

УДК 620.193.16

Р.І. СІЛІН, А.І. ГОРДЕЄВ

Хмельницький національний університет

ТЕХНОЛОГІЯ ГІДРОКАВІТАЦІЙНОЇ ОБРОБКИ ВОДИ ТА МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ ЕЛЕМЕНТІВ ПРИВОДУ ОБЛАДНАННЯ

© Сілін Р.І., Гордєєв А.І., 2006

Наведено аналіз використання вібраційних коливань у рідині. Запропоновано вібраційне обладнання і технологію зміни складу та знезараження водних потоків під дією гідрокавітації. Наведено результати досліджень дії гідрокавітації на склад води та мікробіологічний вміст водних потоків. Подано методику розрахунку елементів приводу обладнання.

In this article there are analyses of usage of vibrations in liquid. Vibration equipment and technology of structure changing and disinfection of water flows by the action of hydrocavitation are proposed. There are research results of hydrocavitation influence on water structure and microbiological stuff of water flows. Calculations methods for elements of equipment drive are represented.

В умовах жорсткої конкуренції на світовому ринку поряд із високими вимогами до якості, функціонального призначення та точності продукції машинобудування великого значення набувають надійність та довговічність як виробів загалом, так і їхня надійність та довговічність окремих вузлів і деталей. Це важливо для нового покоління машин і оснащення сучасного машинобудування, покликаних забезпечити впровадження прогресивних технологій, багаторазово підвищити продуктивність праці і фондівіддачу за зменшення матеріаломісткості та енерговитрат машин. Створення сприятливих умов для інтенсифікації процесу виробництва та застосування ефективних методів дії на його об'єкт; безперервна реалізація технологічного руху; зменшення відсотка непродуктивної праці, зокрема для здійснення допоміжних операцій; керування динамічним станом системи, в якій відбувається технологічна дія; багатофункціональність технологічного процесу та гармонійне поєднання його основних структурних складових становлять, здебільшого, тенденції розвитку технічного прогресу в різних галузях виробництва і переробки сільськогосподарської та промислової продукції. Серед машин, що задовольняють ці властивості, можна виділити вібраційні технологічні машини конвеєрного типу. Подібні машини поєднують дві, в загальному, відносно незалежні, та по суті взаємопов'язані технологічні дії: використання можливостей вібраційних коливань та поточної форми організації виробництва.

Поточний, або конвеєрний спосіб виробництва дає змогу досить ефективно реалізувати пропорційність, динамічність та спрямованість технологічного процесу. Це сприяє підвищенню продуктивності, зниженню працемісткості процесу та створенню на його основі автоматизованих виробничих ліній. Конвеєрні технологічні лінії сприяють усуненню суперечності між транспортною та технологічною діями, реалізації гармонійного виробничого процесу з раціональним використанням технологічного обладнання.

Використання вібраційних коливань у технологіях обумовлене потребами підвищення інтенсивності, поліпшення якісних показників, а в деяких випадках і можливістю реалізації технологічних процесів. Унікальні можливості вібраційного поля допомагають успішно здійснювати не тільки оздоблювально-зачисну та зміцнювальну операції, але й такі операції, як сепарація, перемішування, вібро-транспортування за важких експлуатаційних умов, гомогенізація, фільтрування, сушіння, насичення середовища певними речовинами, руйнування поверхонь та ін. процеси. Це обумовлює ефективність застосування вібраційних технологічних машин у багатьох галузях промислового виробництва.

Поєднання вібраційної та поточної технологій у конвеєрних вібраційних машинах обумовлює реалізацію вищої форми безперервності автоматизації виробничого процесу, гармонійне співвідношення його основних структурних складових, ефективну об'ємну дію на продукцію, що відповідає вищим формам досконалості технологічного обладнання.

Розвиток вібраційних конвеєрних машин веде початок із хвильових та вібраційних конвеєрів, які виконували суто транспортні функції. Фундаментальні роботи І.І. Блехмана, І.Ф. Гончаревича, Г.Ю. Джанелідзе, В.О. Повідайла, В.М. Потураєва, А.О. Співаковського, В.Н. Франчука, К.В. Фролова, А.Г. Червоненко та інших вчених обґрунтовують теоретичні основи процесу вібраційного переміщення та конструктивні схеми вібраційних транспортних машин. Разом із переміщенням супутнє оброблення продукції вже здійснюється у вібраційних транспортно-технологічних машинах. Надалі технологічне оброблення продукції розвивається за двома напрямками: в машинах із жорстким та вільним кінематичним зв'язком між інструментом та об'єктом дії.

