

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

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

СТАРИЙ АНДРІЙ РОМАНОВИЧ

УДК 621.33

ДИСЕРТАЦІЯ


**ОБГРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ВІБРАЦІЙНОЇ МАШИНИ ДЛЯ
ОЧИЩЕННЯ ТА МИЙКИ ДЕТАЛЕЙ ПРИ РЕМОНТІ**

Спеціальність 131 – Прикладна механіка

Галузь знань 13 – механічна інженерія

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело


А.Р. Старий

Науковий керівник: Гордєєв Анатолій Іванович, доктор технічних наук,
професор, Заслужений винахідник України

Хмельницький – 2022

АНОТАЦІЯ

Старий А.Р. Обґрунтування параметрів вібраційної машини для очищення та мийки деталей при ремонті. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 131 – Прикладна механіка. – Хмельницький національний університет, Хмельницький, 2022.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню науково-технічної задачі створення нових конструкцій вібраційних машин для очищення та мийки деталей при ремонті з обґрунтуванням їх конструктивних параметрів і раціональних режимів роботи приводу та створенню методики їх розрахунків.

Об'єктом дослідження є процес очистки та мийки забруднень деталей машин зануреним пульсуючим струменем рідини у вібраційній машині.

Предметом дослідження є конструктивні та технологічні параметри вібраційної машини з пульсуючим зануреним струменем миючої рідини, динамічні характеристики робочого органу машини, раціональні режими роботи вібраційного приводу.

У вступі наведена загальна характеристика роботи, обґрунтовано актуальність теми досліджень, розкритий зв'язок роботи з науковими програмами, планами та темами, сформульована мета, завдання, об'єкт та предмет дослідження, вказана наукова новизна та практичне значення одержаних результатів, визначений особистий внесок здобувача, наведені дані про апробацію, публікації, структуру та обсяг роботи.

Головний інтерес для практики створення вібраційних машин очистки та мийки забруднень деталей у дрібносерійному та одиничному типі виробництва при ремонті машин становить встановлення виду залежностей між основними технологічними параметрами, такими, як динамічний тиск робочого середовища, розмір робочих тіл (кульок, абразивних зерен, газових пухирців) їхня швидкість руху, концентрація, кут атаки, фізико-механічні властивості

часток та конструктивні параметри і режими роботи приводу вібраційних машини. Це обумовлює необхідність оптимального вибору величин технологічних параметрів, режимів роботи приводу вібраційних машини в умовах конкретного виду забруднення поверхні деталей.

Вирішення науково-технічної задачі, а саме створення вібраційної машини для очистки та мийки деталей при ремонті обладнання та обґрунтування її конструктивних параметрів і визначення режимів роботи приводу є актуальною науково-технічною задачею.

У першому розділі здійснено системний аналіз природи виникнення забруднень на поверхні деталей машин, проведено аналіз та класифікацію методів мийки та очистки забруднень деталей машин сильно та слабо зв'язаних з поверхнею, сучасних конструкцій машин і обладнання для мийки та очистки.

Проведений аналіз стану наукових досліджень застосування вібраційних технологій у процесах очистки та мийки показав, що останній час знаходить широке застосування мийка забруднень поверхонь зануреними потоками рідини з кавітаційними пухирцями та очистка забруднень поверхонь потоком рідини з твердими частинками і є доцільність не лише у поглибленому вивченні та дослідженнях технологічних можливостей мийки та очистки зануреними двофазними потоками рідини, а і у напрямі створення нових конструкцій вібраційних машин. Аналіз сучасних конструкцій обладнання та машин для мийки та очистки, показав переваги і недоліки різних конструкцій. Наведено аналіз вібраційних приводів та обґрунтовано вибір ексцентрикового приводу для запропонованої вібраційної машини.

З аналізу результатів теоретичних та експериментальних досліджень різних авторів процесу мийки та очистки було встановлено, що основними параметрами, які впливають на інтенсивність процесу мийки та очистки є збільшення значення максимального тиску P_{max} зануреного пульсуючого струменя рідини та його швидкості, що веде до збільшення нормальних та дотичних напружень у забрудненні та у свою чергу призводить до збільшення продуктивності процесу.

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

У другому розділі визначено основні фізичні фактори, що діють на забруднення у процесі мийки пульсуючим зануреним струменем рідини з газовими пухирцями та у процесі очистки пульсуючим зануреним струменем рідини з твердими частинками.

Побудовано аналітичну модель руху рідини у насадку вібраційної машини для мийки забруднень з урахуванням гідроудару та побудовано аналітичну модель руху рідини у насадку вібраційної машини для очистки забруднень з визначенням його амплітудо-частотної характеристики.

Побудовано та проаналізовано аналітичну модель роботи сопла-ежектора з обґрунтуванням його конструктивних параметрів із визначенням максимальної кількості твердих частинок, які попадають за цикл у пульсуючий струмінь у робочому органі вібраційної машини.

Проаналізовано зміну кінематичних параметрів твердих частинок у пульсуючому зануреному струмені, що виходить з сопла-ежектора в залежності від відстані до поверхні деталі. З аналізу попередніх досліджень по визначенню продуктивності процесу очистки поверхні струменем з твердими частинками встановлено вплив різних параметрів вібраційної машини на продуктивність очистки пульсуючим струменем рідини з твердими частинками та побудована аналітична залежність продуктивності від параметрів процесу очистки у вібраційній машині.

При цьому отримані наступні наукові результати:

1. Отримано подальший розвиток побудови математичної моделі руху робочого тіла у насадку камери пульсації вібраційній машині, що описує його динаміку та отримано амплітудно-частотну характеристику з якої визначаються кінематичні і динамічні параметри зануреного пульсуючого струменя;

2. Отримав подальший розвиток аналітичного визначення продуктивності вібраційної машини для очистки та мийки пульсуючим зануреним струменем

рідини з твердими частинками. Враховано особливості конструктивних параметрів машини та режимів роботи вібраційного приводу;

У третьому розділі описана загальна методологія досліджень, проведених у роботі, що базується на системному підході для вирішення поставленого науково-технічного завдання. У процесі виконання дисертаційного дослідження розроблено: експериментальну установку для моделювання фізичних процесів, що проходять у вібраційній машині для очистки та мийки забруднень, оригінальну конструкцію датчика вимірювання пульсуючого тиску зануреного струменя і застосовано сучасну вимірювальну базу.

Наведено конструкції установок та методики для проведення: багатофакторного експерименту по визначенню динамічних характеристик робочого органа для мийки від його конструктивних параметрів та режимів роботи приводу; проведення порівняльних досліджень різних способів очищення і мийки та визначення продуктивності очистки та мийки забруднень у вібраційній машині; визначення параметрів конструктивних елементів приводу вібраційної машини та особливості їх розрахунку у Cosmos Works; обробки експериментальних даних та оцінка точності отриманих результатів.

У четвертому розділі наведено результати експериментальних досліджень обґрунтування конструктивних параметрів вузлів та режимів роботи приводу вібраційної машини для очистки та мийки деталей.

Експериментальні дослідження візуалізації процесу виникнення пульсуючого зануреного струменя рідини у робочому органі вібраційної машини показали, що вже при незначних частотах коливань від 8 Гц проявляється ефект кавітаційного росту та сплескування пухирців у камері пульсації вібраційної машини та викидання у пульсуючому зануреному струмені газорідинної суміші.

Проведені дослідження по визначенню зміни величини тиску пульсуючого струменя по поверхні від конструктивних параметрів вузлів

вібраційної машини та амплітуди і частоти коливань приводу вібраційної машини.

Отримані результати багатofакторного експериментального дослідження для визначення динамічних параметрів пульсуючого зануреного струменя в залежності від конструктивних параметрів та режимів роботи приводу вібраційної машини.

При цьому отримані наступні наукові результати: експериментально визначені оптимальні, для отримання максимальної продуктивності, співвідношення конструктивних параметрів вібраційної машини та раціональні режими роботи її приводу модуля для очистки забруднень: частота коливань f від 16 до 18 Гц; амплітуда коливань $A = 2$ мм при співвідношенні діаметра камери пульсації до діаметра насадка $D/d = 10$, а для модуля мийки забруднень: $A = 2$ мм; частота коливань f від 13 до 14 Гц; амплітуда коливань $A = 2$ мм при співвідношенні діаметра камери пульсації до діаметра насадка $D/d = 10$.

Експериментальні дослідження процесу очистки поверхонь деталей зануреним пульсуючим струменем рідини з твердими частинками показали збігання з теоретичними передбаченнями про механізм зняття забруднення, а експериментальні дослідження процесу мийки поверхонь деталей зануреним пульсуючим струменем рідини з пухирцями підтвердили механізм зняття в'язкого забруднення за рахунок збільшення нормальних та дотичних напружень дії газорідної суміші на забруднення.

У результаті дослідження продуктивності очищення модельного забруднення встановлено, що збільшення кута атаки пульсуючого зануреного струменя з металевими кульками від 90^0 до 125^0 призводить до зростання продуктивності очистки (починають значно впливати дотичні напруження між кулькою та забрудненням, що призводять до його більш активного зривання). Подальше збільшення кута веде до незначного зростання продуктивності обробки (починається зменшення впливу нормальних напружень між кулькою та забрудненням). У результаті проведених експериментальних досліджень встановлено, що застосування зворотного клапану мембранного типу, який

з'єднує камеру пульсації з ванною для очистки, дозволяє збільшити величину максимального тиску зануреного пульсуючого струменя рідини завдяки зменшенню об'єму кавітаційних пухирців у камері пульсації при втягуванні у неї рідини. Це в свою чергу дозволяє отримати збільшення максимального тиску струменя рідини з насадки у два рази при частотах від 16 до 18 Гц та підвищення продуктивності очистки вібраційної машини.

У п'ятому розділі наведена загальна методика проектування модулів вібраційної машини для очистки та мийки і обґрунтування конструктивних параметрів основних її вузлів з визначенням потужності приводу.

Практичне значення отриманих результатів для машинобудування полягає у створенні методики проектування недорогих вібраційних машин для очищення та миття деталей при ремонті у дрібносерійному та одиничному виробництві.

Розроблена концепція побудови вібраційної машини для очистки та мийки деталей від забруднень та методика її інженерних розрахунків буде корисна інженерам та науковцям, які працюють у цій галузі, матимуть можливість впроваджувати у виробництво економічні високоефективні та надійні зразки вібраційних машин.

Ключові слова: вібраційна машина, конструктивні параметри, раціональні частотні режими роботи приводу, очищення затопленим пульсуючим струменем з твердими частинками, мийка пульсуючим струменем рідини з кавітаційними пухирцями, математичне моделювання, проектування.

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

Статті у закордонних наукових періодичних виданнях:

1. Staryi A. R., Hordeev A. I. Research the impact on productivity of parameters and operating modes of the vibration machine drive for cleaning and washing contamination by submerget stream jet with sold particles. *East European science journal*. 2021. Vol.1, №4(68). pp. 46–52. <https://doi.org/10.31618/ESSA.2782-1994.2021.1.68.13>. Особистий внесок здобувача: *ідея розробки конструкції вузла*

очистки твердими частинками вібраційної машини та результати багатofакторного експерименту.

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

2. Старий А. Р., Гордєєв А. І. Технологія очистки та мийки забруднень деталей машин при ремонті потоком рідини з твердими частками та вібраційна машина для її реалізації. *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*. 2019. №4, т.2. С. 7–14. DOI 10.31891/2307-5732-2019-275-4-7-14. Особистий внесок здобувача: проведення аналізу існуючих методів очистки та мийки, створення класифікації методів в залежності від галузі промисловості та видів забруднень поверхонь деталей і обґрунтування об'єкту досліджень.

3. Старий А. Р., Гордєєв А. І. Обґрунтування параметрів динамічних процесів очистки та мийки у вібраційній машині зануреним пульсуючим струменем рідини з твердими частинками. *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*. 2020. №6. С. 84–92. DOI 10.31891/2307-5732-2020-291-6-84-92. Особистий внесок здобувача: побудова аналітичної моделі руху робочого тіла у вібраційній машині, що описує його динаміку та отримано амплітудно-частотну характеристику з якої визначаються кінематичні та динамічні параметри зануреного пульсуючого струменя.

4. Старий А. Р., Гордєєв А. І. Аналіз аналітичних моделей вібраційного приводу машини для мийки і очистки пульсуючим струменем рідини та експериментальне дослідження режимів його роботи. *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*. 2021. №4. С. 77–83. DOI 10.31891/2307-5732-2021-299-4-77-83. Особистий внесок здобувача: проведення аналізу аналітичних моделей вібраційного приводу машини, проведення експериментального дослідження режимів його роботи.

5. Старий А. Р. Експериментальне дослідження параметрів приводу вібраційної машини для мийки і очистки зануреним пульсуючим струменем рідини з твердими частинками та визначення її продуктивності. *Вісник*

Хмельницького національного університету. Технічні науки. 2021. №5. С. 52–58. DOI 10.31891/2307-5732-2021-301-5-52-58.

Патент на корисну модель України:

6. Вібраційна машина для очистки забруднень потоком твердих часток та мийки деталей при ремонті обладнання: пат. 132837 Україна : МПК В08В 3/10. u2018 10344 ; заявл. 19.10.18; опубл. 11.03.19, Бюл. №5. Особистий внесок здобувача: *ідея розробки конструкції вузлів вібраційної машини, опис її конструкції та принципу роботи, частка кожного з авторів є рівною.*

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

7. Старий А., Гордєєв А. Розробка технології та конструкції вібраційної машини для очистки та мийки деталей обладнання легкої промисловості при ремонті. *Вібрації в техніці та технологіях: 2018 рік* : тези доповідей XVII Міжнародної наук.-техн. конф., 11 – 12 жовт. 2018 р. Дрогобич : Посвіт, 2018. С. 62–63. Особистий внесок здобувача: *розробка конструкції вібраційної машини, опис її конструкції та принципу роботи.*

8. Старий А. Р., Гордєєв А. І. Аналіз процесу взаємодії газорідного середовища з поверхнею деталей при мийці перед нанесенням покриттів. *Проблеми довговічності матеріалів, покриттів та конструкцій: 2018 рік* : тези доповідей VI Міжнародної наук.-техн. конф., 13 – 15 верес. 2018 р. Вінниця : ВНТУ, 2018. С. 14–15. Особистий внесок здобувача: *проведено аналітичний аналіз процесу взаємодії газорідного середовища з поверхнею деталей.*

9. Старий А. Р., Гордєєв А. І. Використання багатофазних середовищ для очистки та мийки забруднень деталей машин. *VIII Українсько-Польські Наукові Діалоги: 2019 рік* : тези доповідей VIII Міжнародної наук.-техн. конф., 16 – 19 жовт. 2019 р. Хмельницький : ХНУ, 2019. С. 83–84. Особистий внесок здобувача: *проведено аналіз параметрів, які впливають на продуктивність очистки у вібраційній машині.*

10. Старий А. Р., Гордєєв А. І., Гордєєв О. А. Вібраційна машина для очистки та мийки. *Science and civilization – 2020: 2020 рік* : materials of the XVI International scientific and practical Conference. 30 January – 07 February, 2020.

Sheffield : Science and education LTD, 2020. С. 67–71. Особистий внесок здобувача: *ідея введення у конструкцію модульної вібраційної машини зворотного клапана, опис принципу її роботи.*

11. Старий А. Р., Гордєєв А. І., Сілін І. Р. Визначення оптимальних конструктивних параметрів та режимів роботи приводу вібраційної машини для мийки зануреним пульсуючим струменем рідини з твердими частинками. *Europejska XXI powieka – 2021: 2021: materially XVII Miedzynarodowej nauk.-prakt. konf., 07 – 15 maja, 2021 roku. Przemysl : Nauka I studia, 2021. С. 71–76.* Особистий внесок здобувача: *проведення планування експерименту, отримання рівняння регресії, обробка отриманих результатів, оформлення графічних залежностей.*

12. Старий А. Р., Гордєєв А. І. Експериментальне дослідження процесу мийки забруднення пульсуючим струменем рідини з кавітаційними пухирцями. *IX Українсько-Польські Наукові Діалоги: 2021 рік : тези доповідей IX Міжнародної наук.-техн. конф., 20 – 23 жовт. 2021 р. Хмельницький : ХНУ, 2021. С. 153–155.* Особистий внесок здобувача: *проведення експериментальних досліджень мийки модельних забруднень, оброблення отриманих результатів.*

13. Старий А. Р., Гордєєв А. І. Особливості методики визначення параметрів конструктивних елементів вузла пульсації вібраційної машини для очистки та мийки у Cosmos Works. *Proceedings of the 9th International Scientific and Practical Conference «International Forum: Problems and Scientific Solutions».* February 6-8, 2022. Melbourne, Australia: CSIRO Publishing House, 2022. С.465-470. Особистий внесок здобувача: *визначення параметрів конструктивних елементів вузла пульсації вібраційної машини для очистки та мийки у Cosmos Works.*

SUMMARY

Staryy A. R. Substantiation of parameters of the vibrating machine for cleaning and washing of details at repair – Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

The dissertation on competition of a scientific degree of the doctor of philosophy on a specialty 131 – Applied mechanics. – Khmelnytskyi National University, Khmelnytskyi, 2022.

The dissertation is devoted to the solution of scientific and technical problem of creation of new designs of vibrating machines for cleaning and washing of details at repair with substantiation of their constructive parameters and rational modes of operation of the drive and creation of a technique of their calculations.

The object of research is the process of cleaning and washing contaminants of machine parts by an immersed pulsating jet of liquid in a vibrating machine.

The subject of research is the design and technological parameters of the vibrating machine with a pulsating immersed jet of detergent, the dynamic characteristics of the working body of the machine, the rational modes of operation of the vibrating drive.

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

The main interest in the practice of creating vibrating machines for cleaning and washing contaminants in small series and single type of production during machine repair is to establish the relationship between the main technological parameters, such as dynamic pressure of the working medium, size of working bodies (balls, abrasive grains, gas bubbles) their speed, concentration, angle of attack, physical and mechanical properties particles and design parameters and modes of operation of the vibrating machine drive. This necessitates the optimal choice of values of technological parameters, modes of operation of the vibrating machine drive in terms of a particular type of contamination of the surface of the parts.

Solving the scientific and technical problem, namely the creation of a vibrating machine for cleaning and washing parts during equipment repair and substantiation of

its design parameters and determining the modes of operation of the drive is an urgent scientific and technical task.

The first section provides a systematic analysis of the nature of contamination on the surface of machine parts, analysis and classification of methods of washing and cleaning contaminants of machine parts strongly and weakly associated with the surface, modern designs of machines and equipment for washing and cleaning.

The analysis of the state of scientific research on the use of vibration technologies in cleaning and washing processes has shown that recently the washing of surface contaminants by immersed liquid streams with cavitation bubbles and cleaning of surface contaminants by liquid flow with solid particles is widely used. possibilities of washing and cleaning by the immersed two-phase streams of liquid, and also in the direction of creation of new designs of vibrating cars. Analysis of modern designs of equipment and machines for washing and cleaning, showed the advantages and disadvantages of different designs. The analysis of vibration drives is given and the choice of eccentric drive for the offered vibrating machine is substantiated.

From the analysis of the results of theoretical and experimental studies of various authors of the washing and cleaning process it was found that the main parameters influencing the intensity of the washing and cleaning process are increasing the maximum pressure P_{max} of the immersed pulsating fluid jet and its velocity in pollution and in turn increases the productivity of the process.

The results of the analysis of literature sources and patent review made it possible to formulate goals and objectives to achieve this goal. The second section identifies the main physical factors that affect the contamination in the process of washing with a pulsating immersed jet of liquid with gas bubbles and in the process of cleaning with a pulsating immersed jet of liquid with solid particles.

An analytical model of the movement of liquid in the nozzle of the vibrating machine for washing contaminants taking into account the water hammer is built and an analytical model of the movement of liquid in the nozzle of the vibrating machine for cleaning contaminants with determining its amplitude-frequency characteristics.

An analytical model of ejector nozzle operation is constructed and analyzed with substantiation of its design parameters with determination of the maximum number of solid particles that fall into the pulsating jet in the working body of the vibrating machine per cycle.

The change of kinematic parameters of solid particles in the pulsating immersed jet coming out of the ejector nozzle depending on the distance to the surface of the part is analyzed.

From the analysis of previous studies to determine the productivity of the surface cleaning process with a jet of solid particles, the influence of different parameters of the vibrating machine on the productivity of pulsating jet cleaning of solids and the analytical dependence of productivity on the parameters of the cleaning process in a vibrating machine.

The following scientific results were obtained:

1. Further development of a mathematical model of the working fluid in the nozzle of the pulsation chamber vibrating machine, which describes its dynamics and obtained amplitude-frequency characteristics from which to determine the kinematic and dynamic parameters of the immersed pulsating jet;

2. Received further development of analytical determination of the productivity of the vibrating machine for cleaning and washing with a pulsating immersed jet of liquid with solid particles. The peculiarities of the design parameters of the machine and modes of operation of the vibrating drive are taken into account;

The third section describes the general methodology of research conducted in the work, based on a systematic approach to solving the scientific and technical problem.

In the process of dissertation research developed: experimental setup for modeling physical processes in a vibrating machine for cleaning and washing contaminants, the original design of the sensor for measuring the pulsating pressure of the submerged jet and used a modern measuring base.

Designs of installations and methods for carrying out: multifactor experiment on definition of dynamic characteristics of a working body for a sink from its

constructive parameters and operating modes of the drive are resulted; conducting comparative studies of different methods of cleaning and washing and determining the productivity of cleaning and washing of dirt in the vibrating machine; determination of parameters of structural elements of the vibrating machine drive and features of their calculation in Cosmos Works; processing of experimental data and evaluation of the accuracy of the obtained results.

The fourth section presents the results of experimental studies to substantiate the design parameters of components and modes of operation of the vibrating machine drive for cleaning and washing parts.

Experimental studies of visualization of the process of pulsating immersed jet of liquid in the working body of the vibrating machine showed that even at low oscillation frequencies of 8 Hz the effect of cavitation growth and bubbling in the pulsation chamber of the vibrating machine and ejection in the pulsating immersed jet gas. Researches on definition of change of size of pressure of a pulsating stream on a surface from constructive parameters of knots are carried out vibrating machine and the amplitude and oscillation frequency of the vibrating machine drive.

The results of a multifactor experimental study to determine the dynamic parameters of the pulsating submerged jet depending on the design parameters and modes of operation of the vibrating machine drive. The following scientific results were obtained: experimentally determined the optimal, to obtain maximum performance, the ratio of design parameters of the vibrating machine and rational modes of operation of its drive module for cleaning contaminants: oscillation frequency f from 16 to 18 Hz; amplitude of oscillations $A = 2$ mm at the ratio of the diameter of the pulsation chamber to the diameter of the nozzle $D/d = 10$, and for the module for washing contaminants: $A = 2$ mm; oscillation frequency f from 13 to 14 Hz; oscillation amplitude $A = 2$ mm at the ratio of the diameter of the pulsation chamber to the diameter of the nozzle $D/d = 10$. Experimental studies of the process of cleaning the surfaces of parts by submerged pulsating jet of liquid with solid particles showed coincidence with theoretical predictions about the mechanism of removal of contamination, and experimental studies of the process of cleaning

surfaces of parts by submerged pulsating jet of fluid with bubbles confirmed effects of gas-liquid mixture on pollution.

As a result of the study of model contamination cleaning productivity, it was found that increasing the angle of attack of a pulsating submerged jet with metal balls from 90° to 125° leads to an increase in cleaning productivity (tangential stresses between the ball and dirt). Further increase in the angle leads to a slight increase in processing productivity (begins to reduce the impact of normal stresses between the ball and the contamination). Experimental studies have shown that the use of a diaphragm check valve, which connects the pulsation chamber with the cleaning bath, allows to increase the maximum pressure of the immersed pulsating fluid jet by reducing the volume of cavitation bubbles in the pulsation chamber when retracted in her fluid. This, in turn, allows to increase the maximum pressure of the liquid jet from the nozzle twice at frequencies from 16 to 18 Hz and increase the cleaning performance of the vibrating machine.

The fifth section presents the general method of designing the modules of the vibrating machine for cleaning and washing and substantiation of the design parameters of its main components to determine the power of the drive.

The practical significance of the obtained results for mechanical engineering lies in the created methods of designing inexpensive vibrating machines for cleaning and washing parts during repairs in small-scale and single production.

The developed concept of construction of a vibrating machine for cleaning and washing of parts from contaminants and the method of its engineering calculations will be useful to engineers and scientists working in this field, will be able to implement cost-effective and reliable models of vibrating machines.

Key words: vibrating machine, design parameters, rational frequency modes of drive operation, cleaning by flooded pulsating jet with solid particles, washing by pulsating jet of liquid with cavitation bubbles, mathematical modeling, design.

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

Articles in foreign scientific periodicals:

1. Staryi A. R., Hordieiev A. I. Research the impact on productivity of parameters and operating modes of the vibration machine drive for cleaning and washing contamination by submerget stream jet with sold particles. *East European science journal*. V.1, 4 (68) 2021. pp. 46–52. doi.org/10.31618/ESSA.2782-1994.2021.1.68. Personal contribution of the applicant: *the idea of developing the design of the treatment plant solid particles of the vibrating machine and the results of a multifactor experiment*.

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

2. Staryy A. R., Hordieiev A. I. Technology of cleaning and washing of contaminants of machine parts during repair by fluid flow with solid particles and vibrating machine for its implementation. *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences. Technical sciences*. 2019. №4. Vol.2. pp. 7–14. Applicant's personal contribution: *analysis of existing cleaning and washing methods, creation of a classification of methods depending on the industry and types of contamination of surface parts and substantiation of the object of research*.

3. Staryy A. R., Hordieiev A. I. Substantiation of parameters of dynamic processes of cleaning and washing in the vibrating machine by the immersed pulsating stream of liquid with firm particles. *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences. Technical sciences*. 2020. №6. pp. 84–92. DOI 10.31891/2307-5732-2019-275-4-7-14. Personal contribution of the applicant: *construction of an analytical model of the movement of the working fluid in the vibrating machine, which describes its dynamics and obtained amplitude-frequency characteristics from which the kinematic and dynamic parameters of the immersed pulsating jet are determined*.

4. Staryy A. R., Hordieiev A. I. Analysis of analytical models of the vibrating drive of the machine for washing and cleaning with a pulsating jet of liquid and experimental study of its modes of operation. *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences. Technical sciences*. 2021. №4. pp. 77–83. DOI 10.31891/2307-5732-2021-299-4-77-83. Personal contribution of the applicant:

analysis of analytical models of the vibrating drive of the machine, conducting an experimental study of its modes of operation.

5. Staryy A. R., Experimental study of the parameters of the drive of the vibrating machine for washing and cleaning with a submerged pulsating jet of liquid with solid particles and determine its productivity. *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences. Technical sciences.* 2021. №5. pp. 52–58. DOI 10.31891/2307-5732-2021-301-5-52-58.

