

ОБГРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ОЧИСТКИ ТА МИЙКИ У ВІБРАЦІЙНІЙ МАШИНИ ЗАНУРЕНИМ ПУЛЬСУЮЧИМ СТРУМЕНЕМ РІДИНИ З ТВЕРДИМИ ЧАСТИНКАМИ

Проаналізовано способи чистки і мийки та конструкції машин і пристроїв з вібраційним приводом, які реалізують ці способи. Вибір конкретного способу очистки та мийки обумовлюється в залежності від виду та властивостей забруднень, від вимог, що ставляться щодо чистоти виробів, умов та типу виробництва. Розглянуто фізичні основи взаємодії пульсуючого турбулентного потоку рідини з твердими частинками із забрудненою поверхнею. Розглянуто фізичні основи створення у насадку вібраційної машини пульсуючого турбулентного потоку рідини. Побудовано амплітудно-частотну характеристику коливань рідини у насадку камери пульсації вібраційної машини. Сформовані завдання подальших експериментальних досліджень.

Ключові слова: очистка, мийка забруднень, вібраційна машина, динамічні параметри процесу та машини.

A. STARIY, A. HORDEEV
Khmelnitsky National University

TECHNOLOGY OF CLEANING AND MIXING OF POLLUTION OF MACHINE PARTS AT THE REPAIR OF THE FLOW OF LIQUID WITH SOLID PARTICLES AND A VIBRATING MACHINE FOR ITS REALIZATION

On the surface of parts and assemblies in the process of their manufacture, operation of machinery and equipment, technological and industrial contaminants are formed. Qualitative cleaning of objects from contaminants is achieved by a complex physico-chemical and mechanical impact on it, the first - is provided by the use of chemicals that affect pollution, the second - the use of mechanical energy of pollution (scrapers, brushes, liquid jets, abrasive jets). To ensure proper cleanliness and surface quality of machine parts, a number of processes using mechanical action have been developed. The share of special equipment that is made for washing to clean parts is quite high. To meet the needs of industry in this regard is possible through the introduction of cleaning and washing machines, built on aggregate and modular element base, which are not inferior to similar, special and provide high unification and flexibility.

The methods of cleaning and washing and the design of machines and devices with vibrating drive, which implement these methods, are analyzed. They all have their advantages and disadvantages. The choice of a particular method of cleaning and washing depends on the type and properties of contaminants, the requirements for the purity of products, conditions and type of production. The need to create special installations for the operation of cleaning and washing of machine parts during repairs in small-scale production is an urgent scientific and technical task. The aim of the work is to create new methods of cleaning and washing and vibrating machines with the use of flooded pulsating jets of liquid with solid particles. The theoretical bases of the cleaning and washing process are considered. The dependence of the productivity of the cleaning process in a vibrating machine with a pulsating jet of liquid and solid particles is obtained. It is established that to increase the productivity of the cleaning process it is necessary to find the optimal ratio of the number of particles in the jet at the smallest distance from the nozzle to the surface to be cleaned when reaching the highest particle velocity. The physical bases of the interaction of a pulsating turbulent fluid flow with solid particles with a contaminated surface are considered. The physical bases of creation of a pulsating turbulent liquid flow in the nozzle of the vibrating machine are considered. The amplitude-frequency characteristic of fluid oscillations in the nozzle of the pulsation chamber of the vibrating machine is constructed. Tasks of further researches are formed.

Keywords: cleaning, dirt washing, vibrating machine, dynamic process and machine parameters.

Вступ

На поверхні деталей і складальних вузлів в процесі їх виготовлення, експлуатації машин і устаткування утворюються технологічні та виробничі забруднення. Якісне очищення об'єктів від забруднень досягається комплексним фізико-хімічним і механічним впливом на нього, перше – забезпечується використанням хімічних речовин, що впливають на забруднення, друге – використанням механічної енергії впливу на забруднення (скребки, щітки, струмені рідини, струмені абразиву). Для забезпечення належної чистоти і якості поверхні деталей машин розроблено ряд процесів з використанням механічної дії. Частина спеціального обладнання, яке виготовляється для миття для очищення деталей досить висока. Задовольнити потреби промисловості в цьому плані можливо за рахунок впровадження очисних та мийних машин, побудованих на агрегатній і модульній елементній базі, які не поступаються подібним, спеціальним і забезпечують високу уніфікацію і гнучкість.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Питаннями теорії та практики очистки і мийки деталей при виготовленні та ремонті займалися багато вчених дослідників, а саме: Л. М. Гуревич, Ю. С. Козлов, А. А. Куликов, М. Б. Латищенко, А. П. Садовський, М. Ф. Тельнов, Р. І. Сілін, Н. А. Сівченко, але поява нових технологічних процесів виготовлення деталей, нових вимог до якості ремонту різноманітних об'єктів техніки призводить до пошуку нових технологій і методів та створення нових конструкцій установок для та мийки деталей об'єктів, особливо у серійному і дрібносерійному та одиничному типах виробництва при виготовленні деталей та ремонту обладнання.