Вищим формам технологічної досконалості для машин із жорстким зв'язком між інструментом та деталями відповідають роторні та роторно-конвеєрні машини, які досить докладно проаналізовано в роботах Л.Н. Кошкіна. Машини із вільним кінематичним зв'язком між інструментом та деталями розвиваються від галтовочних установок, гвинтових роторів до вібраційних технологічних машин. Великий внесок в розробки даних машин зробили такі відомі вчені, як А.П. Бабічев, І.Е. Бурштейн, І.Ф. Гончаревич, Б.Н. Картишев, І.В. Політов, Ю.М. Самодумський, Г.В. Серга, В.П. Франчук, А.П. Субач та інші. Це вдосконалюють обладнання у напрямку розвитку багатофункціональних машин безперервної дії. Під керівництвом А.П. Бабічева розроблено та впроваджено у виробництво вібраційні технологічні машини для багатостадійного оброблення деталей. Також за участю відомих українських вчених, зокрема І.С. Афтаназіва, П.Д. Денісова, В.В. Джемелінського, В.М. Мороза, В.О. Повідайло, Л.І. Сердюка, А.П. Сергієва, Р.І. Сіліна, М.Ю. Шайнського, П.С. Берника розроблено цілу серію вібраційних машин безперервної дії, укладено теоретичні основи їхнього проектування. Найдосконалішими серед конвеєрних технологічних вібраційних машин є багатофункціональні автоматизовані вібраційні лінії. Серед найвідоміших закордонних фірм, що займаються розробленням такого обладнання, можна згадати "Pangborn Co", "Lorco", "Roto-Finish", "Walter Trowal", "Lacromatic", "Wibral", "Lorco", та інші. У країнах СНД вагомим результатом у галузі дослідження та конструювання автоматизованих вібраційних машин безперервної дії досягнуто вченими та конструкторами ЭНИМСу (м. Москва), ДГТУ (м. Ростов-на-Дону), ЛСГУ (м. Луганськ), ДТУ "ЛП" та НВО "Світанок" (м. Львів), ВДСП (м. Вінниця) та іншими організаціями.

У багатьох галузях промисловості усе поширенішими є вібраційні технологічні процеси, розроблені під керівництвом Р.Ф. Ганієва, Н.І. Кобаско, В.П. Франчука, в яких використовують багатофазні середовища. Це можуть бути розплави металів, скла і полімерів, суспензії твердих часток і газових пухирців у рідині, дрібнодисперсні суспензії крапель у газоподібному чи рідкому середовищах тощо. Для процесів, пов'язаних з необхідністю рівномірного розподілу різних фаз у рідкій основі (одержання композитів і піноматеріалів) або їхньої сепарації з рідини (дегазація і флотажне збагачення), істотного значення набуває можливість прогнозування реакції таких систем на різного роду зовнішні періодичні впливи. Як свідчать результати дослідження динамічних явищ у багатофазних середовищах, підданих керованим вібраційним впливам [1,2], чимало з них можна успішно використати як для інтенсифікації зазначених процесів, так і під час розроблення і реалізації принципово нових технологічних прийомів. Так, вібраційне переміщення включень у багатофазних середовищах сприяє ефективнішому їхньому очищенню від твердих і газоподібних домішок, організація періодичних режимів руху дрібнодисперсних фаз істотно спрощує процеси приготування однорідних суспензій і перемішування рідин [2].

Впродовж останніх років для проектування верстатів і технологічного устаткування, застосовують модульний принцип [3]. Під модулем розуміють функціонально й конструктивно незалежну одиницю, яку можна використовувати індивідуально й у різних комбінаціях з іншими модулями.

Технологічне устаткування можна розглядати як багатокомпонентні структури зі складними взаємозв'язками складових елементів. Будь-яке устаткування варто розглядати як систему, що складається з множини упорядкованих і геометрично зв'язаних конструктивних елементів, що знаходяться у визначених функціональних залежностях. Для синтезу, аналізу технологічних і структурних можливостей модулів, їхніх характеристик і можливих зв'язків між ними зручно користатися основними положеннями теорії графів і множин. Активне і цілеспрямоване використання вібраційних впливів як керівного фактора є дуже перспективним напрямком у вібраційній технології, зв'язаної з обробкою поверхонь матеріалів у рідкому середовищі, що містить частки твердої й газоподібної фаз. У

зв'язку з цим великого значення набувають дослідження можливих форм відносного руху середовища і динамічних характеристик у разі низькочастотних коливань рідкого середовища.

Існують наукові роботи, в яких розглядають наведені вище технологічні машини, які належать здебільшого до вузькоспеціалізованого різновиду обладнання. Також відсутні фундаментальні праці, які були би присвячені розробці основ проектування та практичного розрахунку вібраційних технологічних машин, у яких рідина є несучим середовищем-інструментом, або об'єктом оброблення.