Patent for utility model of Ukraine:

6. Vibrating machine for cleaning contaminants by the flow of solid particles and washing parts during equipment repair: Pat. 132837 Ukraine: IPC B08B 3/10. u 2018 10344; stated 19.10.18; publ. 11.03.19, Bull. №5. Personal contribution of the applicant: *the idea of developing the design of the vibrating machine, description of its design and principle of operation, the share of each of the authors is equal.*

Scientific works that certify the approbation of the dissertation materials:

7. Staryy A., Hordieiev A. Development of technology and design of vibrating machine for cleaning and washing parts of light industry equipment during repair. *Vibrations in engineering and technology:* 2018: abstracts of the XVII International scientific-technical. Conf., Oct. 11–12. 2018. Drohobych: Posvit, 2018. pp. 62–63. Personal contribution of the applicant: *development of the design of the vibrating machine, description of its design and principle of operation.*

8. Staryy A. R., Hordieiev A. I. Analysis of the process of interaction of the gas-liquid medium with the surface of the parts during washing before coating. *Problems of durability of materials, coatings and structures:* 2018: abstracts of reports of the VI International scientific and technical. Conf., September 13–15. 2018. Vinnytsia: VNTU, 2018. pp. 14–15. Personal contribution of the applicant: *an analytical analysis of the process of interaction of the gas-liquid medium with the surface of the parts.*

9. Staryy A. R., Hordieiev A. I. Use of multiphase media for cleaning and washing contaminants of machine parts. *VIII Ukrainian-Polish Scientific Dialogues:* 2019: abstracts of the VIII International Science and Technology. Conf., Oct. 16–19.

2019. Khmelnytsky: KhNU, 2019. pp. 83–84. Personal contribution of the applicant: *an analysis of the parameters that affect the performance of cleaning in the vibrating machine.*

10. Staryy A. R., Hordieiev A. I., Hordieiev O. A. Vibrating machine for cleaning and washing. *Science and civilization - 2020: 2020: materials of the XVI International scientific and practical Conference.* 30 January – 07 February, 2020. Sheffield: Science and education LTD, 2020. pp. 67–71. Personal contribution of the applicant: *introduction of a non-return valve into the design of a modular vibrating machine, description of the principle of its operation.*

11. Staryy A. R., Hordieiev A. I., Silin I. R. Determination of optimal design parameters and modes of operation of the drive of the vibrating machine for washing by an immersed pulsating jet of liquid with solid particles. *European XXI century - 2021: 2021: materials XVII Miedzynarodowej nauk.-prakt. conf.,* 07 – 15 May 2021. Przemysl: Nauka I studia, 2021, pp. 71–76. Personal contribution of the applicant: *conducting the planning of the experiment, obtaining the regression equation, processing the results, the design of graphical dependencies.*

12. Staryy A. R., Hordieiev A. I. Experimental study of the process of washing contamination by pulsating fluid with cavitation bubbles. *IX Ukrainian-Polish Scientific Dialogues: 2021: abstracts of the IX International Science and Technology. Conf.,* Oct. 20 – 23. 2021 Khmelnytsky: KhNU, 2021. pp. 153–155. Personal contribution of the applicant: *conducting experimental studies of washing model contaminants, processing the results.*

13. Staryy A. R., Hordieiev A. I. Peculiarities of the method of determining the parameters of the structural elements of the pulsation unit of the vibrating machine for cleaning and washing in Cosmos Works. *Proceedings of the 9th International Scientific and Practical Conference "International Forum: Problems and Scientific Solutions".* February 6-8, 2022. Melbourne, Australia: CSIRO Publishing House, 2022. C.465-470. Personal contribution of the applicant: *determination of the parameters of the structural elements of the pulsation unit of the vibrating machine for cleaning and washing in Cosmos Works*

ЗМІСТ

АНОТАЦІЯ.....	2
ВСТУП.....	23
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ЗАСТОСУВАННЯ ВІБРАЦІЙНИХ ПРОЦЕСІВ У ТЕХНОЛОГІЯХ І ТЕХНІЦІ ДЛЯ ОЧИСТКИ ТА МИЙКИ ЗАБРУДНЕНЬ ПРИ ВИГОТОВЛЕНІ ДЕТАЛЕЙ І РЕМОНТІ ОБЛАДНАННЯ.....	31
1.1. Аналіз природи виникнення забруднень на поверхні деталей машин та методів очистки і мийки	31
1.2. Характеристика властивостей забруднень деталей машин та технологічних рідин для очищення і мийки	39
1.3. Аналіз основ теорії та практики очистки потоком твердих частинок	43
1.4. Існуючі конструкції установок та обладнання для очистки затопленими струменями з твердими частинками	48
1.5. Аналіз основ теорії та практики мийки забруднень поверхонь деталей та вузлів газорідним зануреним струменем	52
1.6. Існуючі конструкції установок та обладнання для мийки газорідним потоком	61
1.7. Аналіз об'єкта досліджень.....	68
1.8. Вибір вібраційного приводу для машини очистки та мийки забруднень поверхонь деталей.....	71
1.9. Висновки до розділу 1. Ціль і завдання досліджень.....	72
РОЗДІЛ 2. ПОБУДОВА МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ РУХУ БАГАТОФАЗНОГО СЕРЕДОВИЩА У РОБОЧОМУ ОРГАНІ ВІБРАЦІЙНОЇ МАШИНИ ТА ОБГРУНТУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ І РЕЖИМІВ РОБОТИ ПРИВОДУ	75
2.1. Конструкція модульної вібраційної машини для очистки забруднень потоком твердих часток та мийки деталей при ремонті	

	20
обладнання.....	75
2.2. Аналіз основних фізичних факторів, що діють на забруднення у процесі мийки пульсуючим зануреним струменем рідини з газовими пухирцями.....	78
2.3. Аналіз основних фізичних факторів, що діють на забруднення у процесі очистки пульсуючим зануреним струменем рідини з твердими частинками	81
2.4. Побудова аналітичної моделі руху рідини у насадку робочого органу вібраційної машини для мийки забруднень з урахуванням гідроудару у камері пульсації	82
2.5. Побудова аналітичної моделі руху рідини у насадку робочого органу вібраційної машини для очистки забруднень з визначенням його амплітудо-частотної характеристики	87
2.6. Побудова аналітичної моделі роботи сопла-ежектора з обґрунтуванням його конструктивних параметрів та визначення кількості твердих частинок за цикл у робочому органі вібраційної машини	93
2.7. Визначення кінематичних параметрів пульсуючого зануреного струменя з твердими частинками, що направлено з сопла-ежектора на забруднену поверхню	98
2.8. Вплив параметрів вібраційної машини на продуктивність очистки пульсуючим струменем рідини з твердими частинками та побудова аналітичної залежності для визначення продуктивності очистки	101
2.9. Висновки до розділу 2.....	105
РОЗДІЛ 3. ПРОГРАМА, МЕТОДИКА ТА УСТАНОВКИ ДЛЯ ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	107
3.1. Програма проведення експериментальних досліджень.....	107
3.2. Експериментальна установка для дослідження процесу очистки та мийки забруднень	108
3.3. Експериментальна установка для дослідження зміни	

	21
миттєвого тиску пульсуючого струменя від конструктивних параметрів та режимів роботи віброприводу.....	112
3.4. Методика проведення порівняльних досліджень різних способів очищення і мийки та визначення продуктивності зняття забруднень у вібраційній машині	116
3.5. Методика досліджень та опис експериментального обладнання для відео-фіксації процесів у насадку камери пульсації вібраційної машини	117
3.6. Методика проведення багатофакторного експерименту для визначення динамічних характеристик робочого органа для мийки від його конструктивних параметрів та режимів роботи приводу	119
3.7. Обробка експериментальних даних та оцінка точності отриманих результатів.....	128
3.8. Обробка експериментальних даних та оцінка точності отриманих результатів.....	131
РОЗДІЛ 4. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ОБГРУНТУВАННЯ КОНСТРУКТИВНИХ ПАРАМЕТРІВ ТА РЕЖИМІВ РОБОТИ ПРИВОДУ ВІБРАЦІЙНОЇ МАШИНИ ДЛЯ ОЧИСТКИ ТА МИЙКИ ДЕТАЛЕЙ	133
4.1. Експериментальне дослідження візуалізації процесу виникнення пульсуючого зануреного струменя рідині у камері пульсації вібраційної машини	133
4.2. Дослідження зміни величини тиску пульсуючого струменя від конструктивних параметрів робочого органу та амплітуди і частоти коливань приводу вібраційної машини	135
4.3. Результати багатофакторного експериментального дослідження динамічних параметрів пульсуючого зануреного струменя в залежності від конструктивних параметрів та режимів роботи приводу вібраційної машини.....	144

4.4. Експериментальні дослідження процесу мийки поверхонь деталей зануреним пульсуючим струменем рідини з пухирцями	150
4.5. Експериментальні дослідження процесу очистки поверхонь деталей зануреним пульсуючим струменем рідини з твердими частинками	153
4.6. Висновки до розділу 4.....	157
РОЗДІЛ 5. МЕТОДИКА ПРОЕКТУВАННЯ МОДУЛІВ ОЧИСТКИ ТА МИЙКИ ВІБРАЦІЙНОЇ МАШИНИ І ОБГРУНТУВАННЯ КОНСТРУКТИВНИХ ПАРАМЕТРІВ ЇЇ ВУЗЛІВ.....	159
5.1. Методика визначення параметрів модуля вібраційної машини для мийки та загальна методика його проектування	159
5.2. Методика визначення параметрів модуля вібраційної машини для очистки та загальна методика його проектування.....	161
5.3. Техніко-функціональний аналіз та методика проектування зворотного клапану для вузла утворення пульсуючого струменя вібраційної машини для очистки забруднень	163
5.4. Визначення параметрів конструктивних елементів вузла пульсації вібраційної машини для очистки та мийки у Cosmos Works.....	169
5.5. Визначення енергетичних витрат приводу машини від конструктивних параметрів та режимів його роботи.....	173
5.6. Порівняння основних параметрів вібраційної машини для мийки та очистки з аналогами.....	175
5.7. Висновки до розділу 5.....	176
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	178
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	181
Додаток А.....	195
Додаток Б.....	198
Додаток В.....	201
Додаток С.....	210

ВСТУП

Унікальні можливості вібраційного поля дозволяють успішно здійснювати не тільки оздоблювальну-зачисну та зміцнювальну операції, але і такі операції, як очистка та мийка деталей машин, сепарація, перемішування, вібраційного транспортування за важких експлуатаційних умов, гомогенізацію, фільтрування, сушіння, насичення середовища певними речовинами, руйнування або фінішну обробку поверхонь та ряд інших процесів.

У багатьох галузях промисловості усе більш широке застосування знаходять вібраційні технологічні процеси у яких використовуються багатофазні середовища. Це можуть бути розплави металів, скла й полімерів, суспензії твердих часток і газових пухирців у рідині, дрібнодисперсні суспензії крапель у газоподібному чи рідкому середовищу і т.п.

Головний інтерес для практики створення вібраційних машин очистки та мийки забруднень деталей у дрібносерійному та одиничному типі виробництва та ремонту машин становить встановлення виду залежностей між основними технологічними параметрами, такими, як динамічний тиск робочого середовища, розмір робочих тіл (кульок, абразивних зерен, газових пухирців) їхня швидкість руху, концентрація, кут атаки, фізико-механічні властивості часток та конструктивні параметри і режими роботи приводу вібраційних машини. Це обумовлює необхідність оптимального вибору величин технологічних параметрів, режимів роботи приводу вібраційних машини в умовах конкретного виду забруднення поверхні деталей.

Наукова робота присвячена розробленню вібраційних машин для очистки та мийки деталей з обґрунтуванням їх конструктивних параметрів та режимів роботи вібраційного приводу.

Актуальність роботи. У процесі виробництва, зберігання та експлуатації машин виникають різноманітні забруднення, що негативно впливають на кінцеву якість виробів, викликають передчасне зношування окремих деталей, погіршення параметрів приладів, вихід із ладу цілих агрегатів

та систем. Це призводить до різкого падіння надійності машин, зростання експлуатаційних та ремонтних витрат. Тому підвищення промислової чистоти машин та збільшення на цій основі їх надійності та ресурсу, призводить до зростання якості виробів які виготовляються на даному обладнанні.

Аналіз літературних джерел показав, що при видаленні різноманітних видів забруднень із поверхні виробів застосовуються різні способи очищення. Кожний спосіб очищення має свої переваги та недоліки, що ґрунтуються, як на особливостях реалізації даного способу очищення або мийки, так і на властивостях забруднень, що необхідно видаляти, їх зв'язку з поверхнею на виробках та місцях їх розташування. Саме тому не існує універсального способу очищення та мийки специфічних забруднень для різних по конфігурації деталей і для кожного окремого випадку слід ретельно зважувати доцільність використання того чи іншого способу та машини для його реалізації.

Розробка та впровадження в промисловість нових способів і машин очищення та мийки забруднених поверхонь у одиничному та дрібносерійному виробництві, що дозволяють отримувати добру якість очищення при незначних витратах, набувають важливого значення.

Вирішення науково-технічної задачі, а саме створення вібраційної машини для очистки та мийки деталей при ремонті обладнання та обґрунтування її конструктивних параметрів і визначення режимів роботи приводу є актуальною науково-технічною задачею.

Зв'язок роботи із науковими програмами, планами, темами.

Дисертаційна робота виконувалась у відповідності до державних і науково-технічних програм за пріоритетними напрямками розвитку науки та техніки України та відповідає положенням Закону України «Про пріоритетні напрями інноваційної діяльності в Україні» від 08.09. 2011р. № 3715-VI та постанови Кабінету Міністрів України від 28.12.2016 р. №1056 «Деякі питання визначення середньострокових пріоритетних напрямів інноваційної діяльності галузевого рівня на 2017-2021 рр.».

Дисертаційна робота виконана у відповідності тематиці держбюджетної теми «Обґрунтування конструктивних параметрів, режимів роботи вібраційної машини для очистки та мийки деталей та дослідження її працездатності» (№ державної реєстрації 0121U110967) у якості виконавця, а також в рамках науково-дослідних робіт кафедри технології машинобудування Хмельницького національного університету.

Мета і завдання досліджень. Мета дисертаційної роботи полягає у розробленні вібраційної машини з пульсуючим зануреним струменем для очищення та мийки деталей при ремонті у дрібносерійному та одиничному виробництві з обґрунтуванням її конструктивних параметрів і раціональних режимів роботи приводу.

Поставлену мету можна реалізувати шляхом вирішення наступних задач:

- розробити фізичну модель вібраційної машини струминного типу для очистки та мийки забруднень, що відображає прояв механічного впливу на різні види забруднень;
- побудувати математичну модель руху робочого середовища у вібраційній машині із зануреним пульсуючим струменем з метою визначення зміни максимального тиску струменя від конструктивних параметрів та режимів роботи вібраційного приводу;
- аналітично визначити залежність продуктивності вібраційної машини струминного типу для очистки та мийки забруднень від режимів приводу та інших параметрів;
- сформулювати методику проведення експериментальних досліджень динамічних параметрів роботи вібраційної машини мембранного типу, характеристик її приводу і визначити співвідношення її конструктивних параметрів та розробити реєструючі апаратуру і датчики;
- за допомогою відео-фіксації дослідити процес формування пульсуючого зануреного струменя миючої рідини з газовими пухирцями та твердими частинками;

- дослідити вплив технологічних та конструктивних параметрів на величину максимального тиску зануреного пульсуючого струменя рідини та параметрів приводу вібраційної машини мембранного типу;
- методом планування експерименту визначити раціональні конструктивні параметри та режими роботи приводу при створенні затопленого пульсуючого струменя рідини з газовими пухирцями для процесу мийки забруднень;
- провести експериментальні дослідження працездатності вібраційної машини мембранного типу для очистки і мийки затопленим пульсуючим струменем рідини з газовими пухирцями та твердими частинками;
- сформуванати прикладну методологію проектування та розрахунку параметрів модулів вібраційної машини мембранного типу для очистки і мийки затопленим пульсуючим струменем рідини з газовими пухирцями та твердими частинками;
- розробити практичні рекомендації та передати на виробництво технічну документацію на експериментально-промислову модель вібраційної машини мембранного типу для очистки і мийки.

Об’єкт дослідження – процес очистки та мийки забруднень деталей машин зануреним пульсуючим струменем рідини у вібраційній машині.

Предмет дослідження – конструктивні та технологічні параметри вібраційної машини з пульсуючим зануреним струменем м’якої рідини, динамічні характеристики робочого органу машини, раціональні режими роботи вібраційного приводу.

Методи та засоби дослідження. Теоретичні дослідження динаміки рідини у робочому органі здійснювалися шляхом математичного моделювання динамічної системи руху робочого тіла на основі положень теорії математичного моделювання, теорії динаміки вібраційних коливальних систем, гідромеханіки із застосуванням обчислювальної техніки. Формування аналітичних залежностей для встановлення параметрів вібраційної машини

здійснювалось шляхом розв'язування системи диференційних рівнянь за умови, що перехідні процеси пройшли і рух усталений.

Експериментальні дослідження динамічних та кінематичних характеристик руху робочого тіла проведено на спеціально розроблених експериментальних установках з використанням тензометричних засобів реєстрування даних вимірювань, теорії планування експериментальних досліджень із математичним апаратом опрацювання їх результатів.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в обґрунтуванні конструктивних параметрів та раціональних режимів роботи приводу вібраційної машини для очистки забруднень зануреним струминно-пульсуючим потоком з твердими частинками та мийки деталей зануреним пульсуючим потоком рідини з газовими пухирцями.

При цьому отримані наступні наукові результати:

1. Отримано подальший розвиток побудови математичної моделі руху робочого тіла у насадку камери пульсації вібраційній машині, що описує його динаміку та отримано амплітудно-частотну характеристику з якої визначаються кінематичні і динамічні параметри зануреного пульсуючого струменя;

2. Отримав подальший розвиток аналітичного визначення продуктивності вібраційної машини для очистки та мийки пульсуючим зануреним струменем рідини з твердими частинками. Враховано особливості конструктивних параметрів машини та режимів роботи вібраційного приводу;

3. Експериментально визначені оптимальні, для отримання максимальної продуктивності, співвідношення конструктивних параметрів вібраційної машини та раціональні режими роботи її приводу модуля для очистки забруднень: частота коливань f від 16 до 18 Гц; амплітуда коливань $A = 2$ мм при співвідношенні діаметра камери пульсації до діаметра насадка $D/d = 10$, а для модуля мийки забруднень: $A = 2$ мм; частота коливань f від 13 до 14 Гц; амплітуда коливань $A = 2$ мм при співвідношенні діаметра камери пульсації до діаметра насадка $D/d = 10$.

Практичне значення отриманих результатів. Практичне значення отриманих результатів для машинобудування полягає у створенні методики проектування недорогих вібраційних машин для очищення та миття деталей при ремонті у дрібносерійному та одиничному виробництві.

Результати виконаних теоретичних і експериментальних досліджень реалізовані у новому технічному рішенні – конструкції вібраційної машини для очистки забруднень зануреним пульсуючим потоком рідини з твердими частинками та мийки деталей пульсуючим струменем рідини з газовими пухирцями при ремонті обладнання, що захищено патентом на корисну модель України №132837.

Розроблено концепцію побудови та методику інженерних розрахунків модулів вібраційної машини для очистки та мийки деталей від забруднень, завдяки яким інженери та науковці, які працюють у цій галузі, матимуть можливість впроваджувати у виробництво вискоєфективні та надійні зразки вібраційних машин. Результати виконаних досліджень та окремі теоретичні положення прийнято до впровадження на підприємстві ТОВ «Ролада», ТДВ «Власта» (м. Львів).

Теоретичні та практичні результати, отримані в дисертаційному дослідженні, впроваджені у навчальний процес кафедри технології машинобудування Хмельницького національного університету при викладанні дисципліни «Технологічні методи забезпечення якості виробів» та впроваджені у навчальний процес циклової комісії галузевого машинобудування ВСП Львівського фахового коледжу індустрії моди Київського національного університету технологій та дизайну при викладанні дисциплін: «Технологія ремонту побутової техніки», «Прикладна механіка».

Особистий внесок здобувача. Усі наукові результати дисертаційної роботи, що виносяться на захист, належать особисто здобувачу. Постановка задачі, формулювання завдань досліджень дисертаційної роботи та аналіз результатів виконано спільно з науковим керівником. Автору належать основні

ідеї застосування вібраційних коливань в машині для очистки та мийки забруднень.

В одноосібній публікації [5] автору належить ідея конструкції зворотного клапана, результати експериментальних досліджень по визначенню максимального тиску пульсуючого зануреного струменя та продуктивності вібраційної машини.

У спільних публікаціях автору належить: [1] – ідея розробки конструкції вузла очистки твердими частинками вібраційної машини та результати багатофакторного експерименту; [2] – проведення аналізу існуючих методів очистки та мийки, створення класифікації методів та видів забруднень поверхонь деталей і обґрунтування об'єкту досліджень; [3] – побудова аналітичної моделі руху робочого тіла у вібраційній машині, що описує його динаміку та отримано амплітудно-частотну характеристику з якої визначаються кінематичні та динамічні параметри зануреного пульсуючого струменя; [4] – проведення аналізу аналітичних моделей вібраційного приводу машини, проведення експериментального дослідження режимів його роботи; [5] – пропозиція по конструкції зворотного клапана, результати досліджень по визначенню максимального тиску пульсуючого зануреного струменя та продуктивності вібраційної машини; [6] – ідея розробки конструкції вузлів вібраційної машини, та принципу роботи; [7] – розробка конструкції вібраційної машини, опис її конструкції; [8] – аналітичний аналіз процесу взаємодії газорідного середовища з поверхнею деталей; [9] – аналіз параметрів, які впливають на продуктивність очистки у вібраційній машині; [10] ідея введення у конструкцію модульної вібраційної машини зворотного клапана; [11] – проведення планування експерименту, отримання рівняння регресії, обробка отриманих результатів, оформлення графічних залежностей; [12] – проведення досліджень мийки модельних забруднень, оброблення отриманих результатів. [13] – визначення параметрів конструктивних елементів вузла пульсації вібраційної машини для очистки та мийки у Cosmos Works.

Вирішення проблем математичного характеру, обговорення та висновки по роботі проводилися сумісно з науковим керівником.

Апробація результатів дисертації. Основні положення та результати роботи були представлені і отримали позитивну оцінку на:

- VI Міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми довговічності матеріалів, покриттів та конструкцій», м. Вінниця (13-15 вересня. 2018 р);
- XVII Міжнародній науково-технічній конференції «Вібрації в техніці та технологіях», м. Львів (11-12 жовтня 2018 р);
- VIII Міжнародній науково-технічній конференції «Україно-Польські наукові діалоги», м. Хмельницький, (16-19 жовтня 2019 р);
- Materials of the XVI International scientific and practical «Conference Science and civilization – 2020», Sheffield. (30 January - 07 February, 2020 року);
- Materiały XVII Międzynarodowej naukowo-praktycznej konferencji «Europejska nauka XXI powieką – 2021», Przemyśl, (07-15 maja 2021 roku, 2021);
- IX Міжнародній науково-технічній конференції «Україно-Польські наукові діалоги», м. Хмельницький, (21-23 жовтня 2021 р).
- IX Міжнародній науково-практичній конференції «International forum: problems and scientific solutions», м. Мельбурн, Австралія, (6-8 лютого 2022 р).

Публікації. За темою дисертації опубліковано 13 робіт, у тому числі одна у періодичному іноземному виданні, 4 статі у фахових виданнях переліку МОН України, один патент на корисну модель України, 7 матеріалів конференцій та тез доповідей.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається з анотації, змісту, вступу, п'яти розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та додатків. Повний обсяг роботи становить 210 сторінок друкованого тексту, з них анотація – на 17 стор., зміст – на 4 стор., основний текст – на 160 стор., список із 135 використаних джерел – на 14 стор., додатки – на 16 стор. Дисертація містить 83 рисунка та 7 таблиць.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ЗАСТОСУВАННЯ ВІБРАЦІЙНИХ ПРОЦЕСІВ У ТЕХНОЛОГІЯХ І ТЕХНІЦІ ДЛЯ ОЧИСТКИ ТА МИЙКИ ЗАБРУДНЕНЬ ПРИ ВИГОТОВЛЕНІ ДЕТАЛЕЙ І РЕМОНТІ ОБЛАДНАННЯ

1.1. Аналіз природи виникнення забруднень на поверхні деталей машин та методів очистки і мийки

Якість і надійність відремонтованих машин істотно залежать від досконалості технологічних процесів розбирання, очищення, підготовки поверхні і складання. Ускладнення виробів, вдосконалення технології виробництва і висока точність виготовлення істотно підвищує вимоги до якості очищення і підготовки поверхні. Процес очищення об'єктів ремонту полягає у видаленні за допомогою твердого, рідкого чи газоподібного середовища всіх поверхневих забруднень. Трудомісткість очищення деталей при ремонті становить від 7 до 9 % від загальної трудомісткості ремонту.

Сучасні підприємства оснащені дорогим і різноманітним устаткуванням, машинами, установками, роботизованими комплексами, транспортними засобами й іншими видами основних фондів. У процесі роботи вони втрачають свої робочі якості, головним чином через зношування і руйнування окремих деталей, тому знижується точність, потужність, продуктивність та інші параметри. Для компенсації зношування та підтримки устаткування в нормальному працездатному стані потрібні системне технічне обслуговування і виконання ремонтних робіт, а також проведення заходів щодо технічної діагностики.

Спрацювання устаткування в процесі його експлуатації і нераціональна організація технічного обслуговування та ремонту призводять до збільшення простоїв у ремонті, до погіршення якості обробки та зростання браку, а також до збільшення витрат на ремонт. Про значення покращення організації

збереження та ремонту устаткування свідчать такі показники: річні витрати на ремонт і технічне обслуговування устаткування на підприємствах становлять від 10 до 25 % його первісної вартості, а їхня частка в собівартості продукції сягає від 6 до 8%. Кількість ремонтників коливається у межах від 20 до 30 % від загальної кількості допоміжних робітників.

Основними завданнями організації планування ремонтної служби підприємства є:

- збереження устаткування в працездатному, технічно справному стані, що забезпечує його високу продуктивність і безперервну роботу;
- скорочення часу і витрат на обслуговування та всі види ремонтів.

Вирішення таких завдань вимагає організації правильної експлуатації обслуговування, своєчасного проведення необхідного ремонту, а також модернізації устаткування.

Для виконання усіх видів робіт з організації раціонального обслуговування і ремонту устаткування й інших видів основних фондів на підприємствах створюються ремонтні служби, їхня структура залежить від багатьох чинників: типу та обсягу виробництва, його технічних характеристик, розвитку кооперування під час виконання ремонтних робіт, системи централізації тощо.