Процесами оздоблювально-зачишувальної віброобробки займалися А. П. Бабічев, М. Е. Шаїнський, А. В. Міщик, В. А. Федоровіч, струміно-абразивною обробкою мілких деталей А. Е. Проволоцький, А. А. Анділахай, Ф. В. Новіков, А. Б. Цигановській. У результаті проведених теоретичних та експериментальних досліджень встановлено, що гідроабразивне зношування відбувається в умовах ударної

дії твердих частинок на поверхню тіла. Залежно від властивостей матеріалів і кута атаки абразивними частинками зношування може мати природу крихкого руйнування (знос силікатного скла), мікрорізання (знос міді), пластичного відтискування, виникнення і зростання мікротріщин. Інтенсивність зношування залежить від кута атаки [1], швидкості потоку, концентрації, розміру, твердості абразивних частинок, співвідношення твердості поверхні матеріалу і абразивних частинок. Зі зменшенням кута атаки знижується величина ударного імпульсу, збільшується ймовірність мікрорізання поверхні.

Якісне очищення об'єктів досягається за рахунок комплексної взаємодії фізико-хімічного та механічного впливу миючого струменя на забруднення. Фізико-хімічний фактор забезпечується застосуванням нагрітих миючих розчинів, що пов'язано зі значними матеріальними витратами на придбання і нагрів цих розчинів при несприятливому впливі їх на навколишнє природне середовище. Тому, розробка технології для поліпшення якості ремонту і технічного обслуговування обладнання, з поверхні деталей та вузлів необхідно видаляти не тільки слабо і середньо зв'язані забруднення (дорожній бруд, олійно-грязьові відкладення і т.д.), але і міцно зв'язані (продукти корозійного руйнування, старе лакофарбове покриття та т.п.), які займають близько 10% загальної площі поверхні об'єктів і мають найбільшу трудомісткість видалення.

Підвищення ефективності очисних та миючих установок досягається за рахунок підвищення механічної дії струменя на забруднення. Найбільш перспективними і поширеними з існуючих на сьогоднішній день технологій очищення та миття об'єктів є технології з використанням водяних струменів високого тиску [2-4]. Останнім часом зростання ефективності очищення машин при використанні технологій струминного очищення досягається за рахунок збільшення кінетичної енергії струменя шляхом підвищення тиску подачі миючої рідини або додаванням до неї абразивного матеріалу. Як збільшення механічного фактора, використовується застосування абразиву, як окремо (сухі струмені), так і спільно з миючим розчином (вода-піскоструминна обробка) або підвищення тиску мийного струменя [5].

Дані способи забезпечують значну якість миття та очистки і високу продуктивність, але їх робота пов'язана зі значними енергетичними затратами через велику потужність приводу, яка необхідна для подачі води і абразиву. З метою очистки конкретного забруднення необхідно розробляти технології очистки, які здійснюють зрив забруднюючого матеріалу під дією додаткових напружень, створених у потоці миючої рідини за допомогою абразиву або частинку полімерної крихти. Для мийки забруднень перспективним є застосування вібраційних приводів в обладнанні та явище кавітації, яке має значну руйнівну енергією, а газові пухирці, які не сплеснулись, збільшують силу тертя газорідного потоку на поверхні забруднення [6].

Відомі способи та конструкції машин та пристроїв з вібраційним приводом для чистки та мийки деталей та вузлів для різних забруднень, які виникають при виробництві або ремонті обладнання та техніки [7-9]. Пристрій [7] для мийки деталей містить ванну для миючої рідини, діафрагму, трубку сопло, сітку для розміщення деталей, електромагнітний вібраційний привод. Вадю даного пристрою є невелика амплітуда коливань мембрани при значній частоті (50 Гц), що створює невелику швидкість струменю з насадка, а також неможливість промивати виріб з різних боків. Пристрій [8] для мийки мілких деталей містить ванну для миючого розчину, дно якої має можливість коливатися, касету з деталями, яка встановлюється у ванну. Мийка деталей здійснюється періодичним омиванням поверхонь деталі мийною рідиною з великими швидкостями.

Створення вібраційного обладнання з пульсуючим робочим тілом на основі гідропульсатора (ГП) [6,9], у якому робоче тіло виступає як інструмент, стримується недостатністю теоретичних та експериментальних досліджень в цій області. Цим зумовлюється актуальність роботи. Як показали раніше виконані дослідження динамічних явищ у рідинних середовищах [6], підданих керованим вібраційним впливам, що вони можуть бути успішно використані для здійснення та інтенсифікації зазначених процесів.

Актуальність дослідження

Потреба у створенні спеціальних установок для виконання операції очистки та мийки деталей машин при ремонті у дрібносерійному виробництві є актуальним науково-технічним завданням. Метою роботи є створення нових способів очищення і мийки та вібраційних машин із застосуванням затоплених пульсуючих струменів рідини з твердими частинками.

Виклад основного матеріалу

Режими очистки та мийки поверхні деталі потоком миючої рідини (оптимальну технологію) визначають, виходячи з аналізу гідродинамічної взаємодії миючої рідини з частинками з існуючим забрудненням на деталях, а також на підставі аналізу результатів експериментальних досліджень. У цьому зв'язку, розглянемо механізм видалення забруднень зануреним пульсуючим потоком миючої рідини із включеннями твердих частинок. Не применшуючи при цьому значення фізико-хімічних факторів, обумовлених активністю миючого середовища, вважається, що процес механічного впливу рідини на забруднення є однією з основних умов, що визначає ефективність очистки та мийки. Процес очистки та мийки поверхні виробу потоком рідини з твердими частинками можна розділити на наступні, зв'язані між собою, елементарні процеси: формування пульсуючого струменю рідини з твердими частинками, подача потоку рідини до поверхні, що очищується, відрив частинок забруднень та їх змивання з поверхні, що очищається, зависання забруднень у потоці рідини, транспортування забруднень до фільтруючого пристрою.