Ця наукова робота містить дослідження тенденцій розвитку технологічного вібраційного обладнання як спеціалізованого, так і прохідного типу, в якому рідинне середовище є несучим середовищем-інструментом, жорстко не зв'язаним з оброблюваною заготовкою, або рідинним середовищем-об'єктом, який піддається керованим вібраційним впливам, аналіз параметрів та конструктивних особливостей основних елементів вібраційних технологічних машин, методу практичного розрахунку та основи проектування вібраційних машин та їхніх складових.

У розроблення теоретичних основ і технології водопідготовки та очищення стічних вод вагомий внесок зробили вітчизняні вчені Л.А. Кульський, І.М. Гороновський, О.М. Когановський, М.О. Шевченко, М.К. Ротмютров та багато інших відомих учених.

Нині розроблено чимало технологій очищення будь-яких стічних вод промисловості і комунального господарства. На превеликий жаль, більшість із них впроваджуються надзвичайно повільно або взагалі не впроваджуються.

Чимало методів очищення пов'язані з хімічними та біологічними способами очищення. Хімічні методи використовують хлорування як фундаментальну реакцію. Хлоруванням забезпечують знезараження, але хлориди, розкладаючись в воді, створюють хімічні радикали, які впливають на здоров'я людини. Сьогодні українські вчені [3–6] розробили обладнання та технологію електроплазмового оброблення та знезараження питної води, але цей процес супроводжують високі енерговитрати.

Механічні та фізичні способи очищення води не мають цих недоліків, тому є дуже перспективними. Отже, регенерація промислових та стічних вод є однією з актуальних задач сучасного виробництва.

Великий інтерес становлять безреагентні методи очищення води. Цікавий метод кавітаційної дії знезараження води. Для кавітації необхідно створити умови обтікання водою твердих поверхонь з великою швидкістю, тобто необхідно, щоби водний потік вдарявся з великою силою у будь-яку перешкоду. При цьому швидкість водного потоку має досягати 20–25 м/с. На ефективність кавітації не впливає ні мутність, ні солевий склад води, ні яскравість. За кавітаційної дії руйнуються колоїди і частинки, всередині яких можуть бути бактерії. Тим самим хвороботворні організми залишаються без захисту перед іншими хімічними і фізичними впливами. Бактерицидна дія кавітації прямо пропорційна її інтенсивності, швидкості потоку і числу ступеней збудників кавітації. Порівнянням економічних затрат різних методів на очищення умовної одиниці об'єму питної води з'ясовано, що кавітація є найдешевим способом.

Проведено чимало досліджень щодо впливу ультразвукової кавітації на активацію води [7]. Встановлено, що інтенсивність кумулятивної дії на середовище під час розриву кавітаційного пухирця залежить від газопарового вмісту, властивостей середовища, коефіцієнта кумуляції. Під час ультразвукової кавітації кількість кавітаційних пухирців залежить від кількості ядер кавітації, які практично не піддаються регулюванню. У разі гідродинамічної кавітації пухирці утворюються внаслідок дроблення каверни, а їхні кількість та розміри визначають режим ведення кавітації, взаємозв'язок кавітаційних параметрів, що дає змогу керувати інтенсивністю кумулятивних впливів на технологічні процеси. Вже зазначали, що залежно від способу збудження кавітація може бути акустичною (або ультразвуковою) і гідродинамічною, механізм впливу яких на оброблюване середовище однаковий [8].

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

У роторно-пульсаційних апаратах (РПА) і роторних апаратах з модуляцією потоку під час оброблення поєднують різні способи впливу на середовище за допомогою конструктивних особливостей пристроїв. РПА складається з двох (або більше) роторів у вигляді коаксіальних циліндрів з щілиноподібними отворами. Під час обертання однієї групи циліндрів відносно іншої отвори всіх циліндрів періодично не збігаються, перекриваючи потік рідини, яка проходить через пристрій.

Внаслідок цього виникають ефективна турбулізація і пульсація потоку середовища, які супроводжуються кавітаційними ефектами.

Але таке обладнання має свої недоліки: неможливість регулювання характеристик кавітаційної зони і, отже, – ефективності оброблення, труднощі регулювання частоти і амплітуди пульсацій за

