

Голові разової спеціалізованої вченої ради PhD12410
Хмельницького національного університету,
доктору технічних наук, професору
В'ячеславу ХАРЖЕВСЬКОМУ
29016, м. Хмельницький, вул. Інститутська, 11

ВІДГУК ОФІЦІЙНОГО ОПОНЕНТА

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 кисневої й вуглекислотної корозії. У результаті знижується теплопередача, відбувається засмічення обладнання та скорочується його строк служби. Це, у свою чергу, призводить до зниження рентабельності, зменшення потужності та збільшення частоти простоїв.

Для котельного обладнання особливу небезпеку становить вода з високим вмістом розчинених забруднень, зокрема кальцієвих і магнеєвих солей 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.

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 трубопровідних систем. Надмірна концентрація заліза сприяє утворенню осадів на мембранах, що потребує частішого кислотного промивання та скорочує термін їхньої 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 2024р. № 3534-IX.

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

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

Дисертація є завершеною науково-дослідною роботою, як 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 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.

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

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

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

У другому розділі на основі аналізу сучасних досліджень будови молекули води та параметрів водневих зв'язків у рідині визначено основні

фізичні фактори, що діють при кавітаційно-магнітному обробленні водного середовища.

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

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

Ґрунтовно описана методика проведення досліджень параметрів статичних кавітаторів за допомогою SolidWorks.

Наведено методику проведення багатофакторного 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 оцінку точності отриманих результатів.

У четвертому розділі наведено побудову аналітичної моделі роботи вібраційної машини для зміни складу та властивостей води з якої встановлено вплив конструктивних параметрів та режимів роботи приводу обладнання на отримання максимальної продуктивності. У результаті проведених досліджень із застосуванням швидкісної відеоз'ємки встановлено реальні частотні границі режимів роботи вібраційної машини та амплітуди коливань поршня. Також у результаті проведення експериментальних досліджень встановлено, що оптимальна продуктивність вібраційної машини зміни властивостей води знаходиться при наступних параметрах роботи приводу та конструктивних співвідношеннях: частота коливань приводу 19-21 Гц при амплітуді $A = 2$ мм; діаметрі поршня $D_p = 100$ мм та діаметрі насадка 10 мм.

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

Проведено експериментальні дослідження зміни рН водного середовища при кавітаційному та комплексному кавітаційно-магнітному

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

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

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

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

Висновки по роботі 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 дисертації.

Наукові положення, висновки і рекомендації дисертаційної роботи Кушнірчука Андрія 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 відеоз'ємки дозволили визначити реальні режими роботи вібраційної машини, що дозволило встановити оптимальну продуктивність вібраційної машини очищення та зміни властивостей води яка знаходиться при наступних параметрах роботи приводу та конструктивних співвідношеннях: частота

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

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

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 дослідження технологічного забезпечення якості деталей машин, отриманих 3D-друком.

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 три факторного 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 по конструкції 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 строк роботи блоку зворотного осмосу, збільшує термін його регенерації та експлуатації;

- результати аналітичних та експериментальних досліджень дозволили створити методологію проектування насадків статичних кавітаторів та визначити 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 при викладанні 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. У роботі визначено раціональні межі роботи вібраційного приводу по частоті та амплітуді коливань. Чому здобувач рекомендує амплітуду коливань приводу 2 мм, а не більше? Збільшення її величини дало би більшу продуктивність оброблення.

2. Для більш узагальненої картини роботи обладнання бажано було би провести комплексне планування експерименту з включенням факторів зміни параметрів роботи приводу вібраційної машини на зміну параметра рН.

3. На мою думку, цікаво було би отримати відносне співвідношення у % домішок у вигляду осадів відносно об'єму обробленої води за часом оброблення.

4. Не зрозуміло, чому здобувач при моделюванні кавітаційних процесів у SolidWorks обмежився у дослідженнях вмістом розчинених газів у воді 1%, хоча за відомими дослідженнями його може бути у межах від 1 до 12%.

5. Деякі загальні висновки мають реферативний характер, їх треба більш чітко формулювати.

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

8. Висновки

Представлена дисертація є завершеною науково-дослідною роботою, яка містить нові науково обґрунтовані результати. У дисертації розв'язано актуальну науково-прикладну задачу машинобудування, яка має важливе народногосподарське значення, що полягає у вирішенні технологічного забезпечення якості деталей машин, отриманих 3D-друком. 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, завідувач кафедри
авіаційної та виробничої інженерії
Національного університету
«Львівська політехніка»



Ланець О

Олексій ЛАНЕЦЬ

Особистий підпис Олексія Ланця засвідчую:

Вчений секретар
Національного університету
«Львівська політехніка»



Роман БРИЛИНСЬКИЙ