На рис.1 представлена схема роботи вібраційної машини для очищення та мийки деталей машин у пульсуючому потоці рідини з твердими частинками [10]. Вона складається з ванни 1 у якій на дні встановлено камеру пульсації 2, яка з'єднана штоком з вібраційним приводом 4. В ній встановлено короб 7 для збору твердих частинок 11 із сіткою 6 знизу над соплом та на бічних поверхнях 9 для розтікання потоку рідини. У коробі 7 над сіткою 6 на яку направлений струмінь з насадка 5 встановлено сопло 8 із зазором h_1 для попадання твердих частинок на сітку 6, які засипаються у короб 7. Працює вібраційна машина наступним чином. Деталь 12, що очищується, розташовується на сопло 8 із зазором H (більшим за максимальний розмір твердої частинки). Включається вібропривід машини 4. Завдяки коливанням мембрани з дисками 3 у камері пульсації 2 по чергово виникає стиснення рідини при ході її вгору – виникає струмінь з насадка 5, а при ході її вниз розрядження рідини – вона втягується крізь насадок 5 у камеру пульсації. Струмінь з насадка 5 проходить крізь сітку 6 і ежектує тверді частинки 11 та крізь сопло 8 потік суміші вдаряє по поверхні 12, що очищується. Тверді частинки 11, після взаємодії з поверхнею 12, потоком рідини відкидаються на стінки коробу 7 та падають на його дно. При ході мембрани з дисками 3 вниз виникає потік рідини на зрізі насадка, який затягує тверді частинки 11 на сітку 6 над соплом 5. Далі цикл повторюється.

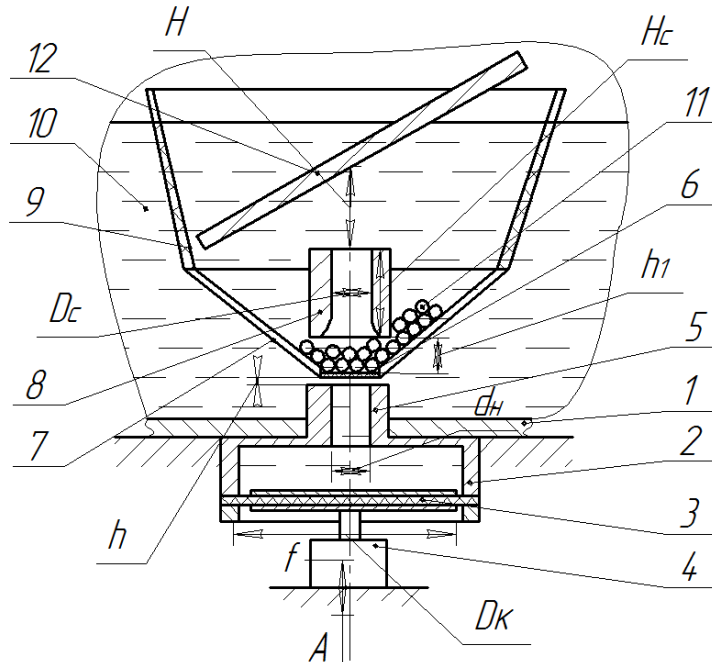


Рис.1 - Схема роботи вібраційної машини для очищення та мийки деталей машин у пульсуючому потоці рідини з твердими частинками: 1 – корпус ванни; 2 – камера пульсації; 3 – мембрана з дисками; 4 – вібропривід; 5 – насадок; 6 – сітка; 7 – короб для збору твердих частинок; 8 – сопло; 9 – сітка; 10 – миюча рідина; 11 – тверді частинки; 12 – поверхня, що очищується; H – відстань від сопла до поверхні, що очищується; H_c – висота сопла; h – відстань від насадка до сітки; h_1 – відстань від сітки до сопла; d_n – діаметр насадка; D_k – діаметр камери пульсації; D_c – діаметр сопла; f – частота коливань віброприводу; A – амплітуда коливань віброприводу

Розглянемо процес зняття забруднення з поверхні деталі та проаналізуємо вплив різних фізичних параметрів на його продуктивність. Виходячи з результатів досліджень автора [11] продуктивність процесу очищення залежить від багатьох факторів але домінуючим є швидкість потоку рідини з твердими частинками. Величина зняття матеріалу G_{Σ} з часом обробки в залежності різних факторів визначається за залежністю:

$$G_{\Sigma} = \frac{\pi \cdot k \cdot k_V \cdot \alpha \cdot Q \cdot \rho_1 \cdot \rho_2 \cdot D \cdot V_u^3 \cdot L^2 \cdot \text{tg}^2 \beta (1 - k_2) \cdot t}{2 \cdot H_{\text{м.м.}}}, \quad (1)$$

де k – коефіцієнт, який характеризує вид зношування; $k_V = 0,121$ – безрозмірний коефіцієнт; α – коефіцієнт, який враховує простір між частинками; Q – концентрація частинок в одиниці об'єму суспензії; ρ_1, ρ_2 – густина матеріалу частинок і деталі; D – характерний розмір частинки; k – коефіцієнт, який характеризує вид зношування; V_u – швидкість удару частинки по поверхні; L – відстань від сопла струменю до поверхні, що оброблюється; k – коефіцієнт, який характеризує вид зношування; $H_{\text{м.м.}}$ – динамічна твердість матеріалу за Майером; β – кут, нахилу зовнішніх границь струменю до її осі; t – час оброблення.