Основними задачами ремонтного господарства є:

- забезпечення безперебійної експлуатації обладнання із заданими характеристиками та експлуатаційними показниками;
- організація раціональної системи експлуатації і ремонту обладнання, яка дозволяє підтримувати його в працездатному стані;
- підвищення культури експлуатації і ремонту обладнання з метою продовження строку його служби, збільшення міжремонтного періоду та скорочення обсягу ремонтних робіт;
- зниження трудомісткості і собівартості ремонтних робіт та підвищення їх якості;
- модернізація обладнання.

Очищенню від забруднень та промиванню підлягають деталі обладнання та машини за інструкціями заводів виробників з врахуванням умов їх експлуатації. При промиванні здійснюється розбирання окремих вузлів, очищення розібраних вузлів від стружки та пилу, продуктів зношування. При цьому замінюються запобіжні прокладки, промиваються і прочищаються запобіжні фільтри, мастильні отвори, підшипники кочення.

Вагомим внеском у створенні фундаментальних основ проектування технологічного обладнання і машин для мийки та очищення по праву належить провідним науковцям: Н.Ф. Тельнову, Б.Б. Нефедову, А.П. Садовському, А.Ф. Тельнову, В.І. Савченко, Е.Б. Крутоусу, А.Н. Некричу., Ю.С. Козлову, В.І. Ушмаріну, Н.П. Беляніну, І.В. Фадєєву, Д.П. Гегерсу та ін. [1-27]. Завдяки великій дослідницькій роботі вчених багато питань очищення отримали теоретичне обґрунтування, використовуючи яке вдалося вирішити ряд складних практичних проблем в галузі технології та організації очистки і мийки та визначити шляхи їх вдосконалення.

Високо оцінюючи отримані результати, відображені в роботах вищеназваних авторів, необхідно відзначити, що в них недостатньо повно розглядаються процеси підвищення енергонасиченості водяних затоплених багатофазних струменів без підвищення їх тиску в процесі мийки.

Провідними Українськими вченими А.А. Андилахаєм, О.В. Гориком, А.Е. Проволоцким, З.А. Стоцько, А.Б. Цигановским, Ф.В. Новіковим, Г.А. Шулянським, О.М. Брикуном, Р.І. Сіліним, А.І. Гордєєвим у своїх дослідженнях [28-44] закладено технологічні основи впливу механічних процесів очищення поверхонь деталей багатофазними середовищами та отримало подальший розвиток розроблення методології проектування технологічного очисного та мийного обладнання.

Завдяки невеликим розмірам мийного обладнання та значної продуктивності досягається можливість економії виробничих площ і теплової енергії. Машини дозволяють використовувати сучасні вискоелективні миючі склади з високим вмістом ПАР і здійснити нагрів розчинів і деталей до

температур, що наближаються до 80°C. У цьому випадку представляється можливим очищати деталі складних форм.

Значний внесок у розвиток теоретичних основ технології очистки двофазним струминним середовищем твердих часток та визначення параметрів обладнання зробили іноземні науковці такі як Spring C., Chen J., Desai D., Helland E., Ocelli E., Ciampini D., Spelt J.K. та ін. [45-53].

У процесі експлуатації на деталях утворюються різні забруднення. А при руйнуванні захисних покриттів посилюються ще й процеси корозійного ураження, які часто розвиваються під шаром зруйнованого покриття. Забруднення можна видаляти механічними, фізичними, хімічними, фізико-хімічними, хіміко-термічними та іншими методами. Вибір методу є важливою передумовою якісного очищення деталей і залежить від виду забруднення, форми та матеріалу деталі, екологічними вимогами.

Практика використання машин різноманітного призначення показує, що забруднення, що виникають у процесі виробництва й експлуатації, викликають передчасне зношування деталей, вихід із ладу агрегатів і систем, порушення працездатності і погіршення параметрів машин, а також призводять до різкого збільшення ремонтних і експлуатаційних витрат.

Забруднення – це тверді і рідкі плівки, тверді осадження, продукти корозії, або захисні покриття, що потрапляють на поверхню виробів або утворюються на них у процесі виготовлення, складання, випробувань, збереження й експлуатації. Характер забруднень визначається особливостями технології виробництва виробів, рівнем культури виробництва та експлуатації, збереження і т.п.

Автори [54] види забруднень розбивають на три основних види:

1. Неорганічні забруднення, механічно пов'язані з поверхнею: забруднення, слабо зв'язані з поверхнею (пилюка, ошурки, стружка металевого і неметалевого характеру, сажа, пісок, глина і т.п.); забруднення, механічно шаржовані в поверхню (зерна абразивів, мінеральні або металеві частки); забруднення, яке осіло на поверхню (сольові шкідливі частки після

опрацювання в сольових ванних, накип і т.п.); забруднення, сплавлено з поверхнею або яке отверділо з розплату (флюси, зварювальний шлак, ливарний пригар, керамічні обмазки після спікання скла і т.п.).

2. Забруднення і покриття органічного характеру або на органічних зв'язках, механічно пов'язані з поверхнею: забруднення, слабо пов'язані з поверхнею (пилюка, ошурки і стружка пластмасова, деревна і т.п., сажа, вугілля, кокс); забруднення при невеличкій адгезії до поверхні (жирові і масляні плівки і мастила, шліфувальні, полірувальні і притиральні пасти); забруднення, міцно зчеплені з поверхнею (лаки, смоли, клеї, фарби і емалі, замазки і герметики).

3. Забруднення і плівки, хімічно пов'язані з поверхнею: окисли і гідрати окислів, у тому числі природні окисли або гідроокисні плівки на чорних (іржа) і кольорових (природні плівки, окисли і продукти корозії) металах, окисли, що утворилися при термічній обробці або гарячій обробці тиском, окисні покриття (плівки воронування на чорних металах, плівки анодування або чорні плівки на кольорових металах); солі і солеподібні з'єднання (карбонати і основні солі на кольорових металах, сульфідні на чорних і кольорових металах, фосфати на чорних і хромати на кольорових металах, силікати).

В практиці звичайно мають справу із сукупністю забруднень різноманітних видів, що визначається характером попередніх операцій обробки деталей або виробів, збереженням і т.п. В основному, в залежності від попередніх операцій, забруднення можна розділити на такі групи:

1) після механічної обробки різанням (металеві та неметалеві ошурки та стружки, верстатні емульсії та мастила), чистової та опоряджувальної обробки, притирання та доводки (абразивний пил та зерна, пасти, масла, мастила, емульсії, клеючі смоли);

2) після механічної холодної та гарячої обробки тиском, штампування, кування, прокатування (масла, мастила, графіт, тальк, продукти осмолення, окалина);

- 3) після лиття та термообробки (окалина, окисні плівки, сажа, кокс, нагар);
- 4) після зварювання (окалина, окисли, зварювальний шлак, залишки обмазок та флюсів);
- 5) після пайки (окисли, залишки флюсів);
- 6) після обробки та фарбування (лаки, фарби);
- 7) після складальних операцій (масла, емульсії, механічні частки, сліди рук та т.п.);
- 8) після випробувань, контрольних складань та розкладань (масла, емульсії, механічні частки та різноманітні види виробничих забруднень);
- 9) після зберігання та транспортування (покриття для захисту від корозії, в тому числі захисні лаки та фарби, мастила для консервації, пасивуючі розчинні солі та продукти корозії, що з'являються при зберіганні);
- 10) після міжремонтного періоду експлуатації (масла, мастила, пил, ворс, механічні частки, продукти корозії).

Вибір способів очищення значною мірою залежить від характеру забруднень, конфігурації деталей і місць відкладання забруднень [54,55]. Основним фактором у виборі способу очищення є вид забруднень. Аналіз джерел походження забруднень деталей та вузлів згідно технологій та способів чистки і мийки, обладнання, яке реалізує ці способи, свідчить про велике їх різноманіття [12,14]. Усі вони мають свої переваги та недоліки. Вибір конкретного способу мийки обумовлюється в залежності від виду та властивостей забруднень, від вимог, що ставляться щодо чистоти виробів, умов та типу виробництва, а також з урахуванням економічних чинників використання обладнання.

Було проведено аналіз методів очистки та мийки об'єктів, згідно належності машин та обладнання до певного виду промисловості та особливостей технологій при яких виникають різні види забруднень, із поділом їх на слабо зв'язані з поверхнею та сильно зв'язані з поверхнею [55]. Проведена класифікація представлена на рис.1.1.

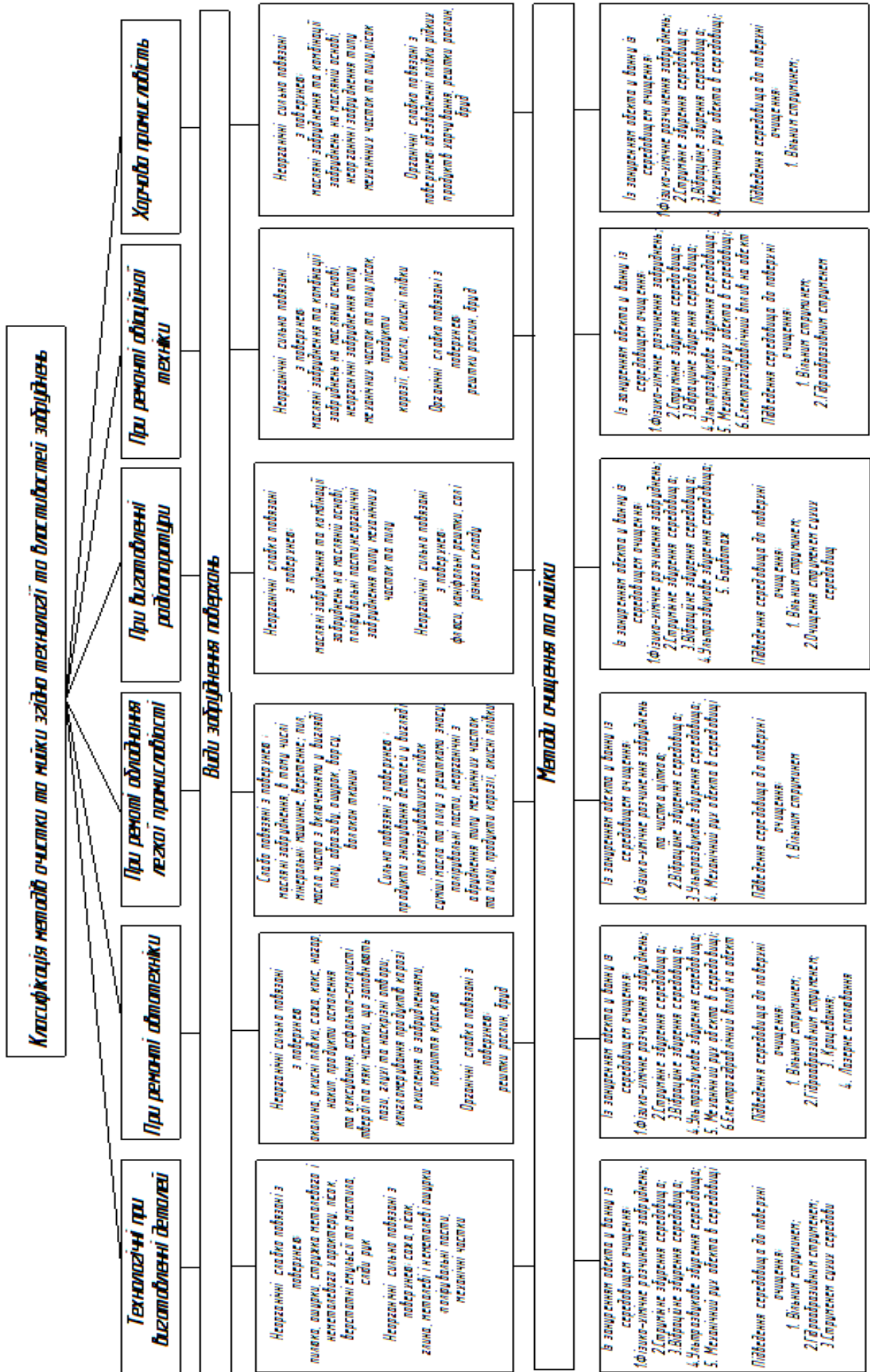


Рис. 1.1 – Блок-схема класифікації методів мийки та очистки деталей

Очистка та мийка поверхні деталей, внутрішніх порожнин вузлів, агрегатів і систем являє собою сукупність складних фізико-хімічних й механічних процесів, ефективність яких залежить від властивостей миючого середовища, розміру й властивостей часток забруднень, технологічних режимів мийки, конструктивних особливостей деталей, що очищаються та агрегатів і систем. Вид і ступінь забруднення, що залишилося після мийки поверхні, залежить в основному від способу мийки та типу миючого середовища.

Значного поширення набули такі способи миття й очищення: фізико-хімічний, електрохімічний, ультразвуковий, термічний і механічний: очищення щітками, пневмоабразивними та гідроабразивними струминами, віброабразивний [16-20,54].

Фізико-хімічний спосіб очищення [61] (струминний у ваннах) полягає в тому, що забруднення з поверхонь деталей видаляють струминами водних розчинів різних препаратів або спеціальними розчинниками при відповідних умовах (режимах). Основні умови високоякісного фізико-хімічного очищення водними розчинами: висока температура миючого хімічного розчину від 75 до 95°C, вібруючий потік або струмені при значному тиску та ефективні миючі властивості. Цей спосіб набув найширшого застосування на ремонтних підприємствах.

Електрохімічне очищення відбувається у струмопровідному електроліті при постійному або змінному струмі. Частіше використовують постійний струм. Процес проводять при густині струму від 3 до 10 А/дм² поверхні, що очищується. Із збільшенням густини струму процес знежирювання поверхні зростає. Метод електрохімічного очищення широко застосовують при підготовці деталей до гальванічних, полімерних і лакофарбових покриттів.

Ультразвуковий спосіб очищення полягає в передачі енергії від випромінювача ультразвуку через рідке середовище до поверхні, що очищується. Коливання частотою від 20 до 25 кГц створюють великі прискорення і спричиняють появу в рідкому середовищі дрібних пухирців, при

розриванні яких у мікрооб'ємах виникають гідравлічні удари великої сили, що руйнують вуглецеві відкладення протягом від 2 до 3 хв., а масляні плівки від 30 до 40 с. Ультразвуковий спосіб застосовують в основному для очищення дрібних деталей складної конфігурації (деталі карбюраторів, паливних насосів, електрообладнання і т. п.).

Термічний спосіб застосовують для очищення деталей від найбільш стійких вуглецевих відкладень (нагару, асфальтенів тощо). Деталь вміщують у термічну піч, нагрівають до температури від 600 до 700°C, витримують від 2 до 3 годин, потім повільно охолоджують разом з піччю. Якщо в деталях не виявлено короблення, то нагар можна видалити, випалюючи його газовим полум'ям.

Механічний спосіб полягає в очищенні поверхні деталі вручну скребками, щітками тощо або механізовано-кісточковим дрібняком, абразивними та іншими матеріалами, які подаються разом з повітрям, водою або миючим розчином [56].

Всі відомі способи очищення деталей можна підрозділити на три великі групи – механічні, фізико-хімічні і сполучені (очисне устаткування сполучає в собі фізико-хімічну активність очисних засобів із механічним впливом на забруднення, що видаляється з поверхні виробів). Багато дослідників [2,12,13,19] вважають процес механічного впливу рідини на забруднення одною з основних умов, що визначають ефективність очищення та мийки, а основні чинники – це нормальні напруження потоку з частинками і дотичні складові сили тертя очисного або мийного середовища.

1.2. Характеристика властивостей забруднень деталей машин та технологічних рідин для очищення і мийки

При розробці технологічних процесів очищення слід враховувати властивості забруднень: їх фізичний стан (твердий або рідинний, в'язкість рідинних та температуру плавлення твердих забруднень); зв'язок забруднень з

поверхнею виробу (полярний або неполярний); полімеризацію компонентів забруднень, що мають місце при роботі виробів в умовах високих температур (в двигунах внутрішнього згорання, при гарячому штампуванні, куванні та ін.); присутність твердих та м'яких часток, що заповнюють пази, глухі та наскрізні отвори; конгломерація продуктів корозії і окислення з забрудненнями.

Найбільш часто зустрічаються для більшості видів виробництв масляні забруднення та комбінації забруднень на масляній основі, полірувальні пасти, неорганічні забруднення типу механічних часток та пилу, продукти корозії, окисли, окисні плівки [15,20].

Масляні забруднення, в тому числі мінеральні (машинне, веретенне, трансформаторне та інші масла), рослинні та тваринні масла, сульфозфрезол і емульсія часто з включеннями в вигляді пилу, абразиву, ошурок, стружки та ін., характерні для деталей та виробів, що підлягають обробці, консервації, операціям складання, розкладання та експлуатації. Очищення від масляно-жирових забруднень при використанні лужних розчинів протікає за рахунок емульгування та омилювання забруднень (для жирів та масел рослинного та тваринного походження), а при застосуванні органічних середовищ – за рахунок розчинення.

Забруднення в вигляді шліфувальних, полірувальних та притиральних паст являють значні труднощі при очищенні. Пасти складаються з абразивних мікропорошків та речовин, що зв'язують. Абразивні порошки, до яких відносяться окис алюмінію, окис хрому, синтетичні алмази, електрокорунд, карбід бора і т.п., хімічно інертні. В якості речовин, що зв'язують використовуються олеїнова кислота, тваринні жири, парафін, стеарин, авіаційні масла.

Олеїнова кислота розчиняється в етиловому спирті, хлороформі, бензинові та деяких других органічних розчинниках. Олеїнова кислота в воді не розчиняється, а в лужному середовищі обмилюється з утворенням продукту, що розчиняється в воді, так званого олеїнового мила. Тваринні жири та масла обмилюються в лужному середовищі з утворенням продуктів, що розчиняються

в воді (гліцерин, мило), а мінеральні масла з кислотами та лугами не взаємодіють і у воді не розчиняються. Вказані жири та масла добре розчиняються в дихлоретані, гасі, бензинові та деяких інших органічних розчинниках.

Неорганічні забруднення типу часток та пилу механічно слабо зв'язані з поверхнею. Вони задовільно видаляються в залежності від вимог якості очищення в звичайній, дистильованій воді або деіонізованої воді.

Продукти корозії, окисли та окисні плівки займають значне місце серед міцно зв'язаних забруднень. Їх поява викликана хімічними та електрохімічними процесами.

Значення характеру зв'язку забруднень з поверхнею, що очищується, є вирішальним фактором при виборі або розробці технологічних процесів очищення та забезпечує можливість отримання високого ступеня чистоти виробів.

Ступінь хімічної взаємодії забруднення з очисним середовищем є дуже важливим показником. Вірний підбір очисного середовища визначає ефективність очищення [19,20]. Слід враховувати, що очисна рідина повинна взаємодіяти з забрудненням та не взаємодіяти з матеріалом, з якого виготовлено очисний об'єкт. Якщо ж така взаємодія відбувається, то вона повинна протікати значно повільніше за процес видалення забруднень та не супроводжуватись зміною фізико-механічних властивостей матеріалу виробу та порушенням його поверхні, конфігурації та т.п.

Всі очисні середовища, що застосовуються для очищення можна виділити в дві групи [54]:

- 1 органічні розчинники та емульсійні препарати;
- 2 лужні розчини та синтетичні очисні середовища.

Органічні розчинники отримали широке застосування в закордонному та вітчизняному виробництві в зв'язку з високою швидкістю видалення забруднень, можливістю проведення процесу без механічної та термічної дії, корозійною інертністю до деталей з чорних та кольорових металів та сплавів.

Найбільш розповсюдженими розчинниками є граничні, ароматичні та хлоровані вуглеводні.

Ароматичні та хлоровані вуглеводні – добрі розчинники мінеральних масел, старих лакофарбових покриттів. Однак їм властива висока токсичність, а ароматичні вуглеводні до того ж вибухо – та пожежонебезпечні. Тому данні розчинники не знайшли широкого розповсюдження. Їх використання можливо тільки при наявності автоматичного устаткування.

Основними розчинниками, що використовуються на даний момент є: дизельне пальне, керосин, бензин та уайтспірит. Це дешеві та порівняно малотоксичні розчинники. Вони використовуються для очищення внутрішніх поверхонь масляних каналів, очищення деталей паливної апаратури, електроустаткування та зняття старих лакофарбових покриттів.

Емульсійні препарати являють собою композицію або систему, що вміщує крім розчинників поверхнево-активні речовини (ПАР) та воду. Емульсійне очищення застосовують, як правило, в тих випадках, коли інші види очищення надто тривалі та недостатньо ефективні. Одним з шляхів розширення емульсійного очищення слід вважати підвищення очисної здатності дешевих розчинників – ксилолу та дизельного пального підбором ефективних емульгаторів та ПАР, що розчиняються в них.

Лужні розчини знайшли найбільш широке розповсюдження в практиці очищення [54]. Перевагами цих розчинів є те, що вони є порівняно дешеві, технологія використання не вимагає спеціального устаткування.

Для підвищення очисної здатності останнім часом широке розповсюдження знайшли синтетичні миючі засоби (СМЗ) з вмістом ПАР та активних домішок. В сучасних миючих засобах застосовуються аніоноактивні ПАР і не моногенні ПАР. Молекули аніоноактивних ПАР в водних розчинах дисоціюють на неактивні катіони (метал або водень) та на аніони (вуглеводні ланцюги), які виявляють поверхневу активність. До цієї групи ПАР відносяться жирові масла, солі високомолекулярних спиртів, жирних кислот та інші з'єднання.

В якості активних домішок до миючих засобів широко застосовуються фосфати, карбонати та силікати натрію, що підсилюють дію ПАР та один одного в відповідному напрямку [54]. Фосфати мають сильні пептизуючі властивості, які роздрібнюють крупні частки забруднень в більш мілкі, іноді до колоїдних розмірів. Карбонати є найбільш дешевими електrolітами та утворюють лужний резерв в очисному розчині.

Силікати лужних металів при гідролізі дають кремнієву кислоту в колоїдному стані. Здатність кремнієвої кислоти, яка диспергує тверді та жирні забруднення сприяє процесу очищення, а також відіграє велику роль в попередженні повторного осідання відмитих забруднень. Присутність силікатів відіграє протикорозійну дію.

Для використання у процесі очистки та мийки у вібраційній машині запропоновано використовувати синтетичні миючі засоби з вмістом ПАР та інгібіторами корозії.

1.3. Аналіз основ теорії та практики очистки потоком твердих частинок

Оброблення матеріалів потоком твердих частинок знаходить все ширше застосування в різних областях машинобудування. Основи очистки поверхонь деталей машин отримали подальший розвиток у роботах Проволоцького А. Е. Андилаха А. А. Цигановського А. Б., Брикуна О. М., Киріліна О. В. [56-68]. Зокрема, це такі процеси: дробоструминне наклепування, струминно-абразивна обробка, пневмоструминне очищення поверхонь від облою пластмасових армованих деталей, очищення поверхонь деталей пульсуючими струменями газорідного потоку [57-70].

При загальній оцінці очистки поверхонь деталей являє собою складний комплекс механо-фізико-хімічних явищ, що роблять істотний вплив на стан забруднення та поверхні оброблюваних деталей, а при певних умовах і робочого середовища. Фізична сутність процесів мікрорізання і пружного

деформування, характеризується комплексною дією на оброблювані деталі ряду факторів, і наявністю робочої середовища певної характеристики. Розширення технологічних можливостей обробно-зачисній очистки може бути направлено по шляху створення її нових різновидів, що реалізується при подальшому використанні фізичних ефектів, отриманих при комбінуванні різних схем енергетичного впливу на робоче середовище і деталі [59].

Головний практичний інтерес очистки представляє встановлення виду залежностей між основними технологічними параметрами, такими, як розмір робочих тіл (кульок, абразивних зерен), їхня швидкість руху, тиск робочого середовища, концентрація частинок, кут атаки, фізико-механічні властивості частинок і вихідні параметри процесу (шорсткість оброблюваної поверхні і величина наклепу поверхні та зняття матеріалу). Це обумовлено необхідністю оптимального вибору величин технологічних параметрів машин та обладнання в умовах конкретного виду забруднення та методу обробки поверхні [59].

Такі закономірності можуть бути встановлені в результаті регресивного аналізу експериментальних даних. Однак застосування отриманих залежностей обмежується порівняно вузькими межами зміни параметрів, довготривалими умовами проведення експериментів.

Більш універсальним є підхід, який заснований на визначенні залежностей і вирішенні завдань оптимізації технологічних параметрів процесу обробки в результаті імітаційного моделювання. Такій підхід запропоновано автором [57,58] для струминно-абразивної обробки поверхонь. Реалізація такого підходу припускає побудову математичної моделі досліджуваного об'єкта.

У результаті проведених досліджень авторами [57,58] було запропоновано математичну модель, яку можна використовувати для визначення різних технологічних параметрів гідроструминної обробки: величини розмірів робочих часток, швидкості часток, величин кута атаки, величини сили контактної дії. Проводити аналіз процесу взаємодії твердих частинок із забрудненням при очищенні. Як критерій оптимізації для різних

технологічних процесів прийнято величину знімання матеріалу або площі забруднення в процесі мийки та очищення, або величину наклепу при дробоструминному обробленні, а величина шорсткості у запропонованій моделі виступає як обмеження.

Особливий внесок у розробці методу струминно-абразивної обробки деталей належить професору Проволоцькому О. Є. [57,58] Однак, даний метод має істотний недолік, пов'язаним з інтенсивним зношуванням сопел, через які прокачується абразивна суспензія. У результаті цього діаметр сопла збільшується, що веде до збільшення витрати стисненого повітря й абразивного матеріалу, а безперервне збільшення діаметра соплового отвору є причиною безперервної зміни режиму обробки поверхні й нестабільності процесу очищення.

Автором [59] відзначається, що кардинальним рішенням даної проблеми може бути зміна принципової схеми струминно-абразивної обробки за рахунок застосування методу абразивної обробки деталей затопленими струменями. Даний метод є подальшим розвитком струминно-абразивної поверхневої обробки й виключає основний недолік струминно-абразивних установок - абразивне зношування каналів сопел або ежекційних насадок, тому що абразивні зерна приєднуються до струменів стисненого повітря за їхніми межами. Ефект обробки досягається в результаті дії абразивних зерен на поверхні оброблюваних деталей і забезпечення їхнього рівномірного перемішування. Ефективність процесу може бути втрачена через порушення пропорцій (балансу) між цими двома факторами, оскільки при перемішуванні деталей і абразивних зерен з високою швидкістю зникає істотна різниця швидкостей між абразивними зернами й оброблюваними деталями.

Автор [59-63] запропонував розвиток теоретичних основ методу абразивної обробки деталей затопленими струменями, як найбільш перспективного з точки зору підвищення стабільності, якості й продуктивності методу оздоблювальної обробки дрібних точних деталей малої жорсткості й складної конфігурації.