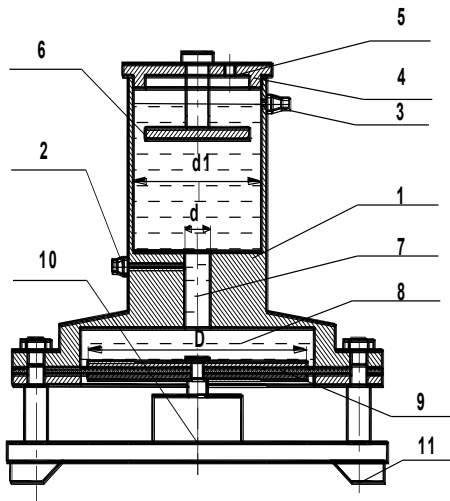


Рис. 1. Установка для кавітаційного оброблення води

стабільних витрат середовища, поступове зниження ефективності агаторазового проходження середовища через івано з тим, що процес утворення кавітаційних осилена дегазація рідини. й технологічний інтерес становлять (ГД) кавітаційні пристрої, в яких у потоці рідини виникає місцеве просторове зниження тиску, внаслідок чого відбувається гідродинамічна кавітація за рахунок зміни швидкості течії рідини. Енергія для збудження кавітації надходить безпосередньо технологічним потоком (статичного типу) або кавітатором, який може бути динамічного типу). переваги та недоліки різних кавітаційних пристроїв обговорено та розроблено вібраційне обладнання, що впливає на властивості води [10, 11, 12]. зображено установку для кавітаційної обробки води, яка складається із проточного циліндричного корпусу 1 із патрубками подавання води 2 та відведення води 3, закрита кришкою 4 з отвором 5, яка з'єднана з диском 6. Корпус 1 з'єднаний каналом 7 із ємністю 8, дно якої містить гумову мембрану 9, з'єднану з вібраційним приводом 10, встановленим на раму 11.

Устаткування працює так. Вода надходить невеликими порціями до корпусу 1 через штуцер 2, за ввімкненого віброприводу 10 у ємність втягується порція води і потім, під час руху мембрани 9 догори, викидається у корпус 1; при цьому рівень води у корпусі 1 збільшується, і в цей момент диск збурює поверхню води, захоплюючи повітря у вигляді бульбашок, що насичують повітрям воду корпусу 1. Завдяки певним співвідношенням діаметра мембрани 9 до діаметра каналу 7 ($D/d = 12$), до діаметра корпусу 1, ($D/d_1 = 2$), до амплітуди та частоти коливань у каналі 7 виникає та зникає кавітаційна порожнина, яка енергетично впливає на структуру води.

Установка для кавітаційного впливу на склад води з регульованою концентрацією газової фази [13] містить бак 1 з водою, в який занурюється циліндричний корпус 2 із отвором 3 для всмоктування та викидування води (рис. 5). Верхню частину корпусу виконано у вигляді гумової мембрани 4, яка з'єднана тягою 5 із віброприводом 6. У корпус 2 вкручено штуцер 7, з'єднаний шлангом із дроселем 9.

Установка для кавітаційного впливу на склад води працює так. Під час руху мембрани догори рідина затікає в корпус 2 через отвір 3, водночас через дросель 9, шланг 8 та штуцер 7 всмоктується додаткова порція повітря. Під час руху мембрани донизу газорідинна суміш виштовхується у бак 1. Надалі цикл повторюється. Завдяки певним співвідношенням: діаметра D корпусу, діаметра d отвору та перепаду тисків у баку 1 і корпусі 2 створюється кавітаційна каверна в отворі насадки 3.

Завдяки кавітаційному ефекту завислі частки подрібнюються, а рідина насичується пухирцями повітря. Завдяки тому, що дросель 9 встановлено вище за рівень рідини та малому ступеню його відкриття рідина через нього не виходить.

Обидві установки належать до прохідного типу, що дає змогу обробляти значні обсяги рідини, особливо якщо послідовно з'єднати дві або три установки за допомогою вхідних та вихідних штуцерів. Таке конструктивне рішення збільшить кратність обробки, підвищить якість та швидкість проходження рідини, тобто збільшиться продуктивність обладнання.

За результатами дослідження визначено, що за певний час оброблення змінюються як склад, так і властивості води. Отримані результати досліджень процесу показали, що вплив гідрокавітації знижує жорсткість води на 22 % (рис. 3), тобто кальцієві та магнієві сполуки випадають в осад, знижує біологічну потребу у кисні (БПК) в 2,2 раза (рис. 4), що прискорює бродіння біологічних

частинок у рідині, збільшує вміст азоту у бідистилаті води у 5 разів (рис. 5), що у перспективі дає змогу отримати азотні сполуки з меншими енерговитратами.