Автор [12] виходячи з аналізу залежності (1) наводить розрахункову залежність продуктивності процесу зрізання матеріалу W однією частинкою з урахуванням підвищення ефективності за рахунок збільшення кінетичної енергії частинки та зменшення умовного напруження різання і в залежності відстані від сопла струменю до поверхні, що оброблюється.

$$W = \frac{k_0 \cdot m \cdot V_q^3}{4 \cdot \sigma \cdot H}, \quad (2)$$

де k_0 – кількість абразивних зерен, які приймають участь в процесі обробки; m – маса частинки; V_q – швидкість удару частинки по поверхні; σ – умовне напруження різання матеріалу (енергоємність оброблення); H – відстань від сопла струменю до поверхні, що оброблюється.

З аналізу залежностей (1) та (2) можна зробити висновок, що для збільшення продуктивності процесу очищення необхідно знайти оптимальне співвідношення кількості частинок у струмені при найменшій відстані від сопла до поверхні, що очищується при досягненні найменших напружень різання матеріалу та основним фактором, який впливає на продуктивність процесу є швидкість частинки, яка має у формулах (1) та (2) третю ступінь і невелика її зміна призводить до значного підвищення продуктивності.

Для запропонованої схеми рис.1 з урахуванням, що пульсуючий потік рідини утворюється вібраційним приводом у камері пульсації з насадком, швидкість руху рідини у камері пульсації знаходиться за залежністю:

$$V = 2 \cdot A \cdot f, \quad (3)$$

де A – амплітуда коливань рідини у камері пульсації; f – частота коливань рідини у камері пульсації;

З урахуванням нерозривності потоку рідини $A \cdot S_k = A_n \cdot S_n$ та умовою, що швидкість твердих частинок дорівнює швидкості рідини на виході з насадка, V запишемо наступну залежність:

$$V = \frac{2 \cdot \varepsilon \cdot D_k^2 \cdot A \cdot f}{d_n^2}, \quad (4)$$

де ε – коефіцієнт звуження потоку у насадку; D_k – діаметр камери пульсації; d_n – діаметр насадка.

Зробивши припущення, що швидкість потоку рідини та твердих частинок незмінна при проходженні сопла та врахувавши гасіння швидкості струменю з насадка при проходженні сітки коефіцієнтом $K_c=0,9$ отримаємо наступну залежність:

$$V_{c,0} = \frac{2 \cdot k_c \cdot \varepsilon \cdot D_k^2 \cdot A \cdot f}{d_n^2}, \quad (5)$$

На відрізка H величина швидкості круглого струменя з сопла змінюється за залежністю Абрамовича:

$$V_q = \frac{0,645 \cdot V_{c,0}}{1 + \frac{2H}{D_c} \operatorname{tg} \alpha}, \quad (6)$$

де $V_{c,0}$ – початкова швидкість потоку рідини та частинок з сопла; D_c – діаметр сопла; α – кут одностороннього розширення струменю з сопла, $\alpha = 12^\circ 40'$.

З урахуванням залежності (6) отримаємо:

$$V_q = \frac{0,645 \cdot \frac{2 \cdot k_c \cdot \varepsilon \cdot D_k^2 \cdot A \cdot f}{d_n^2}}{1 + \frac{2H}{D_c} \operatorname{tg} \alpha}. \quad (7)$$

Враховуючи зміну початкової величини швидкості та частинок при виході потоку рідини з сопла із відстанню до поверхні (6), що очищується, можна записати наступну залежність для визначення продуктивності вібраційної машини:

$$Q = \frac{k_0 \cdot m \cdot \left(1,29 \frac{k_c \cdot \varepsilon \cdot D_k^2 \cdot A \cdot f}{d_n^2} / 1 + \frac{2 \cdot H}{D_c} \operatorname{tg} \alpha \right)^3}{4 \cdot \sigma \cdot H}, \quad (8)$$

З отриманої залежності (8) встановлено, що на продуктивність процесу очищення у вібраційній машині при незмінних параметрах, які входять у залежність, впливають як конструктивні параметри машини (розміри камери пульсації та насадку, діаметр сопла, відстань від сопла струменю до поверхні, що оброблюється) так і режими роботи віброприводу (частота та амплітуда коливань).

Розглянемо фізичні основи взаємодії пульсуючого турбулентного потоку рідини з твердими частинками із забрудненою поверхнею. При вимірюванні максимальної швидкості потоку, яка виникає у вібраційній машині і має турбулентний пульсуючий характер, виникають складності фіксації швидкості процесу (наявність датчиків швидкості, їх розміри, інерційність та процес тарування). Тому для зручності оцінювання величини швидкості потоку можна перейти на вимірювання його максимального тиску. Сила тиску потоку рідини, що діє на поверхню, залежить від швидкості і визначаються за формулою Д. Бернуллі [13]:

$$P = \frac{\gamma}{g} S V^2 \sin \xi, \quad (9)$$

де γ – питома вага рідини; g – прискорення вільного падіння; S – площа перерізу потоку; V – швидкість потоку з насадкою; ξ – кут нахилу площини, що очищується до лінії дії потоку.