Автор [59] відзначає, що на відміну від традиційних методів струминно-абразивної обробки, даний метод забезпечує врізання абразивних зерен в оброблюваний матеріал під різними кутами, що вносить принципові зміни в закономірності знімання матеріалу й формоутворення поверхонь оброблюваних деталей. Аналітично встановлено вплив кута входу абразивних зерен в оброблюваний матеріал на енергоємність процесів і сили різання, шорсткість поверхні й продуктивність обробки. Побудовано математичну модель визначення шорсткості поверхні й продуктивності абразивної обробки деталей затопленими струменями з урахуванням динаміки руху абразивних зерен, що дозволило описати траєкторії руху абразивних зерен у процесі обробки й обґрунтувати основні технологічні закономірності знімання матеріалу з поверхонь деталей.

На основі проведених експериментальних досліджень [59,60] розроблено узагальнюючі емпіричні математичні моделі параметрів абразивної обробки деталей затопленими струменями, які в сукупності з отриманими аналітичними рішеннями дають достатньо повне уявлення про технологічні можливості процесу й дозволяють за критеріями найменшої шорсткості поверхні та найбільшої продуктивності визначити раціональні параметри обробки й виконати вибір кількості й розмірів конструктивних елементів установок при їх проектуванні.

На основі теоретичних і експериментальних досліджень [59], а також нових технічних рішень визначено комплекс заходів, що забезпечують надійність і стабільність методу абразивної обробки деталей затопленими струменями. До їх числа входять: кут атаки оброблюваних поверхонь в залежності від механічних властивостей матеріалу, елементи деталей, на яких слід локалізувати процес обробки (кромки, площини, задирки, вершини мікронерівностей), збереження зернового складу суспензії та її рідкої складової, ефективна (з урахуванням передачі максимального запасу кінетичної енергії найбільшій кількості абразивних зерен) конструкція сопла для подачі

стисненого повітря, його гранично допустима витрата, яка визначається діаметром, кількістю сопел і тиском стисненого повітря.

Аналітично та експериментально встановлено [59,64-66], що в процесі абразивної обробки затопленими струменями в поверхневому шарі оброблюваної деталі виникають стискаючі напруження (має місце наклеп).

При цьому величина напружень збільшується протягом від 20 до 25 хвилин обробки, а потім стабілізується. Установлено також, що із часом обробки відбувається збільшення мікротвердості (по Вікерсу) досліджуваних деталей з алюмінію АД, латуні ЛС59.1, латуні Л63, сталі Ст3, сталі 65Г.

Через 20-25 хвилин обробки мікротвердість стабілізується на різних рівнях залежно від схильності металів до наклепу. У роботі [67], яка присвячена удосконаленню технології дробоструминного очищення внутрішніх поверхонь корпусних виробів, шляхом експериментально-теоретичного дослідження встановлено характер впливу ударної дії дробу на стан поверхні, що очищається та встановлено раціональні режими і розроблено нові технічні рішення.

Автором [67] побудовано і обґрунтовано нові наукові підходи до описання ударної взаємодії абсолютно жорсткої сферичної дробинки з площиною, на основі яких визначено, залежно від заданих вихідних параметрів контактної взаємодії, розміри і форму сліду зіткнення та встановлено наслідкові основні параметри технології дробоструминного очищення поверхонь виробів із низьковуглецевих сталей.

У пружно-пластичній моделі для описання сили опору атакованого поверхневого шару запроваджено один коефіцієнт пружно-пластичності матеріалу, який легко встановлюється експериментально-аналітичним шляхом, а у пружно-в'язкій моделі - два коефіцієнти, які враховують співвідношення пружних і в'язких деформацій, що дозволило достовірніше врахувати властивості матеріалу виробу відповідними розв'язками вихідних диференціальних рівнянь і обґрунтувати можливість нехтування у певних випадках пружними деформаціями [71].

1.4. Існуючі конструкції установок та обладнання для очистки затопленими струменями з твердими частинками

Гідроабразивні установки за способом подачі суспензії до струминного апарату і на оброблювану заготовку підрозділяються на установки: з ежекцією суспензії в струминний апарат і подальшим прискоренням її газом або водою; установки з нагнітанням суспензії газом, водою або насосом і подальшою подачею її через сопло; установки з нагнітанням суспензії газом, водою або насосом і подальшим прискоренням її лопатями ротора або імпульсним розрядом [40].

Відомі конструкції технологічного обладнання для очистки від окалини та гідродробозміцнення виробів. Гідродробоударне очищення та зміцнення проводять на гідравлічних дробоударних пристроях ежекторного типу струменем рідини: однофорсункових [68] (рис.1.2) або з багатоканальними форсунками.

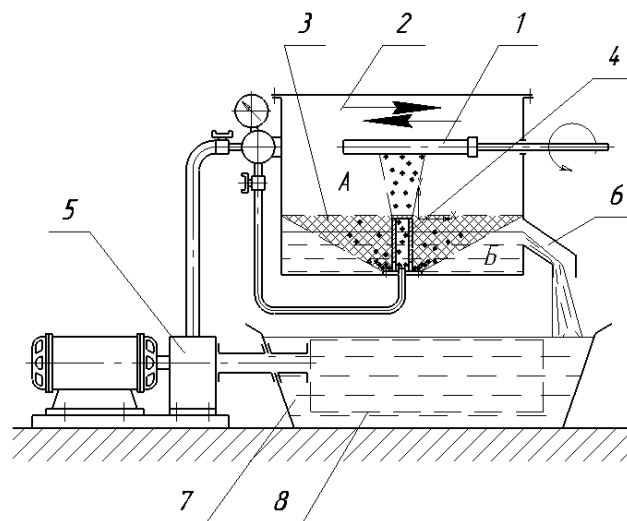


Рис. 1.2 – Обладнання для очистки та гідродробозміцнення струминне:

- 1 – деталь; 2 – камера; 3 – сітка; 4 – сопло; 5 – насос; 6 – злив; 7 – бак;
8 – фільтр

Деталь, що обробляється 1 встановлюють на шпинделі в камері 2, яка розділена сіткою 3 на дві порожнини А і Б. На сітці 3 розміщено дріб, в

порожнині *B* – мастильно-охолоджувальна рідина. В порожнині *A* встановлено сопло-ежектор *4*. В нього насосом *5* подається струмінь мастильно-охолоджувальної рідини, яка підхоплює дріб і напрямляє її на деталь, створюючи при цьому обробку поверхні деталі. Відокремлена від дробу сіткою *3* рідина зливається по патрубку *6* в бак *7*. Фільтр *8*, розташований в баку *7*, відокремлює дрібні частинки матеріалу деталі, які утворюються при відшаровуванні поверхневого шару, і зношені дробинки, які пройшли крізь сітку *3*.

Одним з найбільш перспективних серед відомих способів струминно-абразивної обробки є спосіб гідро-абразивної обробки затопленими струменями (ГОЗС) [38,64]. Суть методу демонструє схема установки, представлена на рис.1.3.

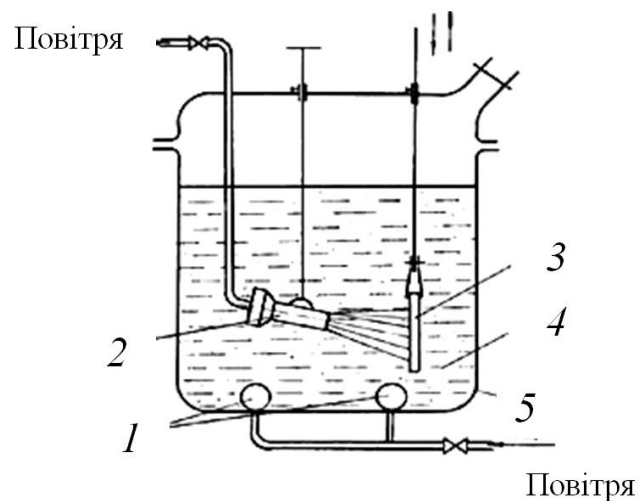


Рис.1.3 – Схема гідро-абразивної установки: *1* – барботери; *2* – ежекційне сопло; *3* – заготовка; *4* – гідро-абразивна суспензія; *5* – резервуар

У резервуар *5*, заповнений гідро-абразивною суспензією *4*, поміщають закріплену заготовку *3*. У резервуарі *5*, нижче рівня суспензії, знаходиться зорієнтоване щодо заготовки ежекційне сопло *2* (струминний апарат). Обробка поверхні деталі здійснюється спрямованим струменем гідро-абразивної суспензії, що викидається з струминного апарату.

Однією з різновидів ГОЗС є спосіб гідро-абразивної струйновідцентрової обробки (ГСЦО) [38], що дозволяє механізувати процеси зачистки і обробки

дрібних деталей точного машинобудування. Суть способу ГСЦО полягає в тому, що вплив на поверхні оброблюваних деталей, вільно розміщених в гідроабразивній суспензії, що знаходиться в закритій ємності, здійснюється струменями такої ж суспензії, яка під тиском направляється у середину ємності. Схема реалізації способу показана на рис.1.4. Деталі й гідроабразивна суспензія під дією цих струменів набувають рух, напрямком якого визначається формою камери і напрямком дії струменів.

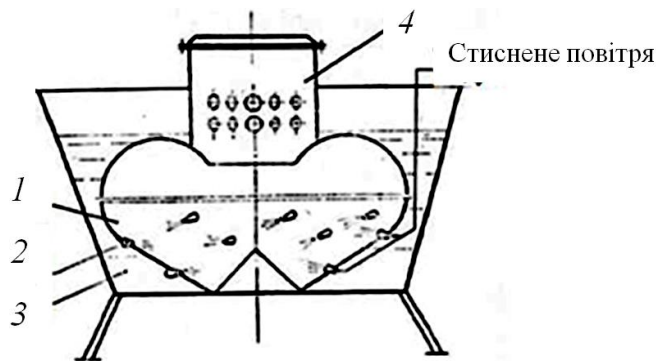


Рис.1.4 – Схема реалізації способу гідроабразивної струйно-відцентрової обробки: 1 – робоча камера; 2 – струменеві апарати; 3 – ємність; 4 – горловина

Оброблювані деталі завантажуються через горловину 4 в робочу камеру 1, виконану у вигляді двох чаш, з'єднаних більшими підставами, при цьому нижня чаша виконана у вигляді усіченого конуса, а верхня – у вигляді неповного тора. Робоча камера розташована у ємності 3, заповненою гідроабразивною суспензією. У камері 1 розміщені ежекційні струменеві апарати 2, у яких вихідна частина знаходиться всередині робочої камери 1, а засмоктує суспензію поза нею. Струменеві апарати 2 розташовані в камері 1 тангенціально до її внутрішньої поверхні. До форсунок струминних апаратів 2 підводиться стиснене повітря. Циркуляція суспензії між камерою 1 і ємністю 3 здійснюється через отвори на бічній поверхні горловини 4.

Спосіб ГСЦО є практично синтезом відцентрово-ротаційного і гідроабразивного способів обробки. При цьому від відцентрово-ротаційного способу використовувалася можливість одночасної обробки партій деталей в

незакріпленому стані, а від гідро-абразивного – можливість якісної обробки деталей складної конфігурації.

Прикладом широкого впровадження є установка ГСЦУ-10 [38], принципова схема якої і загальний вигляд показані на рис.1.5.

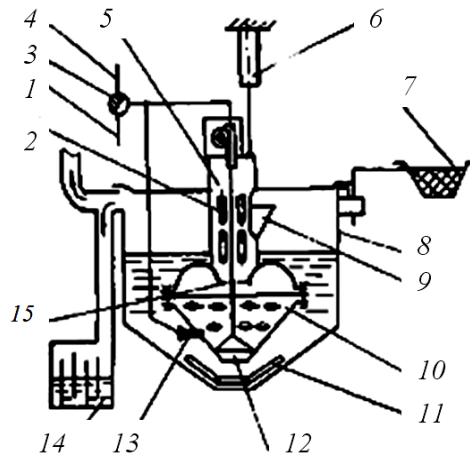


Рис.1.5 – Схема установки ГСЦУ-10: 1 – магістраль стисненого повітря; 2 – отвори; 3 – розподільник; 4 – водопровід; 5 – горловина; 6 – пневмоциліндр; 7 – перфорований стакан; 8 – бак; 9 – завантажувальне вікно; 10 – робоча камера; 11 – барботажна система; 12 – конусна пробка; 13 – струменеві апарати; 14 – відстійник; 15 – запобіжна сітка

Установка ГСЦУ-10 складається з робочої камери 10, що складається з двох чаш, нижня з яких виконана у вигляді усіченого конуса, а верхня – у формі неповного тора, бака 8 для підготовки гідро-абразивного суспензії і відстійника 14. На дні бака 8 розміщена барботажна система 11, що слугує для зважування абразивного порошку в воді за допомогою стиснутого повітря. На бічній поверхні робочої камери 10 тангенціально до її внутрішньої поверхні і з нахилом вниз по відношенню до горизонтальної площини на кут 7° розміщені ежекційні струменеві апарати 13. Кількість струминних апаратів дванадцять. Форсунки струминних апаратів 13 з'єднані з магістраллю стисненого повітря 1 і водопроводом 4 за допомогою розподільника 3. У нижній частині камери 10 є розвантажувальний отвір, що перекривається конусної пробкою 12. У верхній

частині камери 10 змонтована горловина 5, в якій є завантажувальне вікно 9 і отвори 2 для зливу надлишку суспензії з камери 10 в бак 8. Пластина у верхній часті робочої камери 10, під час обробки, перекривається запобіжної сіткою 15 з метою запобігання потрапляння деталей в завантажувальну горловину 5. Опускання в бак 8 і підйом робочої камери 10 на початку і в кінці циклу обробки здійснюється пневмоциліндром 6. Перфорований стакан 7 виготовлено з можливістю його підведення під розвантажувальний отвір камери 10 після закінчення обробки. В процесі обробки до форсунок струминних апаратів 13 подається стиснене повітря, а після закінчення обробки - вода. Завдяки нахилу осей струминних апаратів униз це дозволяє ефективно здійснювати вивантаження деталей в перфорований стакан 7 і промивати їх. Можливість підведення до струминних апаратів води дозволяє також підтримувати постійний рівень суспензії в баку 8 і видаляти в відстійник відходи обробки.

Автором [38,64-66] теоретично встановлено максимальну масу завантаження матеріалу та величину прогнозованого зняття металу з деталей.

Розглянуті конструкції установок призначені для очистки мілких деталей, які завантажуються навалом в установку. Можливість очищення деталей значних розмірів не можлива.

1.5. Аналіз основ теорії та практики мийки забруднень поверхонь деталей та вузлів газорідним зануреним струменем

Мийка поверхні металевих деталей, внутрішніх порожнин вузлів, агрегатів і систем являє собою сукупність складних фізико-хімічних і механічних процесів, ефективність яких залежить від властивостей миючого середовища, розміру й властивостей часток забруднень, технологічних режимів мийки, конструктивних особливостей деталей, що очищаються. Вид й ступінь забруднення, що залишилося після мийки поверхні, залежить в основному від способу мийки і типу миючого середовища [69].

Оскільки забруднення поверхні металу являє собою в загальному випадку суміш твердих дрібних часток, продуктів корозії й окислювання з полімеризованими залишками олій, змащень, жирів і т.п., тобто її видалення вимагає нерідко значних зусиль і виконання спеціальних операцій. Для полегшення видалення твердих часток забруднень, що знаходяться на поверхні заготовок і деталей у полімеризованому шарі, рекомендується робити відмочування у рідинах із високою хімічною активністю. У більшості випадків мийку необхідно робити незабаром після виготовлення деталей [69].

Режим мийки металеві поверхні деталі потоком миючої рідини (оптимальну технологію) визначають, виходячи з аналізу гідродинамічної взаємодії миючої рідини з частками забруднень, а також на підставі результатів експериментальних досліджень. У цьому зв'язку розглянемо механізм видалення забруднень потоком миючої рідини. Не применшуючи при цьому значення фізико-хімічних факторів, обумовлених активністю миючого середовища. Багато дослідників [1-9,41-44] схильні вважати, що процес механічного впливу рідини на забруднення є однією з основних умов, що визначають ефективність мийки.

Процес мийки поверхні металу потоком рідини можна розділити на наступні зв'язані між собою елементарні процеси: відрив часток забруднень від поверхні, що очищається, зрівноважування забруднень потоком рідини, транспортування забруднень до фільтруючого пристрою. Разом із тим частки, що відірвалися від поверхні повинні бути швидко вилучені, для чого потік рідини повинен мати необхідну здатність для зрівноважування й транспортування. Під здатністю рідкого середовища, що зрівноважує, розуміють її здатність утримувати у зваженому стані тверді частки певних розмірів. З теорії гідротранспорту відомо, що здатність, зрівноважувати, залежить від структури середовища, що зважує, і її міцності. Здатність зрівноважувати визначається природою й концентрацією речовини, що зважується. Здатність дисперсного середовища, що зважує, звичайно, характеризується найбільшим (критичним) розміром часток і їхньою кількістю,

що можуть стійко утримуватися даним середовищем у зваженому стані. В даний час загально визнано, що стійкий перенос рідиною важких часток у зваженому стані можливий тільки в турбулентних потоках рідини.

Розглянемо процеси відриву, зрівноважування й транспортування часток забруднень потоком рідини в сукупності, які описані Бородіним С. П., Беяніним П. М., Даниловим В. М. [20].

На частку, що лежить на поверхні, що очищається, діють наступні сили (рис.1,6) [20]: сила ваги частки в рідині G ; сила адгезії частки до поверхні $F_{ад.}$; піднімальна сила W_y , що представляє собою вертикальну складову головного вектора гідродинамічної дії рідини на частку; сила лобового опору W_x , що є складовою головного вектора гідродинамічного впливу рідини на частку, що збігається з напрямком вектора швидкості потоку. Оскільки деякі розміри часток забруднень, що підлягають видаленню, лежать у межах від 0,5 мкм до 100 мкм, то досить велике їхнє число виявляється при очищенні схованим у товщині прикордонного шару рідини, що представляє собою шар рідини, загальмований у поверхні під дією сил в'язкості. Прикордонний шар перешкоджає контакту часток забруднень із сусідніми шарами рідини, що інтенсивно рухаються та утруднює видалення прилиплих часток з поверхні.

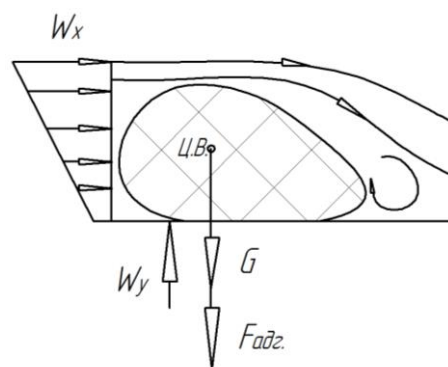


Рис. 1.6 – Схема дії сил на частку забруднення, яка знаходиться на поверхні, під дією потоку рідини: W_x – сила, що зрушує частку забруднення; W_y – піднімальна сила; G – сила ваги; $F_{адз.}$ – сила адгезії частки до поверхні

Одиночна частинка, що лежить на поверхні, що очищається, виступає із загальної маси чи навколишніх її часток, зазнає з боку потоку муючої рідини силовий вплив, причиною якого є сила лобового опору частки w_x . Під дією сили w_x частка зрушується щодо поверхні контакту, при цьому сила w_x у залежності від форми частки змушує її котитися чи сковзати по поверхні. Чим більше форма частки наближується до кульки, тим імовірніше її переміщення коченням. Плоскі й довгі частки по поверхні або коло поверхні переміщуються ковзанням.

Очевидно, відрив частинки від поверхні можливий, якщо сума сил гідродинамічного впливу рідини на частку в напрямку потоку перевищить силу тертя частки об поверхню [20]. Ця умова описується наступним нерівністю:

$$w_x > f(G - W_y + F_{ad}), \quad (1.1)$$

де f – коефіцієнт тертя частки об поверхню.

Величина сили тертя частки об поверхню залежить від сили її зчеплення з поверхнею, обумовленої силою ваги частки G і силою адгезії F_{ad} .

Силу ваги частки легко визначити, якщо відомі її розміри й матеріал. Тверді частки розміром менш 100 мкм, що мають велику сумарну площину поверхні, здатні сильно зчіплюватися між собою і з поверхнею осадження частки. Такі частки, здатні також активно адсорбувати на своїй поверхні масляні речовини, що збільшує силу зчеплення частки з поверхнею, що очищується.

Сила адгезії визначається природою контактуючих тіл, міжмолекулярними й електричними взаємодіями, а також капілярним ефектом і іншими причинами. Сила адгезії часток зростає зі зменшенням їхнього розміру, а також унаслідок зволоження контактуючої поверхні. Величину сили адгезії, що утримує у воді скляні кульки коло сталевій поверхні, можна визначати за формулою [70]:

$$F_{a\partial} = kd_{uu}, \quad (1.2)$$

де k – емпіричний коефіцієнт, що залежить від числа адгезії, $1 \cdot 10^{-5}$ Н/мкм;

d_{uu} – діаметр кульки, мкм.

Для дрібних часток забруднень сила адгезії може на кілька порядків перевищувати силу ваги і є, таким чином, основною силою, що утримує частку на поверхні, що очищається.

Відриву частки сприяє піднімальна сила w_y , що виникає внаслідок несиметричного обтікання частки з різними швидкостями. При такому обтіканні тиск рідини під часткою перевищує тиск рідини над нею. Відповідно до формули М. Є. Жуковського [20] сила чолового опору частки сферичної форми:

$$w_y = 0,2 \pi d_u^2 \rho U^2, \quad (1.3)$$

де d_u – діаметр частки, м;

ρ – щільність рідини, кг/м³;

U – швидкість потоку рідини щодо частки, м/с.

Залежність (1.3) справедлива для мийки турбулентним потоком ($Re = 2 \cdot 10^3 - 10^4$), коли коефіцієнт опору сферичної частки $c_x = const = 0,4$. З формули (1.3) видно також, що для відриву частки, визначальною є швидкість потоку рідини. Якщо частка мала чи незначно виступає із загальної маси інших осілих на поверхню часток, сила чолового опору буде пропорційна швидкості потоку рідини в першому ступені; якщо ж частка велика і, значно виступає з прикордонного шару рідини, то сила чолового опору може бути прийнята пропорційної квадрату швидкості потоку рідини, у якості якої звичайно, приймається величина місцевої швидкості потоку на рівні центра ваги міделевого перетину частки.

Середня швидкість потоку, яка необхідна для відриву часток, зростає зі зменшенням їхнього розміру. Це пояснюється тим, що силовий вплив на малі частки, що знаходяться в товщі прикордонного шару, де швидкості руху рідини малі, також дуже незначний.

Б.В. Зубків, Ж.С. Черненко [71] на підставі обробки експериментальних даних одержали наступну емпіричну залежність швидкості потоку рідини, що відповідає відриву часток, від їхнього розміру:

$$U_0 = ad_{\text{ч}}^6 . \quad (1.4)$$

Значення коефіцієнтів a і b визначаються експериментально.

При швидкості перевищуючої $1,3U_0$ спостерігається масовий відрив часток і створюються гідродинамічні умови їх зрівноважування у потоці рідини за рахунок несиметричного обтікання часток потоком і утворення за ними зон відриву потоку, у яких виникають турбулентні вихри.

Розглянемо механічну дію потоку рідини, який натікає на забруднену поверхню. Між забрудненням та поверхнею деталі існують певні сили зчеплення, які утримують забруднення на поверхні деталі [20]. Величина сил зчеплення залежить від складу та характеру забруднення. Робота по видаленню забруднення складається з механічної та фізико-хімічної дії очисного середовища на забруднення (розчинення).

Потік очисної рідини при взаємодії із забрудненою поверхнею розплющується та розтікається в сторони від центру контакту з поверхнею. При цьому на поверхню з боку потоку діють сили гідродинамічного тиску (сили тиску рідини), що створюють нормальний тиск на поверхню та сили швидкісної дії потоку рідини, який розтікається по поверхні, ці сили створюють дотичні напруження тертя.

Сила нормального тиску потоку, що діє на поверхню, визначаються за формулою Д. Бернуллі [72]:

$$P = \frac{\gamma}{g} SU^2 \sin \beta , \quad (1.5)$$

де γ – густина рідини, кг/м³;
 g – прискорення вільного падіння, м/с²;
 S – площа перерізу потоку, м²;
 U – швидкість потоку біля насадка, м/с;
 β – кут нахилу площини перешкоди до лінії дії потоку, °.

Дійсне значення P відповідно дещо менше за розрахункове [12] :

$$P = (0,92 \dots 0,96) \frac{\gamma}{g} S U^2 \sin \beta . \quad (1.6)$$

При турбулентному режимі руху рідини відбувається дуже енергійне хаотичне перемішування рідини. Турбулентні пульсації переносять імпульс рідини до поверхні твердого тіла, що обтікається рідиною, це призводить до появи середнього потоку імпульсу до поверхні [73]. Наявність середнього потоку імпульсу до твердої поверхні означає, що на дану поверхню діє сила поверхневого тертя. Перенесення імпульсу в рідині можна характеризувати турбулентною в'язкістю [74].

В загальному випадку осереднений турбулентний потік одночасно має молекулярну й турбулентну в'язкість. Тому повне сумарне дотичне напруження тертя на поверхні визначається за формулою [75]:

$$\tau = (\mu + A) \frac{d\bar{u}}{dy} , \quad (1.7)$$

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 газових пухирців) широке розповсюдження має поправка Ейнштейна до динамічного

коефіцієнта несучої фази. Поправлений динамічний коефіцієнт несучої фази виражається через відповідні коефіцієнти:

μ – для чистої несучої фази;

μ^* – для газоподібних домішок із сферичною формою часток.

Газові пухирці, що виникають при протіканні рідини через насадок із гострими крайками на вході мають розміри від 0,1 мм до 0,4 мм в діаметрі та вважаються [76,77] «твердими» домішками тому, що тиск всередині газових пухирців перевищує тиск в рідині. Тому динамічний коефіцієнт в'язкості несучої фази прийме вигляд :

$$\mu^* = \mu \left(1 + \frac{5}{2} \alpha \right), \quad (1.8)$$

де α – об'ємна доля домішок.

Тоді дотичні напруження тертя осередненого турбулентного потоку будуть рівні:

$$\tau = \left[\mu \left(1 + \frac{5}{2} \alpha \right) + A \right] \frac{d\bar{u}}{dy}. \quad (1.9)$$

Газорідинна суміш, яка утворюється в устаткуванні [78-80], завдяки наявності газових пухирців малих розмірів, руйнує граничний шар (в'язкий підшар), який існує на забрудненій поверхні в турбулентному потоці, тим самим збільшуючи інтенсивність перенесення розчинюючої рідини до забруднення, що дозволяє збільшити інтенсивність видалення забруднень із твердої поверхні на тих же режимах роботи устаткування без збільшення енерговитрат.

