонент – доктор технічних наук,
професор, професор кафедри комп'ютеризованого
машинобудування Івано-Франківського
національного технічного університету
нафти і газу

 **Любомир РОП'ЯК**

Підпис(и) Любомира РОП'ЯКА
посвідчую
Учений секретар ІФНТУНГ В.Хоміш
« 16 » 04 2026 р.