Дійсне значення P відповідно дещо менше за розрахункове [14]:

$$P = (0,92 \dots 0,96) \frac{\gamma}{g} S V^2 \sin \xi. \quad (10)$$

Потік миючої рідини у пульсуючому струмені, при взаємодії із забрудненою поверхнею, розплющується та розтікається в сторони від центру контакту з поверхнею (рис.2). При цьому, на забруднену поверхню з боку потоку з частинками, діє осереднений гідродинамічний тиск частинки та потоку (нормальний та дотичний), який визначається за залежністю:

$$P = \frac{\rho_q \cdot V_q^2}{2} \sin \xi, \quad (11)$$

де P – осереднений тиск частинки та струменя рідини; ρ_q – щільність матеріалу твердої частинки; V_q – осереднена швидкість частинки та струменя рідини; ξ – кут нахилу поверхні до осі струменя.

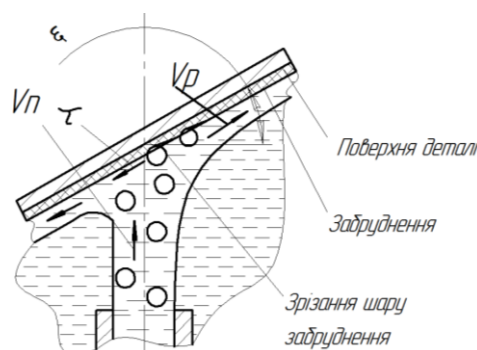


Рис.2 – Схема взаємодії потоку рідини з забрудненою поверхнею: V_n – швидкість потоку рідини з твердими частинками на виході з сопла; τ – сила тертя потоку рідини з частинками; α – кут нахилу поверхні деталі із забрудненням; V_p – швидкість розтікання рідини по поверхні

При турбулентному режимі руху рідини з частинками повздовж поверхні із забрудненням відбувається енергійне хаотичне перемішування рідини та виникають дотичні напруження тертя потоку рідини. В загальному випадку осереднений турбулентний потік одночасно має молекулярну й турбулентну в'язкість. Тому повне сумарне дотичне напруження тертя потоку рідини без включень на поверхні визначається за формулою:

$$\tau = (\mu + A) \frac{d\bar{u}}{dy}, \quad (12)$$

де μ – динамічний коефіцієнт в'язкості несучої фази; A – коефіцієнт пропорційності, що називається динамічним коефіцієнтом турбулентного обміну; $\frac{d\bar{u}}{dy}$ – градієнт швидкості.

Для двофазних середовищ (рідина з включеннями твердих частинок) широке розповсюдження має поправка Ейнштейна до динамічного коефіцієнта несучої фази.

Врахувавши її, тоді узагальнений динамічний коефіцієнт несучої фази можна виразити через відповідні коефіцієнти: μ – для чистої несучої фази; μ^* – для домішок твердих частинок із сферичною формою частинок.

Тому динамічний коефіцієнт в'язкості несучої фази прийме вигляд:

$$\mu^* = \mu \left(1 + \frac{5}{2} \alpha \right), \quad (13)$$

де α – об'ємна доля домішок твердих частинок.

З урахуванням (13) дотичні напруження тертя турбулентного потоку несучої фази з включеннями твердих частинок можна представити наступним виразом:

$$\tau = \left[\mu \left(1 + \frac{5}{2} \alpha \right) + A \right] \frac{d\bar{u}}{dy}. \quad (14)$$

Дотичні напруження тертя турбулентного потоку несучої фази з включеннями твердих частинок значно більше і залежать від об'ємної долі домішок твердих частинок.

Окрім збільшення дотичних напружень між потоком рідини та забрудненням можливий процес вдавлювання твердої частки у забруднення, а потім ініціювання процесу зрізання забруднення завдяки наявності гострих крайок на полістиролові крихті завдяки розтіканню потоку по поверхні (рис.2).

Розглянемо фізичні основи створення у вібраційній машині пульсуючого турбулентного потоку рідини. Система диференціальних рівнянь, яка описує коливання рідини у камері пульсації (рис.1) має вигляд:

$$\begin{cases} A_m dS_m = A_n dS_n; \\ m\ddot{x} + k\dot{x} + cx = F, \end{cases} \quad (15)$$

де F – сила, яка діє на мембрану з дисками, $F = \frac{\pi \cdot D_m^2 \cdot P_{\max}(\omega)}{4}$; m – маса рідини, яка отримує коливальний рух; S_n – площа насадка; S_m – площа мембрани; P_{\max} – максимальний тиск у камері пульсації, який залежить від частоти коливань; C – жорсткість пружної мембрани; k – демпфуюча здатність.

Демпфуючу здатність k рідини знайдемо за формулою:

$$k = \frac{8 \cdot \pi \cdot D_m^4}{d_n^2} \mu \cdot l = 0,0113, \quad (16)$$

де μ – динамічний коефіцієнт щільності, $\mu = 8,94 \cdot 10^{-4} \text{ Па} \cdot \text{с}$; l – довжина отвору, $l = 0,045 \text{ м}$.