На рідину, яка проходить через отвір у зворотньо-поступальному русі, впливає кавітація, а після певного часу оброблення змінюється її склад [10]. Підтверджено припущення Я.І. Френзеля, В. Вайса, що під час утворення кавітаційних порожнин на їхніх границях утворюються іони рідини різних знаків, у результаті чого в пухирцях виникає електричне поле, напруга якого за малих розмірів пухирця може досягати кілька сотень вольт на сантиметр. Такі місцеві електричні поля

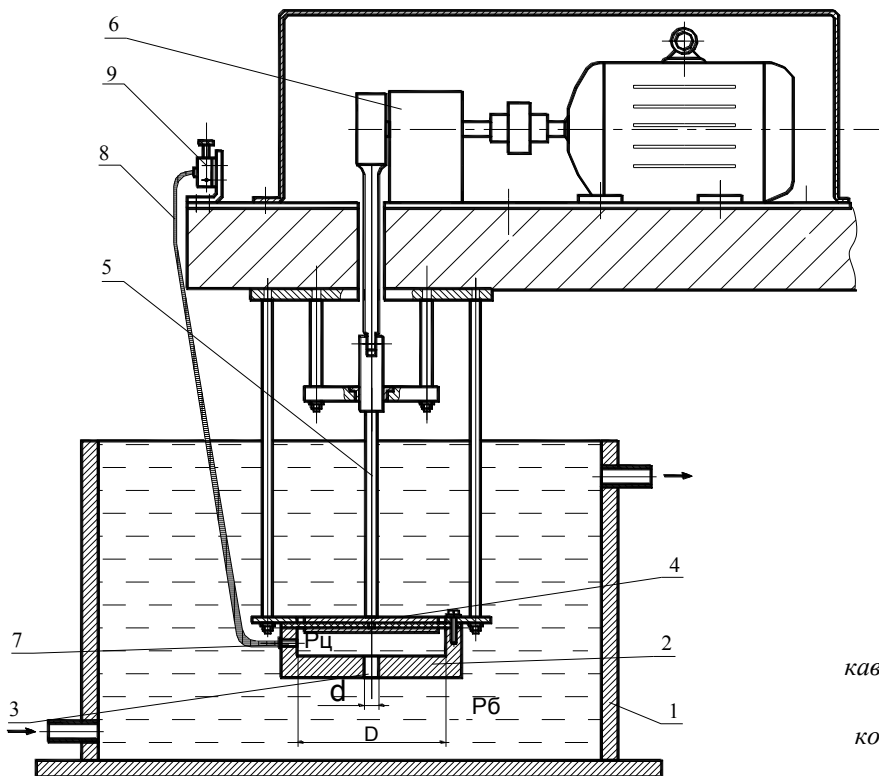


Рис. 2. Установа для кавітаційного впливу на склад води з регульованою концентрацією газової фази

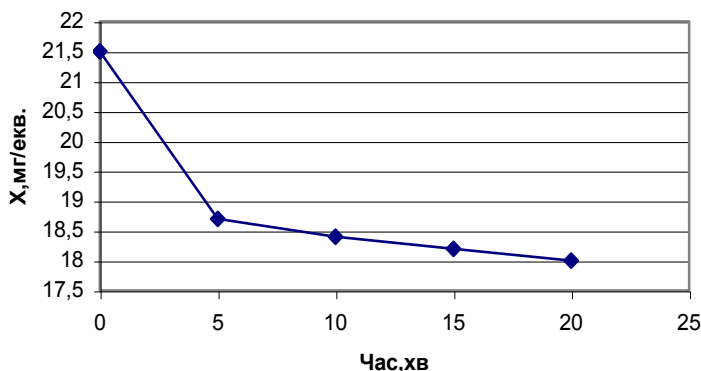


Рис. 3. Графік залежності впливу гідрокавітації на жорсткість води

Під час подальших досліджень вивчали вплив вібраційної гідрокавітації на знезараження водного потоку. Досліди проводили на лабораторній установці із закритими штуцерами 2 та 3 за оптимальними режимами (див. рис.1). Воду було взято з річки Південний Буг у травні місяці 2006 року об'ємом 1,2 літра для кожного досліді. Зразки обробляли на установці протягом 10, 15, 20 хвилин,

після чого протягом двох годин зразки було доставлено у лабораторію Хмельницькводоканалу, де згідно з ГОСТ 18963-73 (Методы санитарно-бактериологического анализа) було зроблено аналізи. Сутність методу полягає у визначенні в 1 мл води загального вмісту мезофільних, мезотрофних аеробів і факультативних анаеробів, здатних зростати на споживчому агарі певного складу при температурі $37 \pm 0,5$ °С протягом 24 ± 2 г, утворюючи колонії (це видно за збільшення у 2–5 разів). Після завершення росту колоній через 24 години підраховано їхню кількість у контрольному зразку та в оброблених гідрокавітацією за певний час і зроблено фотографії зразків (рис. 7).