Питанню вивчення сил тертя газорідинних систем присвячено багато робіт. До числа найбільш докладних досліджень у цій області варто віднести роботи [81,82], де приведені результати локального газозмісту й швидкостей рідини й газу, а також інтенсивності пульсацій швидкостей. Протягом ряду

років під керівництвом Кутателадзе З. С., Бурдукова А. И., Кашинского О. Н. і ін. проводяться роботи з детального дослідження турбулентних характеристик газорідних потоків [83].

Вищенаведені результати досліджень тертя газорідного потоку дозволяють говорити про використання його як інтенсифікатора процесу промивки з газовими пухирцям малих розмірів при невеликому газозмісті. Використання газорідного потоку дозволяє збільшити напруги тертя без збільшення швидкості й напору рідини, як це реалізується для інтенсифікації процесу мийки при використанні чистої миючої рідини.

Способи одержання систем газ-рідина, пара-рідина у технологічних процесах відомі з багатьох літературних джерел [84]. У хімічній технології широко використовується процес барботування для проведення хімічних реакцій. При реалізації такого способу газ продувається під тиском через спеціальні насадки в рідину і перемішує її. Такі процеси характеризуються значною витратою газової фази. Процес барботування знаходить широке застосування й у процесах промивання виробів [85].

Використання пульсуючих струменів дозволяє підвищити ефективність очищення. Але слід зауважити, що значна частина енергії затоплених струменів розсіюється без виконання корисної роботи

Одним із таких способів є спосіб, в якому використовується зворотно – поступальний рух рідини через насадок із гострими крайками на вході в насадок [44,86]. Цей спосіб очищення є різновидом струмино-пульсуючого способу очищення, який здійснюється за допомогою вібраційних коливань рідини. При цьому використовується ефект гідродинамічного удару для збільшення швидкості протікання рідини, а відтак і кінетичної енергії потоку рідини при протіканні через місцевий опір – насадок.

Накладання коливань на рідину в камері пульсації через гнучку мембрану, за допомогою вібраційного приводу, призводить до пульсацій потоку рідини на виході з камери пульсації у насадку, турбулізації струменя,

що прискорює процес очищення, внаслідок розвинутого турбулентного обміну між шарами потоку рідини, яка діє на поверхню, що очищується.

За певних умов при протіканні пульсуючого потоку рідини через насадок із гострими крайками на вході відбувається виділення газу, розчиненого у рідині у вигляді пухирців і на виході з насадка отримується газорідинна суміш. Газові пухирці мають досить малі розміри і ведуть себе, як “тверді домішки”, посилюючи очисну дію пульсуючого потоку рідини при його розтіканні по поверхні, що очищується [87].

1.6. Існуючі конструкції установок та обладнання для мийки газорідинним потоком

Для проведення операцій мийки знайшли широке застосування установки та обладнання ультразвукової очистки, вібраційні машини, струменеві з вільним та зануреним струменем, струминно-пульсуючим зануреним струменем, газорідинні, струменеві із кавітаційним пухирцями [44]. Аналіз способів мийки та обладнання, яке реалізує ці способи свідчить про велике їх різноманіття. Усі способи мають свої переваги та недоліки. Вибір конкретного способу очищення обумовлюється в залежності від виду та властивостей забруднень, від вимог, що ставляться щодо чистоти виробів, умов та типу виробництва, а також з урахуванням економічних чинників.

У практиці ультразвукового очищення використовуються коливання великої потужності з малою амплітудою, що створюють нерегулярне поле з розривом суцільності очисного середовища [88,89]. При дії ультразвуку на рідину на поверхні розділу випромінювач-рідина виникають кавітаційні явища, що супроводжуються значним місцевим збільшенням тиску та температури рідини. В результаті незворотних втрат енергії виникають акустичні течії рідини, що відіграють важливе значення при переносі зважених в рідині забруднюючих часток.

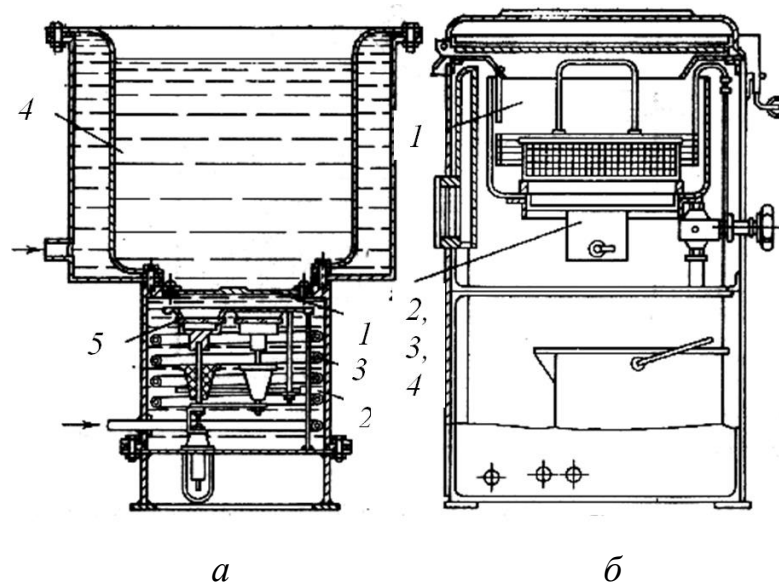


Рис. 1.7 – Конструкції ванни для ультразвукової мийки: *а*- з п'єзокварцевим випромінювачем: 1 – діафрагма; 2 – трансформаторна олія; 3 – нагрівач; 4 – ємність із миючим розчином; 5 – п'єзокварцевий випромінювач; *б* – з магнітострикційним перетворювачем: 1 – миючий розчин; 2 – перетворювач; 3 – трансформатор ультразвукових коливань; 4 – обмотка

Ці явища викликають основний фізичний вплив на процес ультразвукового очищення, вони ж посилюють хімічну взаємодію очисної рідини з забрудненнями. Експериментальні дослідження ультразвукових кавітаційних полів [90], зроблені за допомогою швидкісної кінозйомки, показали, що кавітаційні пухирці є головним чинником, що руйнує поверхневі плівки забруднень. Застосування ультразвукової мийки деталей на теперішній час обмежується з огляду на високу вартість процесу. На думку спеціалістів, застосування її економічно вигідно тільки для матеріалів високої вартості та для прецизійних механічних деталей та вузлів [91].

До числа недоліків ультразвукової мийки можна віднести обмеженість розмірів деталей, що очищуються, труднощі забезпечення ефективного підводу ультразвукової енергії до важкодоступних місць (глухі отвори тощо), труднощі

відводу забруднень з зони очищення, а також можливість кавітаційного пошкодження деталей при певних режимах.

Вібраційний спосіб мийки заснований на створенні акустичних течій звукової частоти та значної амплітуди навколо деталей, що промиваються, а також впливу ударної дії звукових коливань. Основними елементами, із яких складаються вібраційні установки є ванна для виробів, що очищаються, робоча рідина і вібратор. Можливі різні способи підводу звукових коливань у ванну. Введення звукових коливань може здійснюватися за допомогою пружного дна або мембрани, дисками без отворів та з отворами. Відома установка рис.1.8 для мийки [92,93].

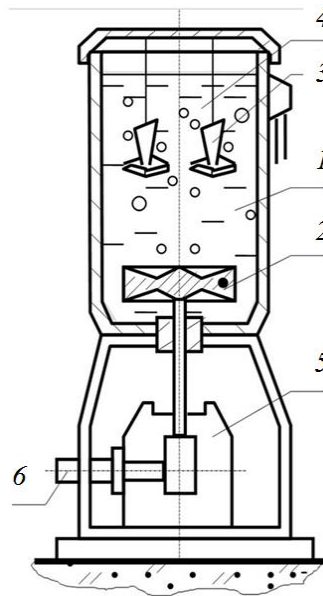


Рис. 1.8 – Установка для мийки: 1 – циліндрична ванна; 2 – диск-активатор; 3 – деталі, що промиваються; 4 – робоча зона ; 5 – вібраційний привод; 6 – двигун

Коливання вводяться диском зі штоком через отвір у дні ванни, який зв'язаний з вібраційним приводом з можливістю зворотно-поступального переміщення рис.1.8 [92,93]. Вадою даного пристрою є те, що є необхідність ущільнення штока на дні ванни, а найбільша інтенсивність очищення спостерігається біля діафрагми і зі збільшенням відстані від неї до деталей

відбувається загасання коливань очисної рідини, що веде до зниження інтенсивності очищення.

Значне поширення одержав струминний спосіб мийки. Причиною широкого поширення струминного способу очищення є високий рівень механічного впливу струменів на забруднену поверхню, що дозволяє інтенсифікувати процес очищення.

До переваг струминного способу мийки можна віднести порівняно низьку вартість миючих засобів, тому, що динамічний вплив струменів компенсує вади застосовуваних миючих засобів. Висока продуктивність процесу струминної мийки дозволяє застосовувати таке обладнання у масовому виробництві деталей. Важливою перевагою цих машин є простота монтування їх в поточні лінії і їхню пристосовуваність практично до всіх засобів транспортування деталей.

Струменеві установки звичайно містять очисну камеру із завантажувальним вікном, утримувач виробів, колектори з форсунками, розміщені в очисній камері, систему подачі миючої рідини, теплообмінник [94,95].

Деякі конструкції мають досить складну систему транспортування виробів, що очищуються. Установка [96] має конвеєр для переміщення виробів, на якому послідовно розміщені на поворотних осях площадки, закріплені на осях одноплечі важелі, привід повороту площадок у вигляді транспортного засобу, що несе упори, установлені з можливістю послідовної взаємодії з вільними кінцями важелів. Інша установка має транспортер деталей, виконаний із хрестоподібних поворотних ґратчастих площадок, набраних на паралельних валах. Механізм почергового повороту цих валів має чотирьох секторні мальтійські хрести, сектори яких між пазами виконані з увігнутою сегментною вибіркою, та розташовані під приводними валами додаткові вали мають диск для фіксації мальтійського хреста.



Рис. 1.9 – Установка для мийки струменями конвеєрного типу

До вад очисних машин такого типу можна віднести: необхідність спеціального направлення струменів до деталей складної конфігурації, що мають глибокі кишені, глухі отвори, що внаслідок екранізації залишаються недоступними для струменів мийної рідини; висока потужність нагнітального насоса; неможливість застосування у дрібносерійному та одиничному типі виробництва.

Розроблені стенди для газорідинної промивки виробів з порожнинами [97]. Подача газу імпульсне у потік рідини створює двофазний газорідинний потік, який має рух коливального характеру. Мікропухирці газу попадають у товщу граничного шару та визивають його руйнування. Принципова схема стенду для промивання трубопроводів газорідинним потоком показана на рис. 1.10.

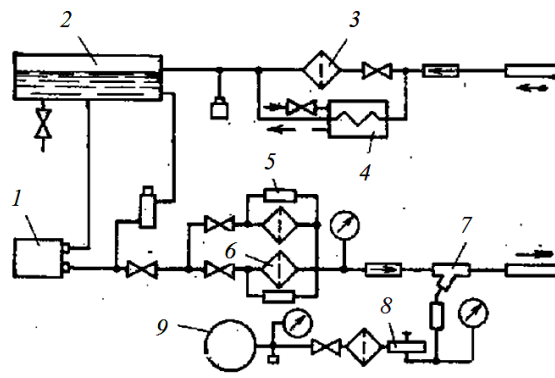


Рис. 1.10 – Схема стенду для промивки виробів з порожнинами газорідинним потоком: 1 – насос; 2 – бак; 3,6 – фільтри; 7 – трійник; 8 – редуктор; 9 – балон з газом

Вибираючи певні співвідношення між параметрами газу та рідини отримуємо можливість керувати амплітудно-частотними характеристиками газорідного потоку і відповідно ефективністю процесу промивки. Для підвищення ефективності очищення болотяно-жирових забруднень використовується струминний спосіб мийки з кавітаційними пухирцями. При цьому маємо збільшення величини нормальних і дотичних напружень при розтіканні рідини по поверхні.

Кавітація є динамічним процесом, при якому в рідині утворюються кавітаційні бульбашки або каверни, що формуються в результаті локального зниження тиску в рідині, яке відбувається за рахунок збільшення швидкості пульсації (гідродинамічна кавітація), або при проходженні акустичних хвиль великої інтенсивності під час кожного напівперіоду розрідження (акустична кавітація). Переміщаючись з потоком в зону з більш високим тиском під час напівперіоду стиснення, кавітаційна бульбашка при зустрічі з поверхнею, що очищається, сплескується і випромінює ударну хвилю, що і очищає поверхні, що промиваються. На рис.1.11 та 1.12 показано схеми: стенду для промивки деталей потоком рідини з кавітаційними пухирцями та конструкцію кавітаційної форсунки [98].

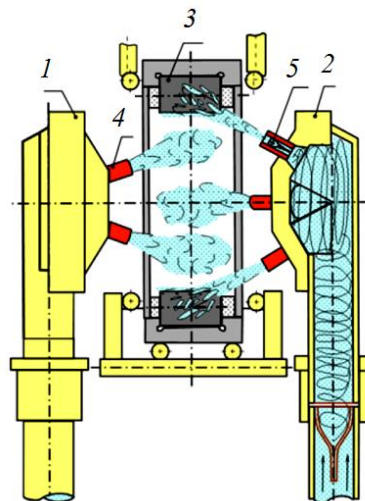


Рис. 1.11 – Схема стенду для промивки деталей потоком рідини з кавітаційними пухирцями: 1 ,2 – струменеві-кавітаційні головки; 3 – деталь, що промивається; 4 – сопла; 5 – кавітатор

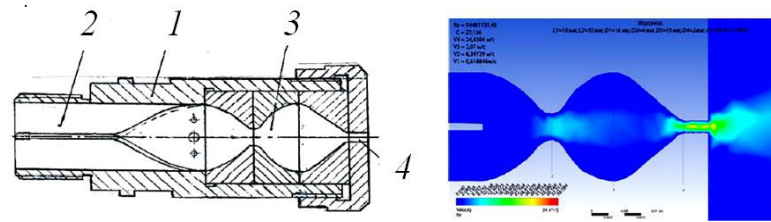


Рис.1.12 – Схема кавітаційної форсунки та моделювання розподілу потоку миючої рідини: (а) 1 – корпус; 2 – камера закрутки струменю; 3 – камера Лавалля; 4 – сопло; (б) – оцінка розповсюдження кавітаційного поля миючої рідини

Також відома конструкція пристрою [99] для гідрокавітаційної мийки деталей рис.1.13. Мийка здійснюється зануреними струменями рідини з кавітаційними пухирцями, які направлено на виріб, який обертається у ванні.

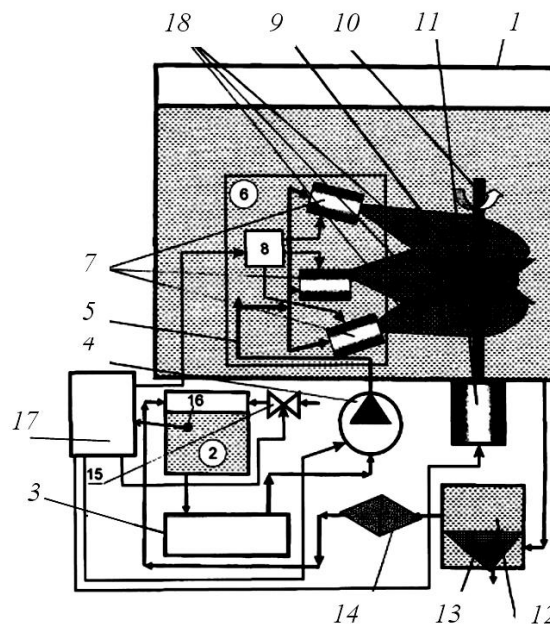


Рис.1.13 – Схема пристрою для гідрокавітаційної мийки деталей:
 1 – ванна; 2 – накопичувальна ємність; 3 – термостат; 4 – насос;
 5 – магістраль; 6 – блок збурення кавітації; 7 – кавітатори; 8 – механізм налагодження кавітаторів; 9 – деталь; 10 – вісь; 11 – двигун; 12 – відстійник;
 13 – фільтр грубої очистки; 14 – фільтр тонкої очистки; 15 – вентиль; 16 – бак;
 17 – блок керування; 18 – занурені струмені з кавітаційними пухирцями

Проведений аналіз технічної літератури [92-103] показав, що промивання деталей при низькочастотній кавітації не тільки продуктивніше відомих інших способів миття, але і дозволяє очищати деталі складної конфігурації з внутрішніми порожнинами і глухими каналами, успішно видаляють тверді абразивні частинки, шаржовані в поверхні деталей при шліфуванні та ін.

1.7. Аналіз об'єкта досліджень

Для виконання усіх видів робіт з організації раціонального обслуговування і ремонту устаткування й інших видів основних фондів на підприємствах створюються ремонтні служби, їхня структура залежить від багатьох чинників: типу та обсягу виробництва, його технічних характеристик, розвитку кооперування під час виконання ремонтних робіт.

Промиванню підлягає деталі та вузли обладнання за інструкціями заводів-виробників з врахуванням умов його експлуатації. При очистці та промиванні здійснюється розбирання окремих вузлів, очищення розібраних вузлів від забруднень та пилу. При цьому замінюються запобіжні прокладки, промиваються і прочищаються запобіжні фільтри, мастильні отвори.

Об'єктом дослідження вибрано технологічний процес очистки та мийки забруднень деталей при ремонті обладнання легкої промисловості у дрібносерійному та одиничному типу виробництва. В процесі роботи обладнання втрачає свої робочі якості головним чином через забруднення окремих деталей і їх зношування, що веде до зниження точності виконання операції, зростає навантаження на певні вузли, та з'являється брак. Для компенсації зношування та підтримки устаткування в нормальному працездатному стані потрібні системне технічне обслуговування і виконання ремонтних робіт, а також проведення заходів щодо технічної діагностики.

Як приклад, у табл.1.1 наведено річну відомість машин, що підлягають ремонту на ТОВ «Ролада», м. Львів.

Таблиця 1.1

Відомість обладнання, машин, що підлягають ремонту з очисткою та промивкою деталей та вузлів

№ п.	Модель обладнання, машини	Вид ремонту	Назва вузлів та деталей, які підлягають очистці та мийки	Кількість машин
1	Оверлок Juki MO-6714DA-BE6-40H	середній	Шарові цапфи	3 шт
2	Оверлок TYPICAL GN 793	капітальний	Механізм петлячів, вузли передачі коливних рухів, шарові цапфи	4 шт
3	Універсальна TYPICAL GC 6150HD	середній	Механізм човника. Вузол човникового валу	2 шт
4	Універсальна TYPICAL GC 6160B	середній	Механізм голки. Вузол кривошипа	2 шт
5	Розпошивалка TYPICAL GK 32500-11	капітальний	Механізм переміщення. Вузол ексцентриків	2 шт
6	Розпошивалка TYPICAL GK 1500D-02BB	капітальний	Механізм петлячів. Вузол передачі коливних рухів	2 шт

Як приклад об'єктів, які підлягають процесам очистки та мийки наведено деталі технологічного обладнання легкої промисловості, які з часом роботи обладнання покриваються забрудненнями, що призводить до порушення нормального його функціонування та виходу з ладу обладнання. Вали швейної машини (рис.1.14, рис.1.15), що знаходяться відкритими, з часом роботи покриваються, механічно пов'язаним з поверхнею, забрудненням жиркових і масляних плівок мастила з пилом і волокнами тканин. Плівки утворюються на краях корінних шийках та заважають вільному обертанню вала, збільшують

сили тертя і нагрівають підшипник та збільшують потребу у потужності обертання валу. Таке забруднення, що полімеризувалося, підлягає очистці із значними втратами механічної енергії. Тому для в'язких полімеризованих забруднень пропонується проводити очистку поверхонь твердими частками або дрібними металевими кульками.

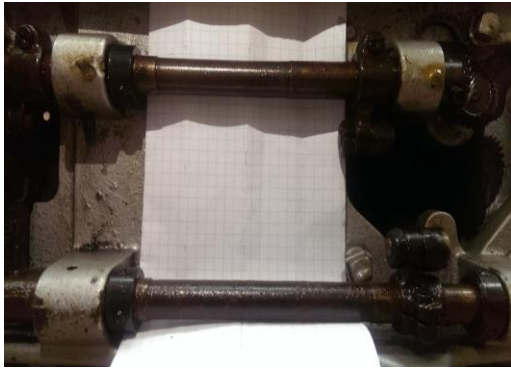


Рис. 1.14 – Вали із забрудненнями у вузлах ковзання швейної машини 26 А 79916 82кл.



Рис. 1.15 – Вигляд забруднення валу швейної машини 26 А 79916 82кл.

На рис.1.16 та 1.17 показано зворотну пружину та відкритий підшипник, які працювали довгий час в обладнанні та забруднені загуслою змазкою з сумішшю пилу та волокон тканин. Таке забруднення може бути видалено ефективно мийкою струменями рідини з кавітаційними пухирцями.

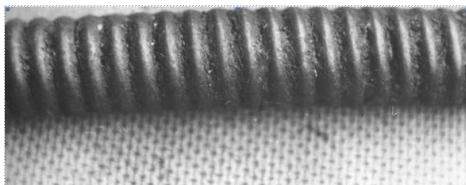


Рис. 1.16 – Фотографія зворотної пружини із забрудненнями

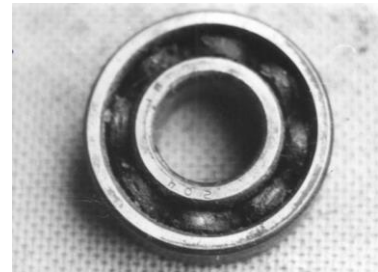


Рис. 1.17 – Фотографія відкритого підшипника із забрудненнями

Як видно, що у процесі роботи обладнання його рухомі деталі з певним часом покриваються забрудненням на основі змащувальних матеріалів в які попадають пил, волокна тканин, що призводить до заїдання підшипників вузлів кочення та ковзання, а далі це веде до погіршення роботи обладнання та зниженням якості виробу.

Для очищення забруднень, які сильно пов'язані з поверхнею, запропоновано струминно-пульсуючий спосіб очищення зануреним струменем у ванні з твердими частинками або дрібними металевими кульками, які значно підвищують нормальні напруження потоку рідини на забруднення та здійснюють зсув в'язкого забруднення.

Для мийки поверхонь та порожнин виробів пропонується використати струминно-пульсуючий спосіб з потоком газових пухирців, а для процесу очищення струминно-пульсуючий спосіб з потоком твердих частинок, який забезпечує велику ударну дію потоку на частки забруднень. Турбулізація потоку забезпечує високу ефективність очищення поверхонь від пилу, масел, мастил, продуктів їх розпаду та стружки, що присутні після механічних операцій формоутворення поверхонь та порожнин та ремонті обладнання.

1.8. Вибір вібраційного приводу для машини очистки та мийки забруднень поверхонь деталей

В техніці, при проектуванні вібраційних машин, застосовують різні по конструкції та виду застосованої енергії вібраційні приводи, а саме механічні, гідравлічні, пневматичні, електромагнітні, інерційні.

Проведений аналіз вібраційних приводів [44] для машин очистки та мийки показує, що основним критерієм вибору виду приводу є постійність амплітуди коливань приводу при зміні частоти коливань. Таким вимогам відповідають механічні ексцентрикові та кривошипно-шатунні привода. Вони рекомендуються для застосування у вібраційних машинах для очистки та мийки.

1.9. Висновки до розділу 1. Мета і завдання досліджень

1. Проведений аналіз стану наукових досліджень застосування різних способів у процесах очищення та мийки поверхонь деталей показав, що процес очищення поверхні від забруднення проходить більш інтенсивно із застосуванням зануреного пульсуючого струменя з твердими частинками, а процес мийки більш інтенсивно проходить при застосуванні зануреного пульсуючого струменя з газовими пухирцями, які виникають в процесі кавітаційної дії на миючий водний склад і постає доцільність створення конструкцій вібраційних машин які реалізують ці переваги.

2. Аналіз природи забруднень деталей та вузлів обладнання показав, що їх можна поділити на сильно зв'язані з поверхнею та слабо зв'язані з поверхнею. Для перших необхідно проводити очищення із застосуванням значних енергетичних витрат, а для других промивання з меншими енергетичними витратами, застосовуючи природні та синтетичні водні розчинники.

3. Аналіз існуючих теоретичних досліджень процесу очищення та мийки забруднень показав, що на поверхню із забрудненням від струменя діють сили гідродинамічного тиску рідини, що створюють нормальний тиск на поверхню забруднення та сили швидкісної дії потоку рідини, який при розтіканні по поверхні забруднення створює дотичні напруження тертя, що ініціюють процес мийки та очистки.

4. З аналітичних та експериментальних досліджень встановлено, що головним фактором, який впливає на інтенсивність процесу очистки та мийки, є величина швидкості та нормальний тиск потоку рідини.

5. Аналіз способів та сучасних конструкцій обладнання та машин для очистки та мийки забруднень показав можливості, переваги і недоліки різних способів та конструкцій обладнання. У результаті проведеного аналізу було запропоновано застосувати для мийки та очистки забруднень пульсуючий занурений струмінь рідини, який отримується із застосуванням вібраційного

приводу з робочим органом у вигляді камери пульсації мембранного типу з насадком.

6. Для процесу очищення забруднень, які сильно зв'язані з поверхнею, запропоновано застосувати занурений пульсуючий струмінь з твердими частинками або дрібними металевими кульками, які значно підвищують нормальні напруження потоку рідини на забруднення та здійснюють зсув в'язкого забруднення. Для мийки поверхонь та порожнин виробів пропонується застосувати занурений пульсуючий струмінь рідини з газовими пухирцями.

8. Об'єктом дослідження вибрано технологічний процес очистки та мийки забруднень деталей при ремонті обладнання легкої промисловості у дрібносерійному та одиничному типу виробництва зануреним пульсуючим струменем рідини який виникає у вібраційній машині.

Для досягнення вказаної мети у роботі поставлені та вирішувались наступні задачі:

Мета і задачі дисертаційного дослідження. Мета дисертаційної роботи полягає у розробленні вібраційної машини з пульсуючим зануреним струменем рідини для очищення та мийки деталей при ремонті у дрібносерійному та одиничному виробництві з обґрунтуванням її конструктивних параметрів і раціональних режимів роботи приводу.