Для аналізу залежності швидкості в насадку від частоти коливань приводу побудуємо амплітудно-частотну характеристику коливань рідини у насадку камери пульсації вібраційної машини. Для цього проведемо перетворення другого рівняння системи (15) поділивши його ліву та праву частину на C та провівши заміни.

$$\frac{m}{c} \ddot{x} + 2\xi \frac{k}{c} \dot{x} + x = \frac{F}{c}. \quad (17)$$

$$\frac{m}{c} = T_2^2, \quad \frac{k}{c} = T_1, \quad \frac{F}{c} = k_1.$$

Друге рівняння системи (15), після перетворень за Лапласом має наступний вигляд в операторній формі:

$$T_2^2 p^2 X_{вух}''(p) + 2 \cdot \xi \cdot T_1 p X_{вух}'(p) + X_{вух}(p) = k_1 X_{ex}(p). \tag{18}$$

Передаюча функція для рівняння (18) має наступний вигляд:

$$W(p) = \frac{X_{вух}(p)}{X_{ex}(p)} = \frac{k_1}{T_2^2 p^2 + 2 \cdot \xi \cdot T_1 p + 1}. \tag{19}$$

Підставивши заміну $p = j\omega$ отримаємо наступну залежність:

$$W(j\omega) = \frac{k_1 [1 - T_2^2 \omega^2 - j T_1 \omega]}{(1 - T_2^2 \omega^2)^2 + (2 \cdot \xi \cdot T_1 \omega)^2}. \tag{20}$$

Амплітудно-частотна характеристика з рівняння (20) визначається наступним чином:

$$A(\omega) = \frac{k_1}{\sqrt{(1 - T_2^2 \omega^2)^2 + (2 \cdot \xi \cdot T_1 \omega)^2}}. \tag{21}$$

Визначимо необхідні данні для розрахунку: діаметр камери 100 мм; діаметр насадка 10 мм; маса рідини, що коливається $m = 0,01 \text{ кг}$; жорсткість гумової мембрани $C = 0,6 \text{ МПа}$ [15]; $k = 0,0113 \text{ Па} \cdot \text{с}$; $F = 0,0785 \cdot P_{\max}(\omega)$; $\xi = 0,5$ - коефіцієнт, який враховує звуження потоку рідини при перетіканні з камери до насадка;

$$\frac{m}{c} = T_2^2 = \frac{0,01}{0,6} = 0,0166; \quad \frac{k}{c} = T_1 = \frac{0,0113}{0,6} = 0,0189;$$

$$\frac{F}{c} = k_1 = \frac{0,0785 \cdot P_{\max}(\omega)}{0,6} = 0,13 P_{\max}(\omega).$$

Застосувавши дослідну установку, датчик тиску МРМ489 та USB осцилограф ВМ8020, який з'єднано з персональним комп'ютером через порт USB і обслуговується програмним продуктом «DiSco», було проведено вимірювання величини зміни максимального тиску у камері пульсації від частоти. У результаті проведених експериментів було встановлено залежність тиску у камері пульсації P_{\max} від частоти. Результати представлені на графіку рис. 3 і враховані при розрахунку.

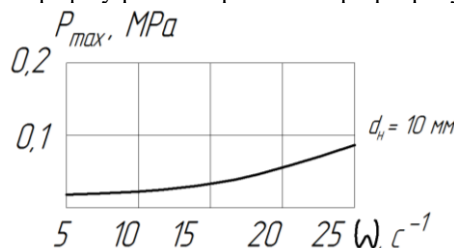


Рис.2. Залежність максимального тиску у камері пульсації діаметром 100 мм від частоти

Провівши підстановку даних у (21) та за допомогою програмного продукту MatchCad були проведені розрахунки згідно рівняння (21) і побудовано графік амплітудно-частотної характеристики, представленої на рис.3.

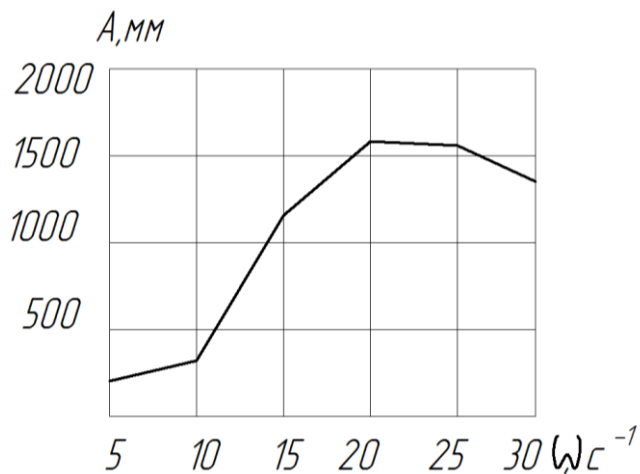


Рис.3. Амплітудно-частотна характеристика руху рідини у насадку вібраційної машини

Знаючи величину амплітуди коливання струменя у насадку можна розрахувати швидкість руху рідини на виході з насадка за формулою [16]:

$$V = \phi \sqrt{2gH}, \quad (22)$$

де ϕ - коефіцієнт швидкості, $\phi = 0,97$; g - прискорення сили тяжіння; H - геометричний натиск рідини, $H = A$.