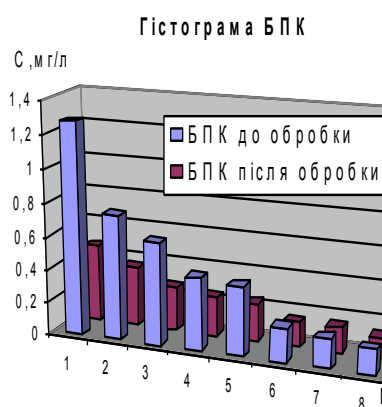


Рис. 4. Залежність біологічної потреби води від часу оброблення гідрокавітацією

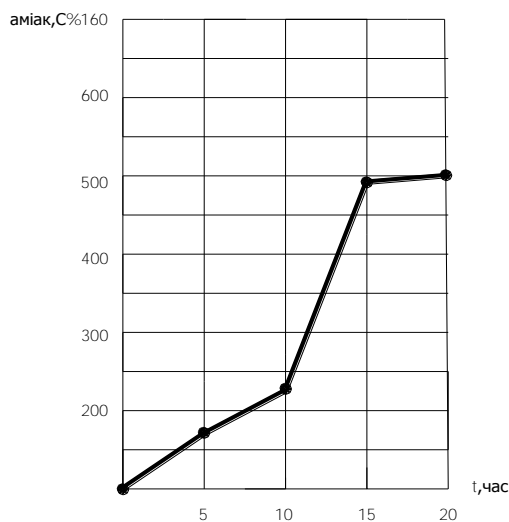


Рис. 5. Вплив гідрокавітації на вміст азоту в бідистилаті води

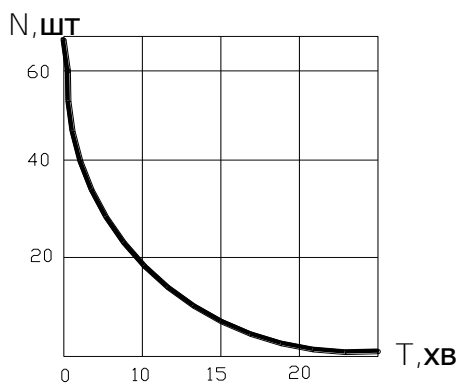


Рис. 6. Діаграма росту кількості колоній залежно від часу оброблення гідрокавітацією

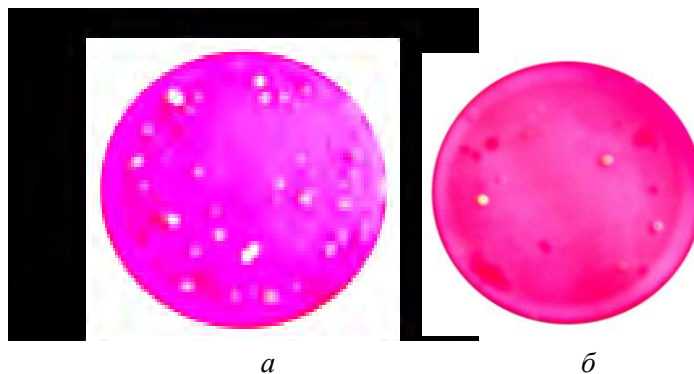


Рис. 7. Фотографії зразків росту колоній мікробів: а – без вібраційного гідрокавітаційного оброблення, б – після 20-хвилинного оброблення

У результаті знезараження води зменшилася кількість колоній від 63 до 3. Отриманий результат базується на тому, що під час розриву кавітаційних пухирців виникає світлове випромінювання, високі тиски та температура [10]. Усе це спричиняє гомолітичний розрив ковалентних зв'язків у молекулі води та утворення радикальних частинок H^+ , OH^- , O , які мають підвищену окислювальну здатність. Іон H^+ має високу рухомість і може швидко виходити внаслідок дифузії із потоку, при цьому значна частина їх залишається у потоці, OH^- накопичується, що приводить до зростання рН. Також у разі імпульсного

проходження рідини через насадок 7, втягування рідини у ємність 8 утворюється миттєва зона розрядження, у якій спори бактерій розриваються, не витримуючи різкого перепаду тиску. Інтенсивність кавітаційного впливу на рідинне середовище зростає із зменшенням діаметра пухирців внаслідок збільшення коефіцієнта кумуляції [7]. Суттєво інтенсифікує кавітаційний вплив підвищення як загального статичного тиску, так і тиску в пухирцевій камері розриву за рахунок стискування об'єму кавітаційних пухирців. Такий вплив здійснюється у вібраційному обладнанні імпульсно із протяжністю, яку визначають за швидкістю дифузії газу та випарювання у порожнину пухирця. Після цього розривного імпульсу відбувається імпульс стиску завдяки гідродару під час зміни напрямку руху рідини та стискання її рухомою мембраною 9.