Досягнення сформованої мети передбачає вирішення таких завдань:

- розробити фізичну модель вібраційної машини струминного типу для очистки та мийки забруднень, що відображає прояв механічного впливу на різні види забруднень;
- побудувати математичну модель руху робочого середовища у вібраційній машині із зануреним пульсуючим струменем з метою визначення зміни максимального тиску струменя від конструктивних параметрів та режимів роботи вібраційного приводу;
- аналітично визначити залежність продуктивності вібраційної машини струминного типу для очистки та мийки забруднень від режимів приводу та інших параметрів;

- сформувати методику проведення експериментальних досліджень динамічних параметрів роботи вібраційної машини мембранного типу, характеристик її приводу і визначити співвідношення її конструктивних параметрів та розробити реєструючі апаратуру і датчики;
- за допомогою відео-фіксації дослідити процес формування пульсуючого зануреного струменя миючої рідини з газовими пухирцями та твердими частинками;
- дослідити вплив технологічних та конструктивних параметрів на величину максимального тиску зануреного пульсуючого струменя рідини та параметрів приводу вібраційної машини мембранного типу;
- методом планування експерименту визначити раціональні конструктивні параметри та режими роботи приводу при створенні затопленого пульсуючого струменя рідини з газовими пухирцями для процесу мийки забруднень;
- провести експериментальні дослідження працездатності вібраційної машини мембранного типу для очистки і мийки затопленим пульсуючим струменем рідини з газовими пухирцями та твердими частинками;
- сформувати прикладну методологію проектування та розрахунку параметрів модулів вібраційної машини мембранного типу для очистки і мийки затопленим пульсуючим струменем рідини з газовими пухирцями та твердими частинками;
- розробити практичні рекомендації та передати на виробництво технічну документацію на експериментально-промислову модель вібраційної машини мембранного типу для очистки і мийки.

РОЗДІЛ 2

ПОБУДОВА МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ РУХУ БАГАТОФАЗНОГО СЕРЕДОВИЩА У РОБОЧОМУ ОРГАНІ ВІБРАЦІЙНОЇ МАШИНИ ТА ОБГРУНТУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ І РЕЖИМІВ РОБОТИ ПРИВОДУ

2.1. Конструкція модульної вібраційної машини для очистки забруднень потоком твердих часток та мийки деталей при ремонті обладнання

Конструкція вібраційної машини для очистки забруднень потоком твердих часток та мийки деталей при ремонті обладнання [104,105] пояснюється креслениками, на яких зображено: на рис.2.1 – головний вид вібраційної машини; на рис.2.2 – проекція виду вібраційної машини; з перетином за А-А.

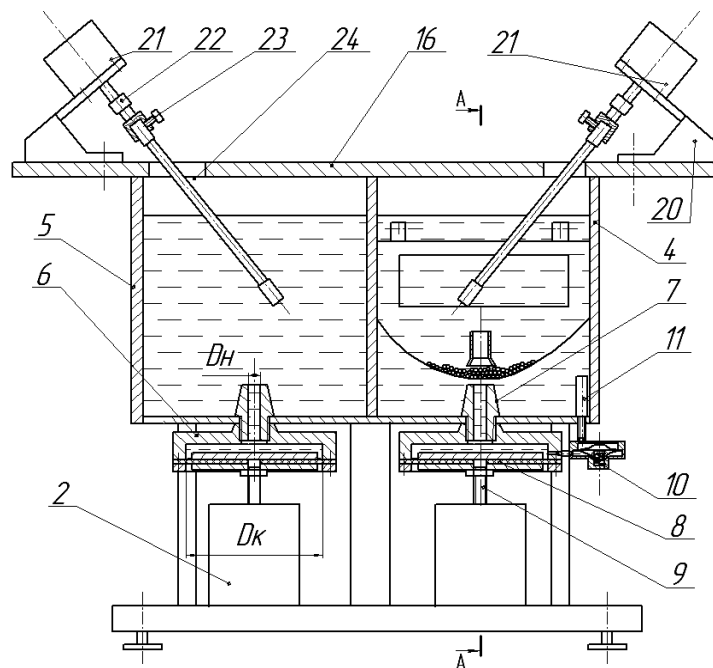


Рис.2.1 – Схема загального виду модульної вібраційної машини для очистки потоком твердих часток та мийки забруднень

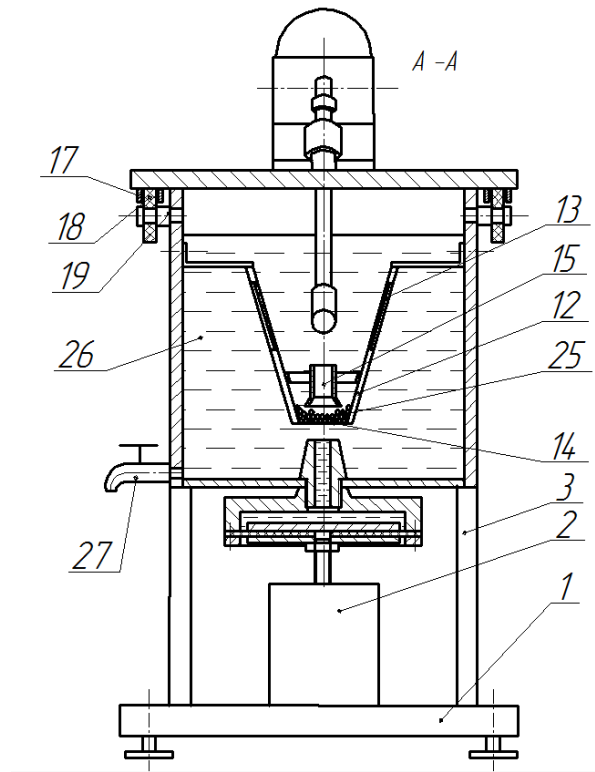


Рис.2.2 – Проекція з перетином А-А загального виду вібраційної машини для очистки потоком твердих часток та мийки забруднень

Вібраційна машина для очистки забруднень потоком твердих часток та мийки деталей при ремонті обладнання [104,105] (рис.2.1, рис.2.2) містить основу 1, на якій встановлено вібропривід 2, на стійках 3 і розміщено ванну модуля 4 – для очищення у потоці рідини та полістироловими кульками, ванну модуля 5 – для мийки пульсуючим потоком миючої рідини; на дні ванн 4 та 5 закріплено корпус камери пульсації 6 за допомогою насадка 7 (діаметром D_n) та нижня частина корпусу 6 (діаметром D_k) закрита мембраною з дисками 8, яка закріплена до штока 9 віброприводу 2, а порожнина камери пульсації 6 з'єднано мембранним клапаном 10 та забірною трубкою 11 з порожниною ванни 4 у яку встановлено контейнер 12 з боковими сітками 13 та сіткою 14, яка розташована над соплом 7, у коробі 12 розміщено сопло 15, ванни 4 та 5 закриті кришкою 16 яка має можливість рухатися по напрямним 17 на роликах 18 які встановлені на осях 19, на криці 16 за допомогою кутників 20 встановлено мотор-редуктор 21 який за допомогою муфти 22 з'єднано із

затискачем 23 для деталі 24, у короб 12 засипано тверді частки (полістиролові кульки або металеві кульки) 25, а у ванни 4 та 5 залита миюча рідина 26, яку після спрацювання можна злити крізь кран 27.

Працює вібраційна машина наступним чином: у ванни 4,5 заливають миючу рідину 26 та засипають у контейнер 12 тверді частки (полістиролова крихта або металеві кульки) 25, деталь 24, яка підлягає очищенню, закріплюють у затискачі 23 та встановлюють кришку 16 у напрямні 17. Включається мотор-редуктор 21, який обертає деталь 24 та вібропривід 2, що призводить до коливання мембрани з дисками 8 і у насадку 7 виникає пульсуючий струмінь рідини, який проходить крізь сітку 14 та захватує тверді частки 25, вдаряє ними по забрудненню та зриває його не порушуючи поверхню деталі. При русі мембрани з дисками 8 униз миюча рідина 26 проходить крізь отвір у насадку 7 та забірну трубку 11 і відкритий клапан 10 із меншим зусиллям тяги приводу та витратою енергії вібраційного приводу. При русі мембрани з дисками 8 зверху здійснюється протікання миючої рідини 26 крізь насадок 7, а клапан 10 закривається. Деталь 24 обертається, а кришці 16 вручну надається поздовжньо-поступний рух і очистка деталі 24 проводиться зі всіх сторін на необхідній довжині.

Після очищення кришка 16 піднімається та деталь 24 перевстановлюється і проводиться очищення з іншої сторони деталі 24. Після підняття кришки 16 очищена деталь 24 знімається та встановлюється у затискач 23 у ванні 5 для мийки, а забруднена деталь 24 встановлюється у затискач 23 у ванні 4 для очистки. Кришка 16 встановлюється у напрямні 17 та включається мотор-редуктор 21 та вібропривід 2. У ванні 4 проводиться очистка деталі 24, а у ванні 5 проводиться мийка деталі 24 після її очищення. Мийка здійснюється за допомогою пульсуючого струменя рідини з кавітаційними пухирцями, які утворилися у струмені з насадка при певних режимах роботи приводу. Після проведення мийки у ванні 5 деталі 24 та очищення деталі 24 у ванні 4 мотор-редуктор 21 та вібропривід 2 виключаються та проводиться виїмка деталі 24 з

ванни 4, а на її місце встановлюється деталь 24 з ванни 5 після очищення. При спрацюванні миючої рідини 26 (забрудненню) її зливають крізь кран 21.

Запропоновані методи очистки та мийки у вібраційній машин базуються на пульсуючих затоплених струменях рідини, які отримуються у вібраційній машині з розташуванням в оптимальній технологічній послідовності. Поєднання двох відомих методів і їх чергування, дозволяють отримати в єдиній машині новий сукупний позитивний результат по зняттю забруднень з поверхонь деталей.

2.2. Аналіз основних фізичних факторів, що діють на забруднення у процесі мийки пульсуючим зануреним струменем рідини з газовими пухирцями

Розглянемо схему розтікання зануреного пульсуючого струменя з газовими пухирцями при ударі по нормалі до поверхні (рис. 2.3), який витікає з насадки D_n за цикл коливання вібраційного приводу [105,106].

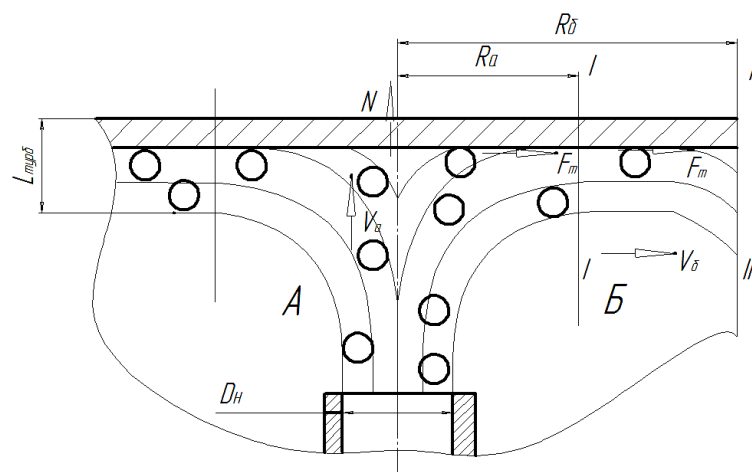


Рис.2.3 – Схема розтікання струменя з газовими пухирцями по забрудненій поверхні: D_n – діаметр насадки; R_a – радіус зони А; $R_б$ – радіус зони Б; F_m – сили тертя потоку; V_a – швидкість струменя в зоні А; $V_б$ – швидкість потоку в зоні Б; $L_{турб_б}$ – глибина турбулентного потоку; N – сила струменя рідини, який діє нормально до поверхні

Розділимо струмінь, що розтікається по поверхні, на дві зони – *A* та *B*. Зона *A* з радіусом R_a характеризується тим, що в ній вектори швидкостей рідини $V_{стр}$ направлені під прямим кутом до поверхні, на яку діють нормальні напруження N в напрямку швидкості і відповідно тиску та дотичні сили тертя F_m під дією потоку, що розтікається.

Розміри зони *A* (рис.2.4) обмежуються стиснутим перерізом *I-I* глибиною $L_{турб}$, яку можна поділити умовно на основний турбулентний потік вздовж поверхні із забрудненням та на шари: δ – дифузійний підшар; δ_1 – в'язкий підшар δ_2 – турбулентний граничний підшар.

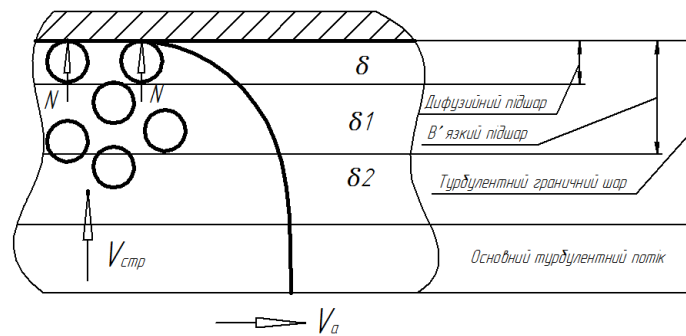


Рис. 2.4 – Взаємодія струменя рідини з газовими пухирцями із забрудненою поверхнею в зоні *A*: δ – дифузійний підшар; δ_1 – в'язкий підшар; δ_2 – турбулентний граничний підшар; $V_{стр}$ – швидкість струменя; N – нормальні зусилля, які створюють газові пухирці у струмені рідини

Газові пухирці малих розмірів завдяки поверхневому натягу мають всередині значний тиск та виступають, як «тверді частинки» при взаємодії з забрудненою поверхнею та додатково створюють нормальні напруження на поверхню забруднення.

Зона *B* характеризується зміною напрямку швидкостей у межах перерізів *I-I* та *II-II*. Нормальний тиск у цій зоні відсутній. Вектори швидкостей основної течії паралельні поверхні, а на забруднення поверхні діють дотичні сили тертя F_m в напрямку основної течії. Швидкість рідини зменшується зі значення V_a до значення V_b . В перерізі *II-II* на відстані R_b від центру контакту спостерігається

валок рідини (див. рис. 2.3). В перерізі *II-II* спостерігається різке збільшення шару рідини, що відоме в гідравліці під назвою гідравлічного стрибка (див. рис. 2.3).

Газові пухирці в зоні *B* призводять до збільшення турбулізації потоку рідини порушуючи умовні границі підшарів тим самим покращують умови перенесення часток забруднення із дифузійного шару у більш турбулентні шари тим чином інтенсифікується процес мийки розчинних забруднень рис.2.5.

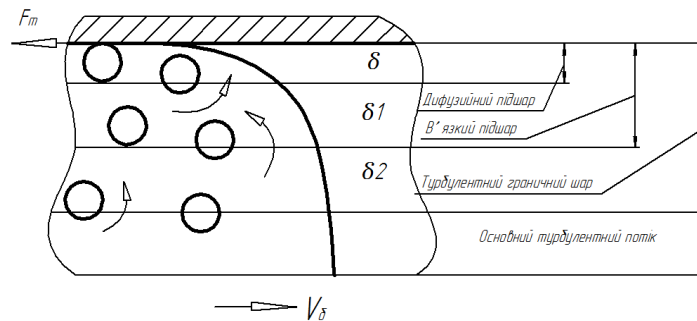


Рис. 2.5 – Взаємодія потоку рідини з газовими пухирцями із забрудненою поверхнею в зоні *B*: δ – дифузійний підшар; δ_1 – в'язкий підшар; δ_2 – турбулентний граничний підшар; V_δ – швидкість потоку в зоні *B*

Встановлено, що пульсуючий струмінь, який виникає у вібраційній машині має значну турбулентну характеристику [107]. Потік миючої рідини у пульсуючому струмені, при взаємодії із забрудненою поверхнею, розплющується та розтікається в сторони від центру контакту з поверхнею (див. рис. 2.3). При цьому, на забруднену поверхню з боку потоку з газовими пухирцями, діє осереднений гідродинамічний натиск струменю та газових пухирців, виникають нормальні напруження на поверхні забруднення (див. розділ 1, п.п. 1.5).

При турбулентному режимі руху рідини з газовими пухирцями повздовж поверхні із забрудненням відбувається енергійне хаотичне перемішування шарів рідини та виникають дотичні напруження тертя потоку рідини, що розтікається вздовж забруднення, що описано у розділі 1.

Описані фізичні явища прискорюють процес мийки забруднень. Основними параметрами для досягнення такого впливу є: максимальна швидкість пульсуючого струменя з газовими пухирцями і відповідно його динамічний тиск на забруднення; дотичні напруження тертя потоку.

2.3. Аналіз основних фізичних факторів, що діють на забруднення у процесі очистки пульсуючим зануреним струменем рідини з твердими частинками

Розглянемо фізичні основи взаємодії пульсуючого турбулентного потоку рідини з твердими частинками із забрудненням поверхні деталі.

Пульсуючий струмінь миючої рідини з твердими частинками при взаємодії із забрудненою поверхнею, розплющується та розтікається в сторони від центру контакту з поверхнею (рис.2.6).

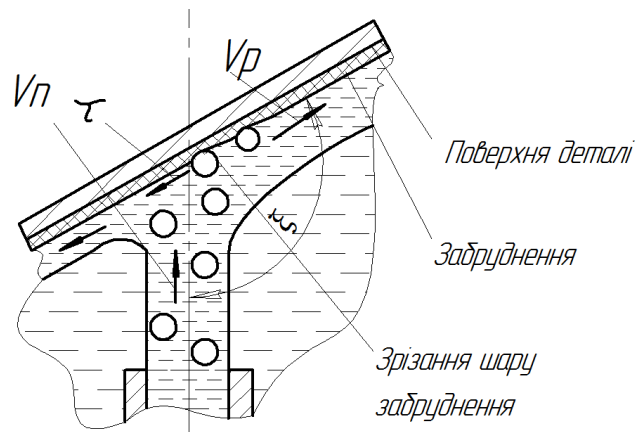


Рис. 2.6 – Схема взаємодії потоку рідини з твердими частинками із забрудненою поверхнею: V_n – швидкість потоку рідини з твердими частинками на виході з сопла; τ – сила тертя потоку рідини з частинками; ζ – кут нахилу поверхні деталі із забрудненням; V_p – швидкість розтікання рідини по поверхні [108]

При цьому, на забруднену поверхню з сторони пульсуючого потоку із твердими частинками, діє осереднений гідродинамічний тиск двофазного потоку з частинками (нормальний), який визначається за залежністю для однієї частинки:

$$P_{c.ч} = \frac{\rho_{c.ч} \cdot V_{c.ч}^2}{2} \sin \xi, \quad (2.1)$$

де $P_{c.ч}$ – осереднений тиск струменя рідини та частинки;

$\rho_{c.ч}$ – осереднена щільність потоку та матеріалу твердої частинки;

$V_{c.ч}$ – осереднена швидкість частинки та струменя рідини;

ξ – кут нахилу поверхні до осі струменя.

При руху струменя рідини з частинками до поверхні, а потім повздовж поверхні із забрудненням спочатку відбувається удар частинки по забрудненню, вдавлювання її у забруднення та зминання (ініціювання процесу зрізання) частини забруднення при переміщенні потоку уздовж поверхні, що очищається.

Дотичні напруження тертя турбулентного потоку несучої фази з включеннями твердих частинок значно більше чим потоку рідини без твердих частинок і залежать від об'ємної долі їх домішок (розділ 1).

2.4. Побудова аналітичної моделі руху рідини у насадку робочого органу вібраційної машини для мийки забруднень з урахуванням гідроудару у камері пульсації

Для побудови аналітичної моделі руху рідини розроблено схему робочого органу вібраційної машини для мийки від забруднень поверхонь деталей машин пульсуючим затопленим потоком рідини з кавітаційними пухирцями [109], яка показана на схемі рис. 2.7.

Як вже відмічалось, (розділ 1) при витіканні рідини з насадка при певних умовах утворюються кавітаційні пухирці у камері пульсації, що у струмені рідини попадають на поверхню, котра очищується та вони збільшують нормальні та дотичні напруження у шарі забруднення.

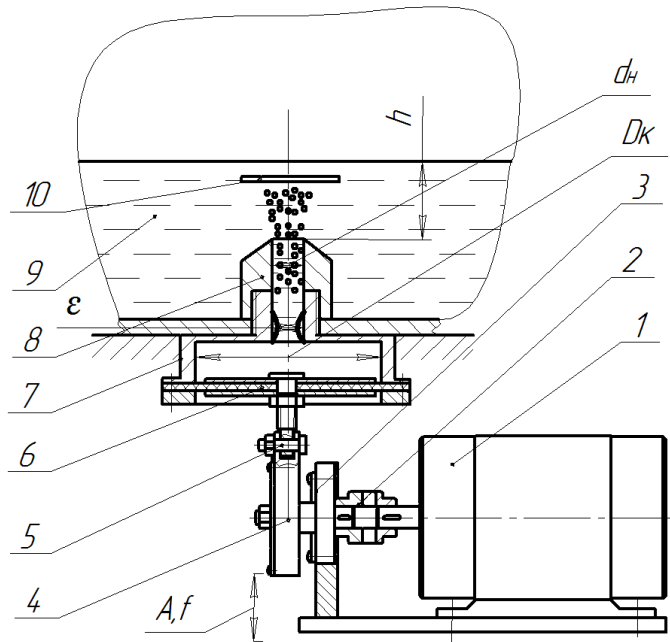


Рис. 2.7 – Схема моделі робочого органу вібраційної машини для мийки забруднень пульсуючим струменем рідини з кавітаційними пухирцями: 1 – електродвигун постійного струму; 2 – муфта; 3 – стійка; 4 – обойма ексцентрика з підшипником; 5 – вісь; 6 – пружна мембрана з дисками; 7 – камера пульсації; 8 – насадок; 9 – рідина; 10 – поверхня, що промивається; d_n – діаметр насадка; D_k – діаметр камери пульсації; h – відстань від зрізу насадка до поверхні, що промивається; A, f – амплітуда та частота коливань приводу вібраційної машини; ζ – коефіцієнт звуження потоку

Розглянемо основні етапи роботи робочого органу вібраційної машини (див. рис.2.7) та етапи руху середовища.

При руху мембрани з дисками уверх 6 створюється максимальний тиск у камері пульсації 7. Пульсуючий потік зануреної рідини з насадка 8 створюється

за рахунок руху мембрани з дисками 6, які приєднано штоком до віброприводу 4. При ході мембрани з дисками 3 униз рідина 9 втягується у камеру пульсації 7. При ході мембрани з дисками 3 уверх рідина 9 виштовхується з насадка 4 у якому виникає кавітаційна кільцева порожнина заповнена кавітаційними пухирцями. При певних режимах роботи приводу ця порожнина руйнується та пухирці викидаються у пульсуючому струмені рідини на поверхню 10, що очищається.

Розглянемо рух рідини у робочому органі з урахуванням, що швидкість газових пухирців у пульсуючому струмені дорівнює максимальній швидкості самого струменя рідини.

Максимальний тиск рідини за цикл коливання, який створюється у камері пульсації, витрачається на утворення максимального тиску пульсуючого вертикального струменя рідини з урахування глибини занурення насадка [107,111]:

$$P_{\max} = \frac{\rho \cdot V_{\max}^2}{2} - \rho \cdot g \cdot h, \quad (2.2)$$

де ρ – густина води, $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$;

V_{\max} – максимальна швидкість струменя рідини;

h – глибина занурення насадка.

У зв'язку із складністю аналітичного опису процесів, які виникають у камері пульсації та насадку при імпульсному проходженні рідини крізь нього, при побудові аналітичної моделі пульсуючого руху робочого середовища крізь насадок застосуємо наступні припущення:

- рух рідини крізь насадок розглядається, як наслідок руху пласкої ідеальної рідини з камери пульсації при русі мембрани уверх (стиснення рідини у камері пульсації);

- механізм виникнення кавітаційних пухирців у камері пульсації при русі її у низ не враховується (виникають при зниженні тиску у камері пульсації)

нижче від атмосферного).

Проведемо побудову аналітичної моделі руху рідини крізь насадок у вібраційній машині за рахунок виникнення гідроудару в системі.

При роботі приводу машини, за період коливання мембрани уверх в камері пульсації, у рідині, яка виходить з насадку, виникає максимальний тиск завдяки гідроудару, який визначається за формулою [109]:

$$P_{\max} = \rho \cdot V_{\max} \cdot C, \quad (2.3)$$

де P_{\max} – максимальний тиск у струмені;

ρ – щільність рідини (998 кг/м³);

C – швидкість розповсюдження ударної хвилі (1350 м/с.).

Для значення максимального тиску рідини, який виникає у насадку робочого органу вібраційної машини з урахуванням параметрів роботи вібраційного приводу та з урахуванням величини його заглиблення можна записати наступне рівняння:

$$P_{\max} = \rho \cdot A_n \cdot f \cdot C - \rho \cdot g \cdot h, \quad (2.4)$$

де f – частота коливань віброприводу;

A_n – амплітуда коливань рідини у насадку, $A_n = \frac{D_k^2 A_k}{d_n^2}$;

D_k – діаметр камери;

d_n – діаметр насадка;

A_k – амплітуда коливань мембрани у камері пульсації;

h – глибина занурення насадка.

З урахуванням звуження потоку рідини у насадку, максимальна швидкість у ньому визначається за залежністю [109]:

$$V_{\max} = \frac{\xi \cdot D_{\kappa}^2 \cdot A_{\kappa} \cdot f}{d_{\text{н}}^2}, \quad (2.5)$$

де $\xi = 0,39$ – коефіцієнт звуження потоку у насадку.

З урахуванням формули (2.5) максимальний тиск за формулою (2.2) на виході з насадки робочого органу вібраційної машини можна записати, як залежність максимального тиску пульсуючого струменя від режимі роботи приводу вібраційної машини та її конструктивних параметрів з урахуванням глибини занурення [109]:

$$P_{\max} = \rho \frac{\xi \cdot D_{\kappa}^2 \cdot A \cdot f}{d_{\text{н}}^2} C - \rho \cdot g \cdot h. \quad (2.6)$$

Згідно ф.(2.6) проведено підстановку чисельних значень параметрів та отримано аналітичну залежність зміни величини максимального тиску струменя від частоти коливань віброприводу (рис.2.8).

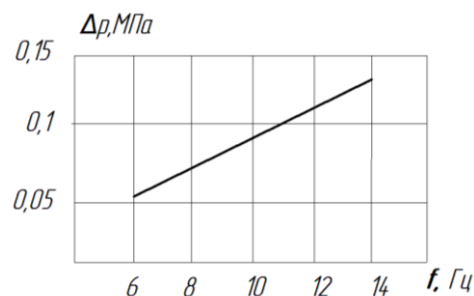


Рис.2.8 – Залежність величини максимального тиску пульсуючого струменя від частоти коливань при: $A = 0,002$ м; $D = 0,1$ м; $d = 0,01$ м

Виходячи з того, що у рідині присутнє розчинене повітря та газу і при роботі приводу машини у камері пульсації виникають кавітаційні процеси, величина реального перепаду тиску повинна бути значно менша.

Тому для визначення фактичного перепаду тиску пульсуючого зануреного струменя рідини далі необхідно провести експериментальні дослідження.