З проведених розрахунків та з графіка рис.3 встановлено, що залежність величини переміщення рідини у насадку від частоти має нелінійний характер і відповідно максимальний тиск у струмені з насадка знаходиться у межах частот від 16 до $22\omega, \text{с}^{-1}$ тому і струмінь з насадка має максимальну швидкість у цих межах.

У результаті аналітичних досліджень встановлено, що наявність у потоці рідини частинок або газових пухирців, які утворюються при протіканні рідини через насадок з гострими крайками на вході, збільшуються дотичні напруження тертя, а мілкі газові бульбашки поведуться як «тверді частки» у двофазному середовищі, що дозволяє підвищити інтенсивність процесу мийки забруднень. А при наявності у потоці рідини частинок (полістиролової крихти), з твердістю більше ніж твердість забруднення, дозволяє збільшити нормальні та дотичні напруження потоку рідини та створити умови мікрорізання забруднення. Усі ці фактори направлені на збільшення продуктивності очищення та мийки забруднень.

Раніше встановлено [6,12,13], що швидкість струменя значно зменшується з відстанню від сопла до поверхні, що очищується. З метою збереження максимальної швидкості потоку рідини з твердими частинками необхідно витримувати наступні рекомендації по конструктивним залежностям вузла створення потоку з твердими частинками вібраційної машини: зазор між зрізом насадка та сіткою 6 (рис.1) вибираємо за умови $h = 1 - 2 \text{мм}$; відстань між сіткою 6 (рис.1) та зрізом сопла вибираємо за умови $h_1 = (2 - 2,5)d_{\text{тв.частки}} \text{мм}$; довжину сопла вибираємо за умови $H_c = 15 - 20 \text{мм}$.

Висновки

Розглянуто аналітичну модель продуктивності процесу зняття забруднення з поверхні деталі та встановлено вплив різних фізичних параметрів на його продуктивність, а саме: оптимальне співвідношення кількості частинок у струмені при найменшій відстані від сопла до поверхні, що очищується, найменших напружень різання матеріалу та швидкості потоку з частинками, яка залежить від параметрів режиму роботи приводу вібраційної машини.

Розглянуто аналітичну модель взаємодії пульсуючого турбулентного потоку рідини з твердими частинками із забрудненою поверхнею та встановлено, що турбулентний пульсуючий потік рідини із частинками має більш значні сили тертя при розтіканні по поверхні із забрудненням та можливий процес його мікрорізання твердими частками.

З аналізу побудованої аналітичної моделі коливального процесу рідини у камері пульсації з насадком в робочому органі вібраційної машини отримано амплітудно-частотну характеристику руху рідини у насадку, яка пов'язана із величиною швидкості та тиском струменя з насадка і має нелінійний характер, а у межах частот від 16 до $22\omega, \text{с}^{-1}$ має максимальну швидкість та відповідно тиск у струменю.

Для подальшого проведення досліджень та створення методики проектування вібраційної машини для очистки і мийки необхідно виконати наступні завдання: експериментально встановити взаємозв'язок конструктивних параметрів з режимами роботи приводу вібраційної машини; визначити оптимальний об'єм твердих часток; визначити оптимальну амплітуду та частоту коливання приводу для створення струменя з максимальним тиском у насадку; провести порівняльні дослідження по продуктивності очищення та мийки модельних забруднень.