Подальшим етапом цієї роботи було встановлення основних взаємозв'язків між конструктивними характеристиками та параметрами режимів роботи приводу обладнання. Було встановлено, що найбільшої ефективності процесу досягаємо на частотах 14–17 Гц за амплітуди $A=2,2$ мм та певного співвідношення діаметра мембрани до діаметра каналу ($D/d = 12$). За допомогою мембранних давачів визначено, що тиск у камері дорівнював 0,18 – 0,2 мПа. Було визначено зусилля, які діють на основні деталі приводу.

Для зменшення енерговитрат приводу та динамічних навантажень на обладнання необхідно мінімізувати масу його складових деталей за максимально допустимих переміщень елементів приводу. Поставлену задачу виконати за допомогою типових інженерних розрахунків складно, тому було застосовано програмний продукт *Cosmos Works* – систему для інженерних розрахунків за методом скінченних елементів.

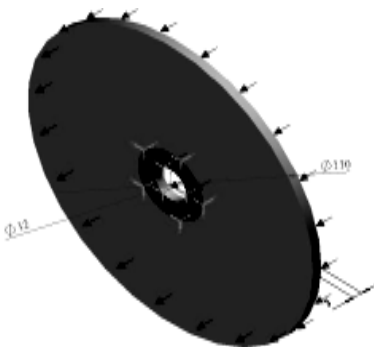


Рис. 8. Схема навантаження диска

У роботі на прикладі однієї з основних деталей гідропульсатора – диска (рис. 1), який є елементом мембрани 9, наведено методику проектування з використанням методу кінцевих елементів. Ця методика спрощує процес проектування і дає змогу прогнозувати поведінку деталей під час експлуатації обладнання. Розрахунок у *Cosmos Works* передбачає такі етапи: створення 3D-моделі деталі, складання схеми навантажень та обмежень, розбивання деталі на кінцеві елементи та визначення напруг і деформацій у тілі деталі. Схему навантаження диска показано на рис. 8.

З отриманням діаграм розподілу напруг та деформацій тіла диска (рис. 9) для різних умов з'явилася можливість виконати оптимізацію товщини диска. Критеріями оптимізації були мінімізація маси диска із забезпеченням величини зміщення отвору відносно зовнішньої поверхні диска, що була встановлена попередньо. Обмеження на зміщення центра отвору приймали до 0,14 мм, оскільки втрати об'ємного витoku рідини при цьому становлять менше ніж 5 %, що допустимо.

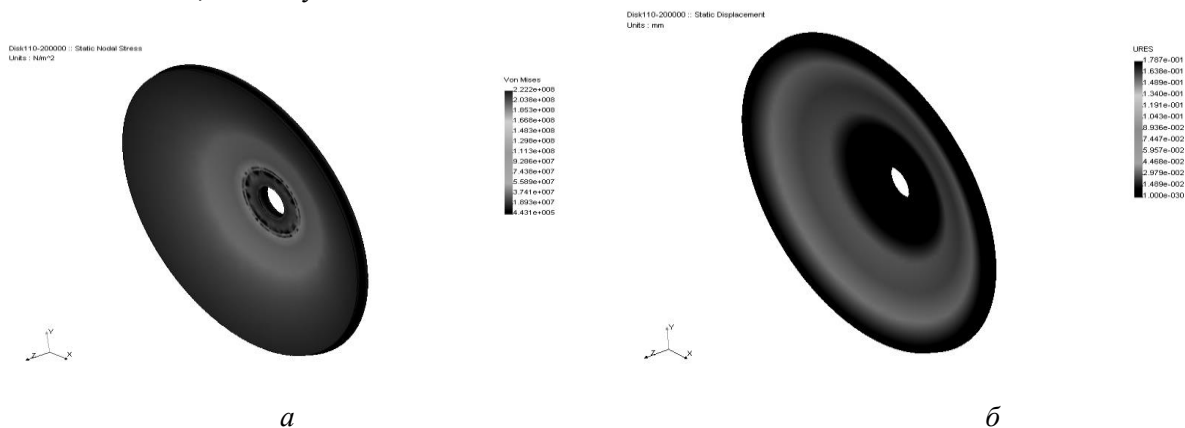


Рис. 9. Діаграми результатів розрахунків: розподіл напруг (а); зміщення (б)

Результати оптимізації товщини диска мембрани гідропульсатора наведено на рис. 10 у вигляді залежності величини зміщення осі отвору відносно зовнішньої поверхні диска від товщини диска. Розрахунком доведено, що за існуючих навантажень та максимального допустимого зміщення 0,14 мм товщина диску повинна бути 3,7 мм.