2.5. Побудова аналітичної моделі руху рідини у насадку робочого органу вібраційної машини для очистки забруднень з визначенням його амплітудо-частотної характеристики

Для побудови аналітичної моделі руху рідини розроблено схему робочого органу вібраційної машини для очистки від забруднень поверхонь деталей машин пульсуючим затопленим потоком рідини з твердими частинками (багатофазним потоком), яка показана на схемі рис. 2.9.

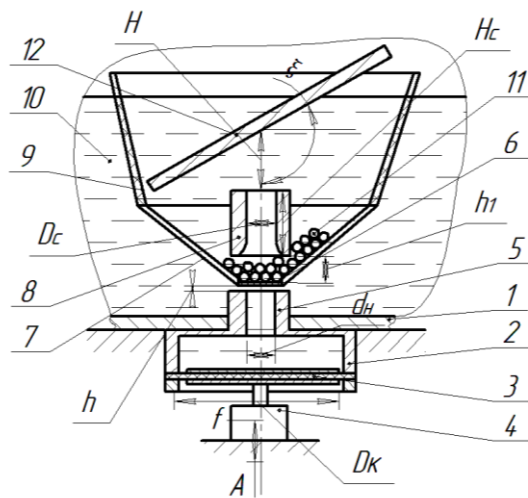


Рис.2.9 – Схема моделі робочого органу вібраційної машини для очистки забруднень потоком твердих часток: 1 – корпус ванни; 2 – камера пульсації; 3 – мембрана з дисками; 4 – вібропривід; 5 – насадка; 6 – сітка; 7 – короб для збору твердих частинок; 8 – сопло; 9 – сітка; 10 – м'яча рідини; 11 – тверді 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

Несущою фазою потоку є рідина, яка пульсуючим струменем виходить з насадка, проходить крізь сітку на якій розташовано тверді частинки або

металеві кульки. Надалі вони ежектуються у потік і у вигляді двофазного потоку крізь сопло попадають на забруднену поверхню [108].

Головний фактор утворення високої інтенсивності процесу очищення є зростання величини зусилля удару твердих частинки або металевих кульок, а в свою чергу це залежить від максимальної швидкості рідини з насадка або максимального тиску струменя рідини на поверхню.

Завдяки циклічній подачі твердих частинки або металевих кульок на сітку перед зрізом насадка вони викидаються порціями у потоці рідини на забруднену поверхню та не зіштовхуються у потоці струменя.

Розглянемо побудову аналітичної моделі кінематичного руху рідини у робочому органі для очистки вібраційної машини у вигляді пульсуючого струменя ідеальної рідини без урахування процесу кавітації та гідроудару. Введемо припущення, що швидкість твердих частинок у потоці буде дорівнювати швидкості потоку рідини.

Система диференціальних рівнянь руху ідеальної рідини, яка описує коливання її у насадку камери пульсації (рис.2.9) має вигляд:

$$\begin{cases} A_M dS_M = A_H dS_H; \\ m\ddot{x} + k\dot{x} + cx = F, \end{cases} \quad (2.7)$$

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_H – площа насадка;

S_M – площа мембрани;

P_{\max} – максимальний тиск у камері пульсації, який залежить від частоти коливань;

C – жорсткість пружної мембрани;

k – демпфіруюча здатність.

Демпфіруючу здатність k рідини знайдемо за формулою [111]:

$$k = \frac{8 \cdot \pi \cdot D_M^4}{d_H^2} \mu \cdot l = 0,0113, \quad (2.8)$$

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 (2.7) поділивши його ліву та праву частину на C та провівши заміни.

$$\frac{m}{c} \ddot{x} + 2\xi \frac{k}{c} \dot{x} + x = \frac{F}{c}. \quad (2.9)$$

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

Друге рівняння системи (2.7), після перетворень за Лапласом має наступний вигляд в операторній формі:

$$T_2^2 p^2 X_{вих}''(p) + 2 \cdot \xi \cdot T_1 p X_{вих}'(p) + X_{вих}(p) = k_1 X_{вх}(p). \quad (2.10)$$

Передаточна функція для рівняння (2.10) має наступний вигляд:

$$W_{(p)} = \frac{X_{вих}(p)}{X_{вх}(p)} = \frac{k_1}{T_2^2 p^2 + 2 \cdot \xi \cdot T_1 p + 1}. \quad (2.11)$$

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

$$W_{(j\omega)} = \frac{k[(1 - T_2^2 \omega^2) - jT_1 \omega]^2}{(1 - T_2^2 \omega^2)^2 + (2 \cdot \xi \cdot T_1 \omega)^2}. \quad (2.12)$$

Амплітудно-частотна характеристика з рівняння (2.12) визначається наступним чином:

$$A(\omega) = \frac{k_1}{\sqrt{(1 - T_2^2 \omega^2)^2 + (2 \cdot \xi \cdot T_1 \omega)^2}}. \quad (2.13)$$

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 $C = 0,6 \text{ МПа}$ [110];

$$k = 0,0113 \text{ Па} \cdot \text{с};$$

$$F = 0,0785 \cdot P_{\max}(\omega);$$

$\xi = 0,5$ – коефіцієнт, який враховує звуження потоку рідини при перетіканні її з камери пульсації до насадка;

$$\frac{m}{c} = T_2^2 = \frac{0,01}{0,6} = 0,0166;$$

$$\frac{k}{c} = T_1 = \frac{0,0113}{0,6} = 0,0189;$$

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

Застосувавши дослідну установку (рис.3.6), датчик тиску МРМ489 та USB осцилограф ВМ8020, який з'єднано з персональним комп'ютером через порт USB и 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. 2.10 і враховані при розрахунку максимального тиску за формулою 2.13

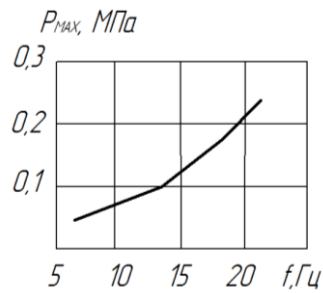


Рис.2.10 – Залежність максимального тиску у камері пульсації діаметром 100 мм від частоти коливань приводу вібраційної машини при амплітуді 2 мм

У результаті проведених розрахунків отримано амплітудно-частотну характеристика руху рідини у насадку вібраційної машини, яка показана на рис.2.11.

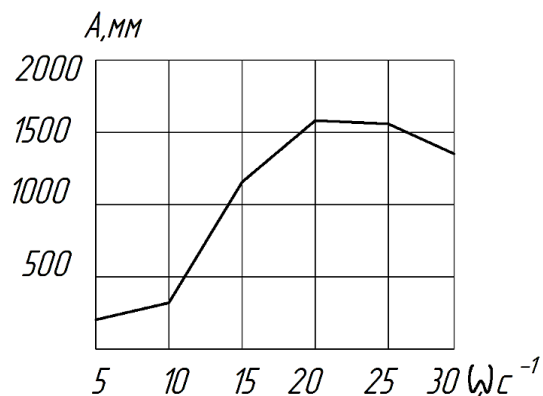


Рис.2.11 – Амплітудно-частотна характеристика руху рідини у насадку камери пульсації вібраційної машини

Знаючи величину амплітуди коливання струменя у насадку при ході мембрани уверх (стиснення рідини у камері пульсації) можна розрахувати максимальний динамічний тиск рідини струменя на виході з насадка за формулою [111]:

$$V_{max} = \mu \sqrt{2gH}, \quad (2.14)$$

де φ – коефіцієнт швидкості, $\varphi = 0,97$;

g – прискорення сили тяжіння;

H – геометричний натиск рідини, $H = A$.

Далі з отриманої амплітудно-частотної характеристики (рис.2.11), яка визначає кінематичні параметри руху робочого тіла, можна розрахувати зміну максимального динамічного тиску рідини струменя на виході з насадка за формулою [111]:

$$\Delta P = \frac{\rho \cdot V_{\max}^2}{2} - \rho \cdot g \cdot h, \quad (2.15)$$

де φ – коефіцієнт швидкості, $\varphi = 0,97$;

V_{\max} – швидкість рідини, $V_{\max} = A \cdot \omega$ з рис 2.11.

Результати розрахунків зміни тиску представлено на графіку рис.2.12.

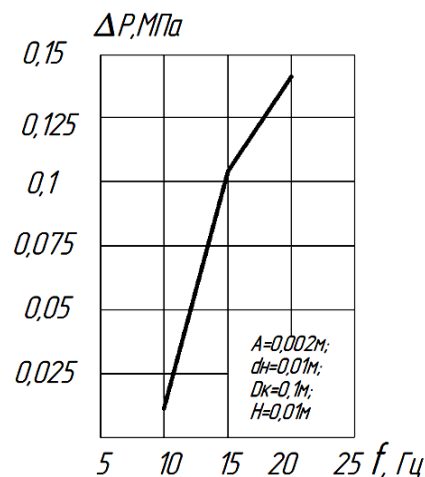


Рис.2.12 – Графік зміни максимального тиску рідини пульсуючого зануреного струменя на виході з насадка від частоти коливання приводу

Проведемо графічний порівняльний аналіз зміни максимального пульсуючого тиску пульсуючого зануреного струменя від частоти коливань мембрани за різними моделями та представимо їх графіком 2.13.

У результаті порівняльного аналізу виявлено розбіжність результатів по різних моделях, тому надалі необхідно провести експериментальні дослідження по визначенню фактичного максимального тиску пульсуючого струменя.

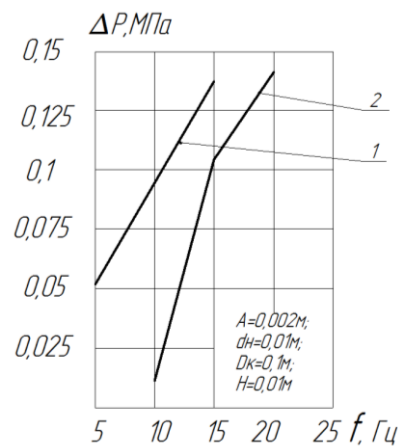


Рис.2.13 – Порівняльні графіки динамічного тиску рідини струменя на виході з насадки за різними моделями 1 – за теорією гідроудару; 2 – за моделлю руху рідини у насадку вібраційної машини [109]

2.6. Побудова аналітичної моделі роботи сопла-ежектора з обґрунтуванням його конструктивних параметрів та визначення кількості твердих частинок за цикл у робочому органі вібраційної машини

Для опису проходження рідини та твердих частинок крізь сопло-ежектор застосуємо принцип нерозривності потоку який базується на постійності масових витоків рідини та твердих часток на початку та виходу з сопла. Умови записуються у наступному вигляді [112]:

$$\rho \cdot (1 - C) \cdot V \cdot S = Q,$$

$$\rho_c \cdot C \cdot V_c \cdot S = Q_c, \quad (2.16)$$

де ρ – щільність рідини;

C – об'ємна концентрація твердих частинок у рідини;

V – середня швидкість потоку;

S – площа поперечного сечення сопла;

Q – масова витрата рідини;

ρ_c – щільність твердих часток;

V_c – середня швидкість твердих часток;

Q_u – масова витрата твердих часток;

У якості рівняння руху суміші рідини та твердих частинок використаємо рівняння Бернуллі:

$$(1 - C_2) \cdot \rho \cdot V^2 / 2 + C_2 \rho_c \cdot V^2 / 2 + P + \rho_c \cdot g \cdot z + \rho_c \cdot g \cdot H \cdot h = const, \quad (2.17)$$

$$C_2 = \frac{\rho_u \cdot Q_u}{\rho_c \cdot Q_c},$$

$$\rho_c = \rho \cdot (1 - C_{o.k.u}) + \rho_u \cdot C_{o.k.u},$$

$$C_{o.k.u} = \frac{Q_u}{Q_c},$$

де C_2 – співвідношення масової витрати твердих частинок до масових витрат суміші;

Q_u – об'ємні витрати твердих частинок;

Q_c – об'ємні витрати суміші;

$C_{o.k.u}$ – об'ємна витратна концентрація твердих частинок;

ρ_c – витратна щільність суміші;

P – тиск у суміші;

h – втрата напору на опір;

z – розмір довжини сопла;

g – прискорення вільного падіння.

Втрати тиску у соплі для висхідного потоку суміші визначаємо за залежностями:

$$\Delta P = \rho \cdot g \cdot h + \rho \cdot g \cdot L, \quad (2.18)$$

де $h = \frac{4 \tau \cdot H_2}{\rho \cdot g \cdot D_c}$ – п'єзометричний натиск;

$\tau = \frac{\lambda}{4} \cdot \frac{\rho_{e.u.c} V_c^2}{2}$ – дотичні напруження на стінці сопла;

$$\rho_{e.ш.с} = \rho \frac{(1 - C_{o.к.ч})^3}{(1 - C_2)^2} + \rho_ч \frac{C_{o.к.ч}^3}{C_2^2}, \quad - \text{ефективна щільність суміші};$$

D_c – діаметр сопла;

H_2 – довжина сопла;

L – глибина занурення насадка.

Позначення величин приведені на рис.2.14.

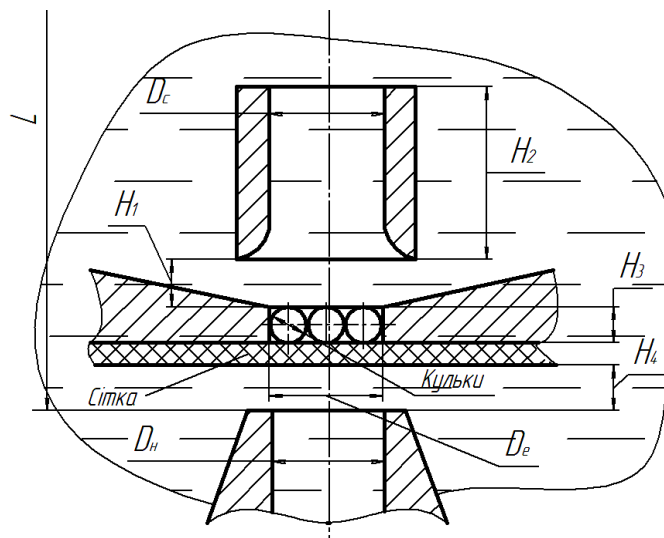


Рис.2.14 – Конструктивна схема сопла з ежектором для створення двофазного потоку рідини затопленого струменя з твердими частинками:

H_1 – відстань від сопла до ежектора; H_2 – довжина сопла; H_3 – висота ежектора; H_4 – відстань від зрізу насадка до сітки; D_e – діаметр ежектора; D_c – діаметр сопла; D_n – діаметр насадка; L – глибина занурення насадка

Для аналізу визначення максимальної кількості кульок у пульсуючому струмені приймаємо діаметр насадка 10 мм та діаметр сопла 10 мм. Довжина сопла $H_2 = 15$ мм. Проведемо розрахунок кількості кульок в пульсуючому струмені за один цикл коливання, які теоретично мають змогу розміститися в ежекторі за схемою з центральною кулькою рис. 2 15.

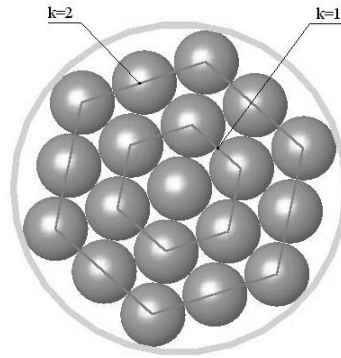


Рис.2.15 – Схема укладки кульок з центральною кулькою та розташуванням кульок у шестикутники

Для схеми укладки кульок (рис.2.15) в ежекторі, коли конфігурація заповнення шару може бути з центральною кулькою та розташуванням кульок у шестикутники, кількість кульок шару можна знайти залежно від номера k -го шестикутника.

$$n_k = 3k^2 + 3k + 1 = 3 \cdot 4 + 6 + 1 = 19. \quad (2.19)$$

Діаметр ежектора визначається залежністю:

$$D_c = d(2\sqrt{k^2 - k + 1} + 1) = 2(2\sqrt{4 - 2 + 1} + 1) = 8,9 \text{ мм}. \quad (2.20)$$

Звідси коефіцієнт заповнення шару:

$$K = \frac{3k^2 + 3k + 1}{(2\sqrt{k^2 - k + 1} + 1)^2} = \frac{19}{19,9} = 0,954. \quad (2.21)$$

Проведемо конструктивне обґрунтування параметрів сопла з ежектором та розрахуємо втрати тиску у соплі для висхідного потоку суміші у вібраційній машині за формулою 2.16.

Для прикладу приймемо наступні параметри сопла ежектора з рис.2.14: діаметр твердої частинки 2 мм; діаметр сопла $D_c = 10$ мм; діаметр ежектора $D_e = 10$ мм; довжина сопла $H_2 = 15$ мм; діаметр насадка $D_{н}$; відстань від сопла до ежектора $H_1 = 3$ мм; H_3 – висота ежектора $H_3 = 2,5$ мм з метою, що укладка

частинок буде в один шар; H_4 – відстань від зрізу насадка до сітки $H_4 = 2$ мм з метою, щоб рідина втягувалася з ванни; амплітуда коливань мембрани 2 мм; діаметр камери $D_k = 100$ мм; частота коливань $f = 10$ Гц.

Об'єм кульки:

$$V_k = \frac{\pi D^3}{6} = \frac{3,14 \cdot 2^3}{6} = 4,1 \text{ мм}^3.$$

Об'ємні витрати суміші за цикл коливання у соплі:

$$Q_c = \pi \cdot R^2 \cdot H_2 = 3,14 \cdot 10^2 \cdot 15 = 4710 \text{ мм}^3.$$

Об'ємна витратна концентрація твердих частинок:

$$C_{o.k.ч} = \frac{Q_u}{Q_c} = \frac{19 \cdot 4,1}{4710} = 0,02.$$

Співвідношення масової витрати твердих частинок до масових витрат суміші:

$$C_2 = \frac{\rho_u \cdot Q_u}{\rho_c \cdot Q_c} = \frac{7,9 \cdot 19 \cdot 4,1}{1 \cdot 4710} = 0,13.$$

Ефективна щільність суміші:

$$\rho_{e.ш.с} = \rho \frac{(1 - C_{o.k.ч})^3}{(1 - C_2)^2} + \rho_u \frac{C_{o.k.ч}^3}{C_2^2} = 1 \frac{(1 - 0,02)^3}{(1 - 0,13)^2} + 7,9 \frac{0,02^3}{0,13^2} = 0,0067.$$

Дотичні напруження на стінці сопла:

$$\tau = \frac{\lambda}{4} \cdot \frac{\rho_{e.ш.с} V_c^2}{2} = \frac{0,1}{4} \cdot \frac{0,0067 \cdot 100}{2} = 0,36.$$

Максимальна швидкість суміші з насадка камери пульсації вібраційної машини:

$$V_{\max} = \frac{\xi \cdot D_k^2 \cdot A_k \cdot f}{D_H^2} = \frac{0,5 \cdot 100^2 \cdot 2 \cdot 10}{10^2} = 10 \text{ м/с}.$$

П'єзометричний натиск:

$$h = \frac{4 \cdot \tau \cdot H_2}{\rho \cdot g \cdot D_c} = \frac{4 \cdot 0,36 \cdot 0,015}{1 \cdot 9,8 \cdot 0,01} = 0,22 \text{ Па.}$$

Втрати тиску у соплі вібраційної машини для висхідного потоку суміші визначаємо за формулою:

$$\Delta P = \rho \cdot g \cdot h + \rho \cdot g \cdot L = 1 \cdot 9,8 \cdot 0,22 + 1 \cdot 9,8 \cdot 0,4 = 6,1 \text{ Па.}$$

У результаті проведених розрахунків встановлено, що втрати тиску у соплі вібраційної машини мають невеликі значення в порівнянні з тиском струменя на виході з насадка, тому у подальших розрахунках їх можна не враховувати.

2.7. Визначення кінематичних параметрів пульсуючого зануреного струменя з твердими частинками, що направлено з сопла-ежектора на забруднену поверхню

Проведемо визначення зміни максимальної швидкості частинок у пульсуючому струмені з насадка за відомою схемою витікання зануреного струменя рідини з отвору у рідину [111,113].

Для запропонованої схеми рис.2.16 з урахуванням, що пульсуючий потік рідини з частинками з сопла-ежектора утворюється коливаннями вібраційного приводу рідини у камері пульсації з насадком, швидкість руху рідини V_0 затопленого пульсуючого струменя на початковій ділянці від зрізу насадка визначається за формулою:

$$V_0 = A_n \cdot f, \quad (2.22)$$

де A_n – амплітуда коливань рідини у насадку;

f – частота коливань рідини у камері пульсації.

З урахуванням нерозривності потоку рідини у насадку $A_k \cdot S_k = A_n \cdot S_n$ швидкість рідини на виході з насадки, V_0 запишемо наступну залежність [108]:

$$V_0 = \frac{\varepsilon \cdot D_k^2 \cdot A_k \cdot f}{d_n^2}, \quad (2.23)$$

де ε – коефіцієнт звуження потоку у насадку;

D_k – діаметр камери пульсації;

d_n – діаметр насадки.

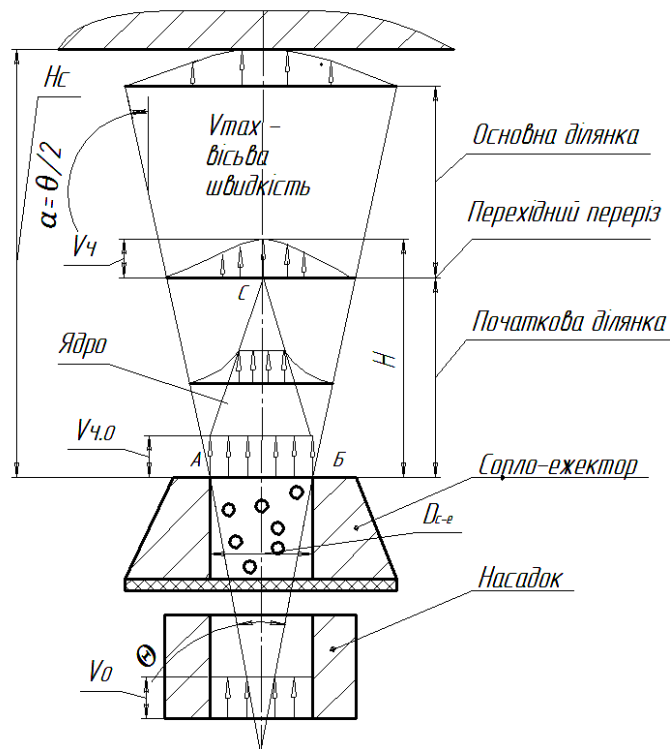


Рис.2.16 – Схема руху рідини зануреного струменя, що витікає з сопла-ежектора з твердими частинками: А-Б – ділянка зрізу сопла-ежектора;

$D_{c-е}$ – діаметр сопла-ежектора; D_n – діаметр насадки; H_c – відстань струменя від зрізу сопла до поверхні, що очищується

Зробивши припущення, що швидкість потоку рідини та твердих частинок однакова та незмінна при проходженні сопла-ежектора та врахувавши гасіння швидкості струменю з насадка при проходженні сітки коефіцієнтом $K_c = 0,9$ отримаємо наступну залежність [108]:

$$V_{u,0} = \frac{\varepsilon \cdot k_c \cdot D_k^2 \cdot A_k \cdot f}{d_n^2}, \quad (2.24)$$

Визначимо зміну швидкості рідини із збільшенням відстані від зрізу сопла-ежектора до поверхні, що промивається або очищається. На відрізьку H_c величина швидкості струменя з сопла-ежектора змінюється за залежністю Абрамовича:

$$V_u = \frac{0,645 \cdot V_{u,0}}{1 + \frac{2H_c}{D_c} \operatorname{tg} \alpha}, \quad (2.25)$$

де $V_{u,0}$ – початкова швидкість потоку рідини та частинок з сопла;

D_c – діаметр сопла;

H_c – відстань струменя від зрізу сопла до поверхні, що очищується;

α – кут одностороннього розширення струменю з сопла, $\alpha = 12^\circ 40'$.

З урахуванням залежності (2.25) отримаємо [108]:

$$V_u = \frac{0,645 \cdot \frac{k_c \cdot \varepsilon \cdot D_k^2 \cdot A \cdot f}{d_n^2}}{1 + \frac{2H_c}{D_c} \operatorname{tg} \alpha}. \quad (2.26)$$

Таким чином, з аналізу залежності (2.26) швидкість частинок у пульсуючому струмені з насадка залежить від амплітуди та частоти коливань приводу і конструктивних параметрів робочого органу: діаметру камери, діаметру насадка, діаметра сопла, відстані до поверхні, що очищується або промивається [109].

2.8. Вплив параметрів вібраційної машини на продуктивність очистки пульсуючим струменем рідини з твердими частинками та побудова аналітичної залежності для визначення продуктивності очистки

Розглянемо процес зняття забруднення з поверхні деталі та проаналізуємо вплив різних фізичних параметрів на його продуктивність. Виходячи з результатів досліджень автора [64,114,115] 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:

$$G_{\Sigma} = \frac{\pi \cdot k \cdot k_V \cdot \alpha \cdot Q \cdot \rho_1 \cdot \rho_2 \cdot D \cdot V_u^3 \cdot L^2 \cdot \operatorname{tg}^2 \beta (1 - k_2) \cdot t}{2 \cdot H_{\text{тв.м.}}}, \quad (2.27)$$

де k – коефіцієнт, який характеризує вид зношування;

$k_V = 0,121$ – безрозмірний коефіцієнт;

K_c – коефіцієнт гасіння швидкості струменю при проходженні сітки;

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;

V_u – швидкість удару частинки по поверхні;

L – відстань від сопла струменю до поверхні, що оброблюється;

$H_{\text{тв.м.}}$ – динамічна твердість матеріалу за Майєром;

β – кут, нахилу зовнішніх границь струменю до її осі;

t – час оброблення.

Автор [115], виходячи з аналізу залежності (2.27), наводить розрахункову залежність масової продуктивності процесу зрізання матеріалу G частинками з урахуванням підвищення ефективності за рахунок збільшення кінетичної

енергії частинки та зменшенням умовного напруження різання і в залежності відстані від сопла струменя до поверхні, що оброблюється.

$$G = \frac{k_0 \cdot m \cdot V_q^3}{4 \cdot \sigma \cdot H}, \quad (2.28)$$

де k_0 – кількість абразивних зерен;

m – маса частинки;

V_q – швидкість удару частинки по поверхні;

σ – умовне напруження різання матеріалу (енергоємність оброблення) [115];

H – відстань від сопла струменю до поверхні, що оброблюється.