Література

1. Тененбаум М.М. Сопротивление абразивному изнашиванию / М.М. Тененбаум. – М.: Машиностроение, 1976. – 270 с.
2. Козлов Ю.С. Очистка изделий в машиностроении / Ю.С. Козлов, О.К. Кузнецов, Н.Ф. Тельнов. – М.: Машиностроение, 1982. – 261 с.
3. Тельнов Н.Ф. Технология очистки сельскохозяйственной техники / Н.Ф. Тельнов. – М.: Колос, 1983. – 256 с.
4. Козлов Ю.С. Очистка автомобилей при ремонте / Ю.С. Козлов. – М.: Транспорт, 1981. – 151 с.
5. Андилахай А.А. Абразивная обработка деталей затопленными струями / А.А. Андилахай. – Мариуполь: ПГТУ, 2006. – 190 с.
6. Сілін Р. І. Вібраційне обладнання на основі гідропульсатора: монографія / Р. І. Сілін, А. І. Гордєєв. – Хмельницький : ХНУ, 2007. – 386 с.
7. А. с. 1130422 СССР, МКИЗ В 08 В 3/10. Устройство для мойки мелких изделий / А.И. Гордеев, Р.И. Силин, Н.А. Сивченко (СССР). – № 3613130/28–12; заявл. 15.04.83; опубл. 23.12.84, Бюл. № 47.
8. А. с. 880519 СССР, МКИЗ В 08 В 3/10. Устройство для промывки изделий / Р.И. Силин, В.П. Кошель, А.И. Гордеев (СССР). – № 2869224/28–12; заявл. 17.12.79; опубл. 15.11.81, Бюл. № 42.
9. Пат. на корисну модель 116030 України, МПК В03В 5/02. Вібраційна машина для мийки радіотехнічних виробів / Гордєєв А. І., Гордєєв О.А. Мігаль В. Г. (Україна); заявник і патентовласник Хмельницький нац. ун-т. – у 2016 10059; Заяв. 03.10.2016; Опубл. 10.05.2017, Бюл. № 9.
10. Пат. на корисну модель № 132837, МПК В08В 3/10 Вібраційна машина для очистки забруднень потоком твердих часток та мийки деталей при ремонті обладнання. Скиба М. Є., Старий А. Р., Гордєєв А. І., Гордєєв О. А. U201810344; Заявл. 19.10.2018. Опубл. 11.03.2019. Бюл. №5.
11. Цыгановский А. Б. Производительность гидроабразивной обработки затопленными струями / А.Б. Цыгановский // Збірник наукових праць Східноукраїнського державного університету. Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції “Проблеми електронної промисловості у перехідний період”. – Луганськ, СУДУ, 1998. – С. 48–51.
12. Андилахай А. А. Условия повышения производительности абразивной обработки / А. А. Андилахай. – Вісник НТУ “ХПІ”, №53(959). 2012. – С. 42–47.
13. Бернулли Д. Гидравлика или записки о силах и движениях жидкости / Д. Бернулли. – М. : ГИТТЛ, 1959. – 248 с.
14. Садовский В. И. Очистка деталей гидравлическими струями при ремонте тракторов, автомобилей и сельскохозяйственных машин : дис. канд. техн. наук : 05.02.08 / В. И. Садовский. – М., 1972. – 146 с.
15. Сілін Р. І. Визначення характеристики деформаційної здатності мембрани пульсаційної камери устаткування для очищення / Р. І. Сілін, А. І. Гордєєв, Ю. В. Савицький // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 1997. – № 2. – С. 67–70.
16. Справочник по гидравлике / под ред. В. А. Большакова. – 2-е изд., перераб. и доп. – К. : Выща школа, 1984. – 343 с.

References

1. Tenenbaum M.M. Resistance to abrasion. M. : Mashinostroenie, 1976. – 270 p.
2. Kozlov Yu.S., Kuznetsov O.K., Telnov N.F. Cleaning products in mechanical engineering. Moscow: Mechanical Engineering, 1982. - 261p.
3. Telnov N.F. Technology of cleaning of agricultural machinery. M. : Kolos, 1983. – 256 p.
4. Kozlov Yu.S. Cleaning cars at repairs. M. : Transport, 1981. - 151 p.
5. Andilakhai A.A. Abrasive treatment of parts with flooded jets. Mariupol: PGU, 2006. – 190 p.
6. Silin R.I., Hordeev A.I. Vibration equipment on the basis of a hydropulse: a monograph. Khmelnytsky: KhNU, 2007. – 386 p.
7. A. s. 1130422 USSR, MKI3 at 08 V 3/10. Device for washing small articles / A.I. Hordeev, R.I. Silin, N.A. Syvchenko (USSR). - №.3613130 / 28-12; stated. April 15, 83; published 23.12.84, Bull. № 47.
8. A. s. 880519 USSR, MKI3 at 08 V 3/10. Device for product rinsing / R.I. Silin, V.P. Koshel, A.I. Hordeev (USSR). - No. 2869224 / 28-12; stated. 17.12.79; published November 15, 81, Bull. № 42.
9. Pat. to utility model 116030 of Ukraine, IPC B03B 5/02. Vibration machine for sinking radio products / Hordeev AI, Hordeev O.A. Migal V.G.; Applicant and patent holder Khmelnytsky National un - u 2016 10059; Application 03.10.2016; Published by May 10, 2017, Bul. № 9.
10. Pat. for utility model No. 132837, МПК В08В 3/10 Vibration machine for purification of contaminations by a stream of solid particles and washing of details at repair of equipment. Skyba M.E., Stariy A.R., Hordeev A.I., Hordeev O.A. U201810344; Declared 19.10 2018. Published March 11, 2019. Bull №5.
11. Tsyganovskiy A.B. Productivity of hydroabrasive treatment with flooded jets. Collection of Science Practitioners of the Skhidnoukrainsky State University. Materials of the International Scientific and Practical Conference “Problems of Electronic Industry in the Transition Period”. - Lugansk, COURT, 1998. – pp. 48-51.
12. Andilakhai A.A. Conditions for increasing the productivity of abrasive processing. - Bulletin of NTU "KhPI", №53. 2012. pp. 42-47.
13. Bernoulli D. Hydraulics or notes on the forces and movements of a liquid. - M.: GITTL, 1959. – 248 p.
14. Sadovskiy V.I. Cleaning of parts with hydraulic streams in the repair of tractors, automobiles and agricultural machines: dis. cand. tech. sciences: 05.02.08. - M., 1972. – 146 p.
15. Silin R. I., Hordeev A.I., Savitskiy Yu. V. Vyznachennya characteristics of the deformation of the membrane of the pulsation chamber of the device for cleaning. Vimiryuvalna and numerical technology in technological processes. 1997. №2. – pp. 67-70.
16. Handbook of hydraulics / ed. V. A. Bolshakova. - 2nd ed., Rev. and add. - K.: Vyscha school, 1984. – 343 p.

Надійшла / Paper received : 25.11.2020 p. Надрукована/Printed :04.01.2021 p.