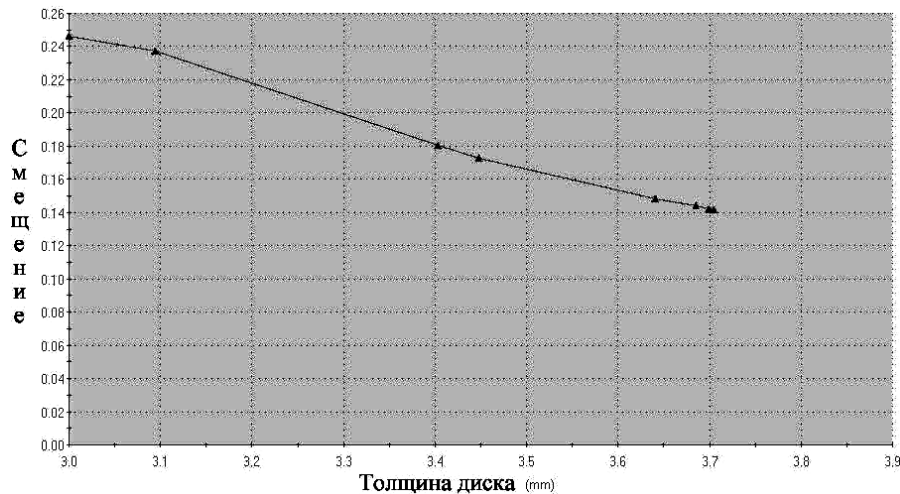


Рис. 10. Результати оптимізації товщини диска

Значним посиленням кавітаційної дії на рідке середовище за рахунок вказаних ефектів можна досягти істотної інтенсифікації хімічних перетворень та знезараження водних потоків. Отже, експериментальними дослідженнями доведено доцільність використання гідродинамічної кавітації у вібраційному обладнанні.

Отримані результати можна враховувати під час розроблення технологій та конструкцій обладнання для очищення промислових стічних вод та гальванотехніки.

1. Ганиев Р.Ф., Кулик В.В., Малышев П.А., Цапенко А.С. Исследование движения мелкодисперсных включений в колеблющемся сосуде с жидкостью, содержащей сжимаемую сферу // Прикл. мех. – 1979. – № 7. 2. Ганиев Р. Ф., Пучка Г. Н. Про явища локалізації і поступального переміщення газових пухирців у коливальній рідині // ДАН УССР. – 1978. – № 6. – С. 509–511. 3. Сухостаєць П.Т. Перспективи використання електроплазмової безреагентної технології для забезпечення якісною питною водою надійною каналізацією малих міст та сільських населених пунктів // Винахідник і раціоналізатор. – К., 2005. – № 1. – С. 30–33. 4. Руденко Г.Б., Омелянець С.М. Питна вода на межі політики, екології та економіки // Матеріали наук.-практ. конф. 2-го Міжнар. форуму “АКВА-Україна 2004”. – К., 21–23 вересня 2004. – С. 156–159. 5. Захаров П.Л., Сухостаєць П.Т., Логвинов О.О. Електроплазмові технології очищення, знесолення та знезалізнення водних потоків // Винахідник і раціоналізатор. – К., 2004. – № 4. – С. 20–26. 6. Захаров П.Л., Сухостаєць П.Т., Логвинов О.О., Батечко С.В. Очистний комплекс для знезараження і очищення фільтратів твердих побутових відходів на основі електроплазмових технологій // Винахідник і раціоналізатор. – К., 2004. – № 10. – С. 22–25. 7. Федоткин И.М., Гульй С.И. Кавитация. Кавитационные энергетические аппараты и установки. – К.: Арктур-А, 1998. – 130 с. 8. Резник Н.Е. Гидродинамическая кавитация и использование ее разрушающего действия // Тр. ин-та Всес. ин-т с.-х. машиностр. им. В.П. Горячкина. – 1969. – Вып. 59. – С. 144–160. 9. Маргулис М.А. Основы звукохимии (химические реакции в акустических полях. – М.: Высш. школа, 1984. – 272 с. 10. Сілін Р.І., Гордєєв А.І., Третько В.В., Сорока І.І. Кавітаційна обробка та її вплив на склад води // Вісник ТУП. – 2002. – № 3. – С. 253–257. 11. Пат. України. 484000 А. Пристрій для очистки стічної води / Р.І. Сілін, А.І. Гордєєв, В.І. Павлик В.І. – Опубл.15.08.2002, Бюл. № 8. 12. Сілін Р.І., Гордєєв А.І. Вібраційне обладнання для зміни властивостей води // Тез. доп. 7-го Міжнар. симпозіуму Українських інженерів механіків у Львові, 18–20 травня 2005 р. – Львів, 2005. – С. 92. 13. Пат. України 10347. Устаткування для обробки води / Р.І. Сілін, А.І. Гордєєв, І.І. Сорока, В.В. Третько. – Опубл. 15.11.2005, Бюл. № 11.