Для вібраційної машини очистки та миття забруднень з урахуванням, що швидкість частинки дорівнює швидкості струменя, можна записати вираз для розрахунку масової продуктивності однієї частинки в залежності від різних параметрів та з урахуванням частоти і амплітуди коливання приводу у наступному вигляді [116] :

$$G_\Sigma = \frac{k_0 \cdot m_q \cdot (2A_n f)^3}{4 \cdot \sigma \cdot H}. \quad (2.29)$$

З аналізу залежностей (2.28) та (2.29) 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.

Основним фактором, який впливає на продуктивність процесу є швидкість частинки, яка має у формулах (2.28) та (2.29) третю ступінь і невелика її зміна призводить до значного підвищення продуктивності.

Введемо у ф.2.29 замість умовного напруження різання матеріалу σ , яке автор [116] не пояснює чому воно дорівнює, модуль зсуву μ .

Враховуючи зміну початкової величини швидкості та частинок при виході потоку рідини з сопла від відстані до поверхні, що очищується, можна записати наступну залежність для визначення масової продуктивності вібраційної машини з урахуванням конструктивних параметрів та режимів роботи приводу вібраційної машини [117-118]:

$$G_{\Sigma} = \frac{k_0 \cdot m \cdot \left(0,645 \frac{k_c \cdot \varepsilon \cdot D_k^2 \cdot A \cdot f}{d_n^2} / 1 + \frac{2 \cdot H}{D_c} \operatorname{tg} \alpha \right)^3}{4 \cdot 10^6 \cdot \mu \cdot H} t, \quad (2.30)$$

де k_0 – кількість абразивних зерен, які приймають участь в процесі обробки;

k_c – коефіцієнт гасіння швидкості струменю при проходженні сітки;

m – маса частинки;

H – відстань від сопла струменю до поверхні, що оброблюється.

ε – коефіцієнт звуження потоку у насадку;

A – амплітуда коливань рідини у камері пульсації;

f – частота коливань рідини у камері пульсації;

D_k – діаметр камери пульсації

D_c – діаметр сопла;

d_n – діаметр насадка;

α – кут одностороннього розширення струменю з сопла

μ – модуль зсуву

t – час оброблення.

Проведемо розрахунки масової продуктивності процесу очищення забруднень пульсуючим струменем з твердими частинками за отриманою залежністю (2.30) з метою встановлення на неї впливу конструктивних параметрів та режимів роботи приводу вібраційної машини.

Як приклад, проведемо розрахунок очищення маси матеріалу забруднення при взаємодії однієї металевої кульки діаметром 2 мм від частоти та амплітуди коливань вібраційного приводу для забруднення з різним модулем зсуву μ . Розрахунок проводився при наступних параметрах: $k_0 = 1 \text{ ум}$. – кількість кульок, які приймають участь в процесі обробки; $k_c = 0,9$; $m = 0.00033$ кг. – маса кульки; $H = 30$ мм. – відстань від сопла струменю до поверхні, що оброблюється; $\varepsilon = 0,5$ – коефіцієнт звуження потоку у насадку; $D_k = 100$ мм – діаметр камери пульсації; $d_n = 10$ мм – діаметр насадка; $D_c = 10$ мм – діаметр сопла; α - кут одностороннього розширення струменю з сопла, $\alpha = 12^\circ 40'$.

Змінні параметри A 1,2,3 мм – амплітуда коливань рідини у камері пульсації; $f = 5, 10, 15, 20$, Гц – частота коливань рідини у камері пульсації; μ – модуль зсуву для матеріалу забруднення типу сирої гуми $\mu = 0,6 \text{ МПа}$, для матеріалу типу полімеризованих плівок $\mu = 2 \text{ МПа}$,

Після розрахунку у програмному продукті MathCad були побудовані графіки залежності масової продуктивності очистки забруднень від частоти та амплітуди коливань приводу вібраційної машини, які показані на рис.2.17 – 2.18., а приклад результатів розрахунку у продукті MathCad наведено у додатку С.

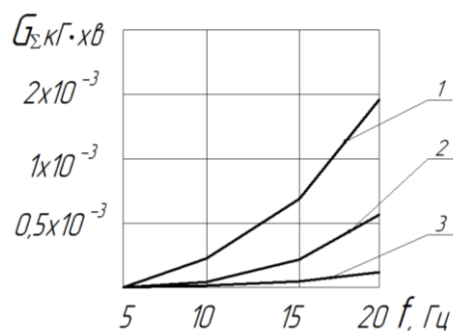


Рис.2.17 – Результати розрахунку масової продуктивності очистки полімеризованих забруднень струменем рідини з кульками у вібраційній машині за одну хвилину при зміні частоти та амплітуди коливань приводу:

1 – амплітуда коливань 3 мм; 2 – амплітуда коливань 2 мм; 3 – амплітуда коливань 1 мм; $\mu = 2 \text{ МПа}$

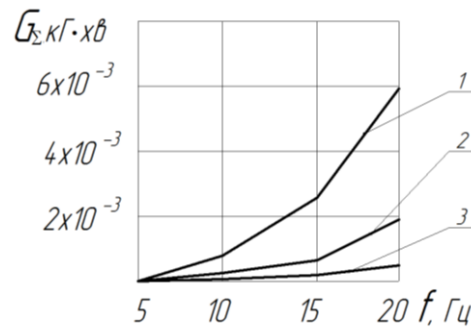


Рис.2.18 – Результати розрахунку масової продуктивності очистки в'язких забруднень струменем рідини з кульками у вібраційній машині за одну хвилину при зміні частоти та амплітуди коливань приводу: 1 – амплітуда коливань 3 мм; 2 – амплітуда коливань 2 мм; 3 – амплітуда коливань 1 мм;
 $\mu = 0,6 \text{ МПа}$

З отриманої залежності (2.29) 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).

2.9. Висновки до розділу 2

1. Визначено основні фізичні фактори, що діють на забруднення у процесі мийки пульсуючим зануреним струменем рідини з газовими пухирцями та основні фізичні фактори, що діють на забруднення у процесі очистки пульсуючим зануреним струменем рідини з твердими частинками.

2. Побудовано аналітичні моделі процесу зміни тиску пульсуючого струменя ідеальної рідини у камері пульсації вібраційної машини з урахуванням гідравлічного удару та на основі диференціальних рівнянь руху рідини крізь насадки з урахуванням нерозривності потоку в залежності від конструктивних параметрів від режимів роботи приводу.

3. Проведено аналіз аналітичних моделей, які описують зміну максимального тиску пульсуючого струменя у насадку робочого органу вібраційної машини для мийки та очистки від параметрів роботи її приводу та конструктивних залежностей. Результатом аналізу стали графічні залежності. Виявлено розбіжність результатів по різних моделях, тому необхідно провести експериментальні дослідження по визначенню фактичного максимального тиску пульсуючого струменя.

4. Проаналізовано аналітичну моделі роботи сопла-ежектора. У результаті проведеного аналізу розрахунків встановлено, що втрати тиску у соплі вібраційної машини мають невеликі значення, тому у подальших розрахунках їх можна не враховувати. Визначено вплив конструктивних параметрів та режимів роботи приводу на кінематичні характеристики пульсуючого зануреного струменя з твердими частинками, що направлено з сопла-ежектора на забруднену поверхню.

5. Запропоновано залежність визначення величини продуктивності процесу очистки поверхні пульсуючим струменем з твердими частинками з урахуванням параметрів вібраційної машини та побудовані графічні залежності продуктивності від параметрів процесу очистки у вібраційній машині.

РОЗДІЛ 3

ПРОГРАМА, МЕТОДИКА ТА УСТАНОВКИ ДЛЯ ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1. Програма проведення експериментальних досліджень

Згідно з метою роботи, поставленими завданнями та проведеними теоретичними дослідженнями, розроблена програма та методика експериментальних досліджень впливу конструктивних параметрів і режимів роботи приводу вібраційної машини для очистки забруднень потоком твердих частинок та мийки деталей згідно яких передбачається:

- спроектувати та виготовити експериментальний зразок запропонованої конструкції вібраційної машини і стенду для дослідження її основних конструктивних параметрів і динамічних характеристик;

- визначити конструктивні параметри та режими роботи приводу вібраційної машини для створення максимальної продуктивності процесу: діаметра камери пульсації, діаметра насадка та сопла ежектора, параметри зворотного клапана;

- провести багатofакторне експериментальне дослідження із виведенням рівняння регресії для визначення зміни миттєвого максимального тиску пульсуючого струменя із застосуванням зворотного клапана в залежності від конструктивних та кінематичних параметрів приводу: амплітуди та частоти коливань, співвідношення діаметра насадка до діаметра камери пульсації;

- провести порівняльні дослідження різних методів очищення та мийки зразків.

- провести експериментальні дослідження працездатності запропонованої вібраційної машини.

Експериментальні дослідження проводились на фізичній моделі дослідження - експериментальній установці рис.3.1. З метою проведення активних експериментів в установці була передбачена можливість зміни

конструктивних параметрів і режимів роботи приводу та об'єктивна кількісна реєстрація досліджуваних параметрів за допомогою датчиків.

Огляд технічної літератури та аналітичні дослідження дозволили встановити, що основними характеристиками зануреного пульсуючого струменя є максимальна швидкість руху або тиск пульсуючого струменя. Дані характеристики залежать в свою чергу від конструктивних параметрів вібраційної машини – співвідношенню діаметра камери пульсації до діаметру насадка, параметрів приводу - частоти та амплітуди коливань приводу [44].

3.2. Експериментальна установка для дослідження процесу очистки та мийки забруднень

Експериментальна вібраційна машина для очистки забруднень потоком твердих часток та мийки деталей (рис.3.1) [104,105] містить основу 1, на якій встановлено вібропривід 2 та електродвигун постійного струму 3. На стійках розміщено ванну 7.

На дні ванни 7 через різьбовий отвір закріплено корпус камери пульсації мембранного типу (рис.3.2) та нагвинчено насадок 4, а нижня частина корпусу камери пульсації закрита мембраною з дисками, яка закріплена до штока віброприводу 2. Порожнина камери пульсації може з'єднуватись із мембранним клапаном, який встановлюється у ванну 7.

У порожнину ванни 7 встановлено контейнер 6 з боковими сітками та сіткою, яка розташована над насадком 4, у контейнері 6 розміщено сопло. У контейнері 6 є можливість засипати тверді частки (полістиролові кульки) або металеві кульки. У ванну 7 заливається рідина, яку після спрацювання можна злити крізь кран.

На стійках встановлено гвинтовий механізм руху 8, який дозволяє переміщення датчика або зразка, який оброблюється, переміщати у горизонтальному або вертикальному напрямках.

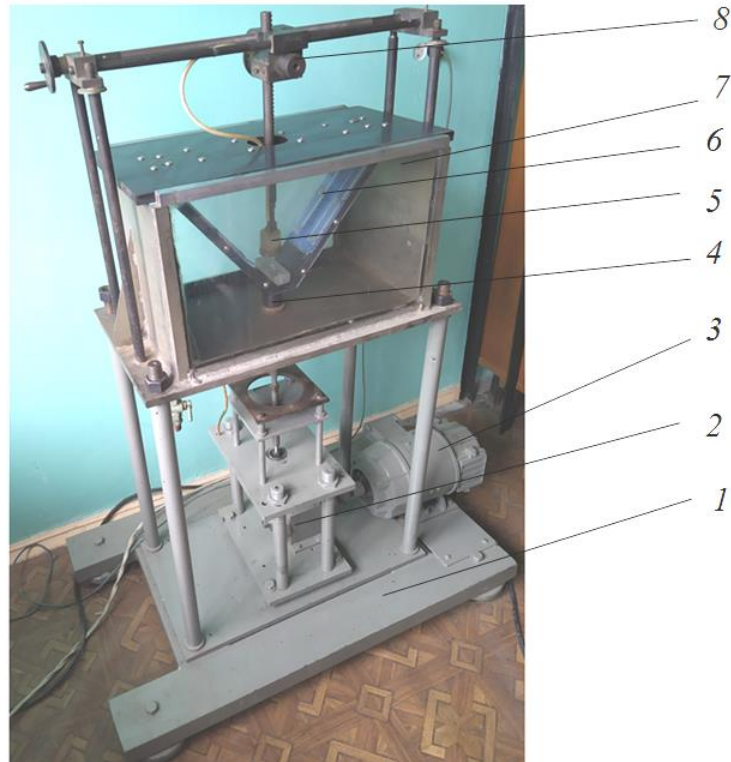


Рис.3.1 – Експериментальна вібраційна машина для очистки забруднень потоком твердих часток та мийки деталей: 1 – основа; 2 – вібропривід; 3 – електродвигун постійного струму; 4 – насадок; 5 – пристрій для утримання зразків; 6 – контейнер; 7 – ванна; 8 – механізм руху

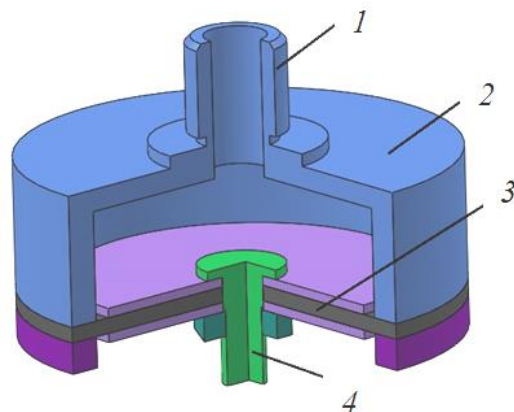


Рис.3.2 – 3-D модель камери пульсації вібраційної машини для очистки забруднень потоком твердих часток та мийки деталей: 1 – різьбовий фланець; 2 – корпус; 3 – мембрана з дисками; 4 – шток [117,118]

На штанзі механізму руху 8 закріплено пристрій для утримання зразків 5, що очищаються або промиваються. Електродвигун постійного струму 4П 11, $n = 1500$ об/хв. підключено до джерела енергії за допомогою трансформатора ЛАТР, що дає можливість змінювати частоту коливань віброприводу від 0 до 25 Гц. Амплітуда коливань змінюється за допомогою заміни га приводному валу ексцентрикових кілець з ексцентриситетом 1; 2; 3 мм.

Працює експериментальна вібраційна машина наступним чином: включається вібропривід 2 (рис.3.1), що призводить до коливання мембрани з дисками 3 (рис.3.2) і у насадку 4 виникає пульсуючий струмінь рідини, який проходить крізь сітку та захоплює тверді частки (полістиролову крихту або металеві кульки), вдаряє ними по забрудненню. При русі мембрани з дисками 3 (рис.3.2) униз м'яка рідина проходить крізь отвір у насадку 4 (рис.3.1), та забірну трубку і відкритий зворотний клапан. При русі мембрани з дисками 3 уверх здійснюється протікання м'якої рідини крізь насадок 4, а зворотний клапан закривається.

Для проведення експериментальних досліджень динамічних параметрів роботи вібраційного приводу та процесу очистки забруднень розроблено контейнер (рис.3.3) у якому встановлено сітку під ежекційним соплом 4 та дві сітки 3 на бокових похилих поверхнях контейнера. Торцеві стінки контейнера виконані прозорими, з метою візуалізації процесу очищення та руху твердих частинок.

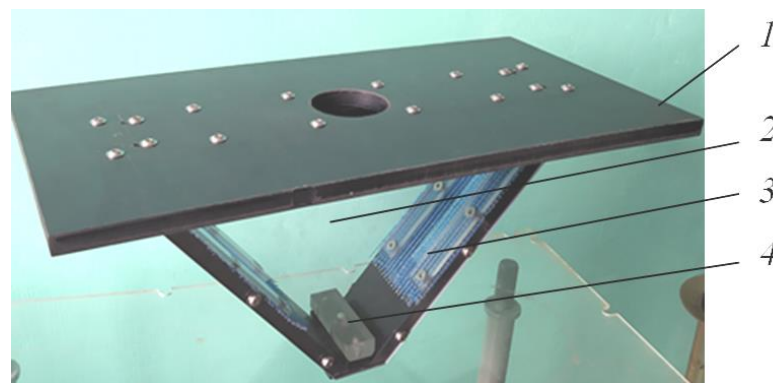


Рис.3.3 – Фотографія прозорого контейнера вібраційної машини для очистки забруднень модельних зразків потоком твердих часток: 1 – основа; 2 – прозора стінка; 3 – сітка; 4 – ежекційне сопло

Для проведення процесу очищення, з метою підвищення швидкості та максимального пульсуючого тиску струменя з насадка, запропоновано конструкцію мембранного клапана [109], який показано на рис.3.4.

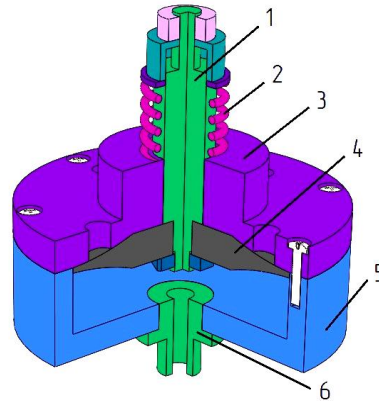


Рис.3.4 – Конструкція зворотного клапана для модуля очистки забруднень потоком твердих частинок: 1 – шток; 2 – пружина; 3 – кришка; 4 – гумовий пелюстковий клапан; 5 – корпус; 6 – штуцер

Застосування зворотного клапана (рис.3.4) дає можливість зменшити виникнення кавітаційних пухирців у камері пульсації та збільшити об'єм рідини, що викидається за цикл ходу мембрани з дисками уверх. На рис.3.5. схема з'єднання зворотного клапана 1 з камерою пульсації 5 та ванною.

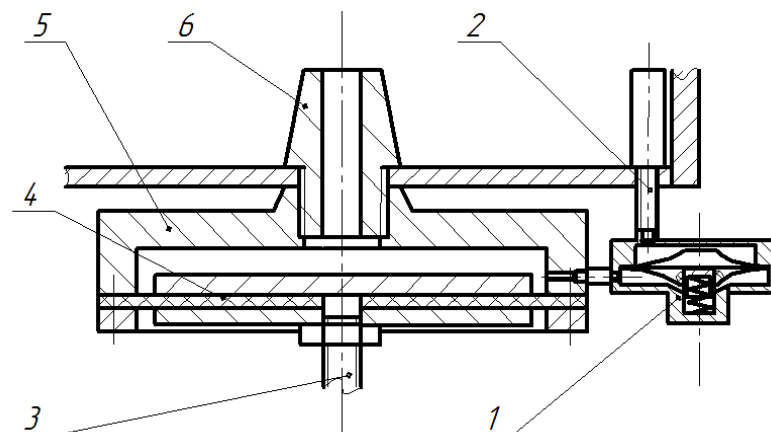


Рис.3.5 – Схема з'єднання зворотного клапана з камерою пульсації: 1 – зворотний клапан; 2 – трубопровід; 3 – шток вібраційного приводу; 4 – пружна мембрана з дисками; 5 – камера пульсації; 6 – насадок [109]

3.3. Експериментальна установка для дослідження зміни миттєвого тиску пульсуючого струменя від конструктивних параметрів та режимів роботи віброприводу

Як було встановлено з аналітичного огляду різних джерел (розділ 1), головним фактором отримання максимальної продуктивності процесу очистки та мийки є величина швидкості струменя і відповідно його максимальний тиск.

Для вимірювання параметрів пульсуючого струменя з насадка технічно зручно перейти від визначення величини швидкості пульсуючого струменя до вимірювання максимального тиску пульсуючого струменя на його початковій ділянці при виході із насадка.

Пульсуючий струмінь рідини з насадка утворюється завдяки коливанням вібраційного приводу машини, тому максимальна теоретична швидкість руху рідини у насадку визначається за залежністю:

$$V_{m.m} = A_n \cdot f, \quad (3.1)$$

де A_n – амплітуда коливань рідини у насадку;

f – частота коливань приводу.

З урахуванням зменшення швидкості у насадку за рахунок звуження потоку (місцевого опору) можна записати наступну залежність:

$$V_{m.m} = \varepsilon \cdot A_n \cdot f, \quad (3.2)$$

$V_{m.m}$ – максимальна теоретична швидкість струменя з урахуванням місцевих опорів;

ε – коефіцієнт місцевого опору;

Отримані значення, величини максимальної швидкості струменя, можна перерахувати у максимальний тиск рідини на виході з насадка на початковій ділянці з урахуванням гідростатичного тиску за формулою:

$$P_{\max} = \frac{\rho \cdot V_{m.m}^2}{2} - \rho \cdot g \cdot h, \quad (3.3)$$

де ρ – густина води, $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$.

h – глибина занурення насадка.

Пошук впливу конструктивних параметрів та режимів роботи приводу вібраційної машини на величину максимального тиску зануреного пульсуючого струменя проводився експериментально на установці (рис.3.6) за допомогою вимірювання датчиком максимального тиску 7.

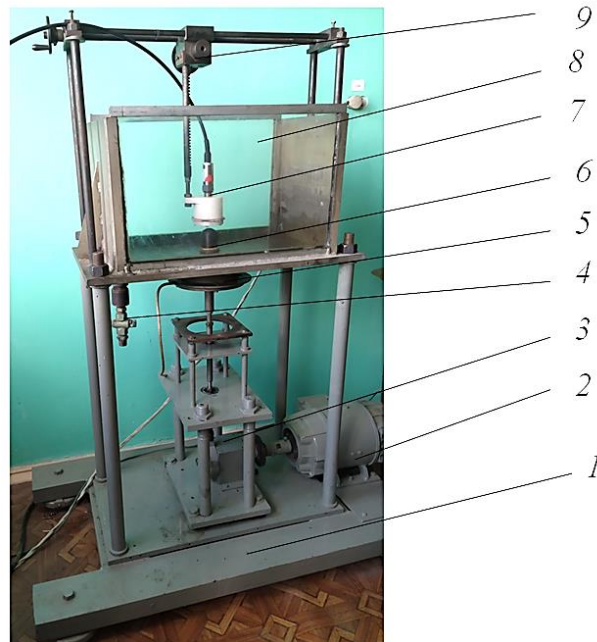


Рис.3.6 – Експериментальний стенд вібраційної машини: 1 – основа; 2 – електродвигун постійного струму; 3 – вібропривід; 4 – зливний кран; 5 – камера пульсації; 6 – насадок; 7 – датчик; 8 – ємність; 9 – механізм переміщення датчика

Максимальний тиск струменя з насадка визначався за цикл коливання приводу. На рис.3.7 показано схему експериментального стенду підключення датчика тиску для вимірювання миттєвого тиску пульсуючого струменя [109].

Для вимірювання миттєвого значення максимального гідродинамічного тиску пульсуючого струменя з отвору насадка застосовано тензометричний датчик тиску МРМ489 і USB осцилограф ВМ8020, який з'єднаний з персональним комп'ютером через порт USB і обслуговується програмним продуктом «DiSco» [119].

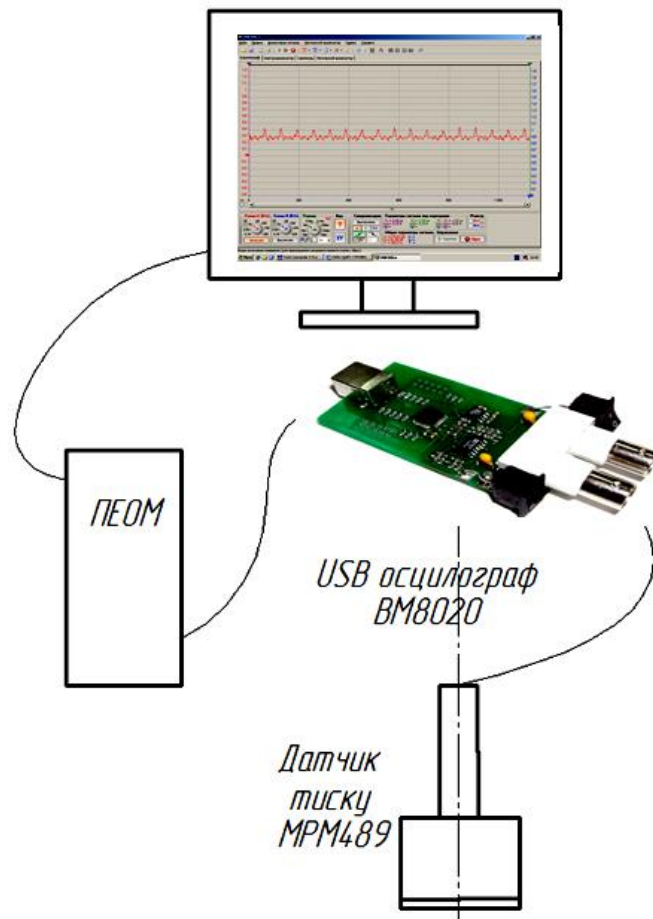


Рис.3.7 – Схема підключення датчика тиску для вимірювання миттєвого тиску пульсуючого струменя

Для вимірювання миттєвого пульсуючого тиску струменя застосовано, попередньо тарований, мембранний тензометричний датчик тиску МРМ489, який встановлено над насадком на відстані 20-30 мм у початковій ділянці затопленого пульсуючого струменя.

У п'єзорезистивному датчику тиску *1* (рис.3.8) мембрана виготовлена з сталі 316L, разом з електронікою перетворювача розташована в корпусі з нержавіючої сталі із різьбою. Модернізація датчику миттєвого тиску складала у встановленні його у корпус заповнений рідиною *2*, який закрито гумовою мембраною *3* та її закріплено до корпусу *2* кришкою *4* [109].

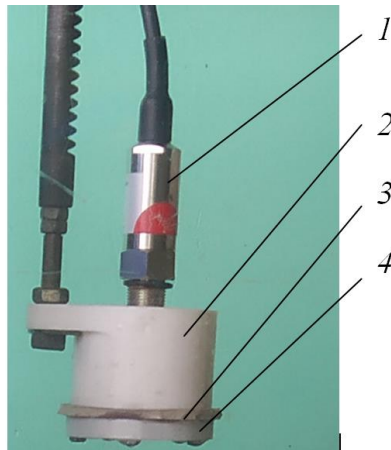


Рис.3.8 – Фотографія датчика тиску для вимірювання миттєвого тиску пульсуючого струменя: *1* – датчик МРМ489; *2* – корпус з рідиною; *3* – мембрана; *4* – кришка

Осцилограф ВМ8020, як перетворювач, автоматично тестує стан датчика МРМ489, компенсує температурний вплив навколишнього середовища в широкому діапазоні і видає стандартний вихідний сигнал.

Датчик тиску МРМ489 попередньо було проведено тарування за допомогою компресора стисненого повітря у герметичній камері та фіксацією результатів за допомогою електронного осцилографу.

Дослідження проводились наступним чином. При включенні електронного осцилографа, для виключення значення величини статичного тиску при запису осцилограми, «нульова» лінія вимірювання виводилася на середнє значення електронного «шуму» і тоді проводились дослідження зміни величини максимального тиску зануреного струменя від змінних параметрів. Вмикався привод вібраційної машини та виводився на певну частоту –

проводилась фіксація осцилограми кнопкою «Print Screen». Потім проводилась обробка отриманих значень згідно тарувального графіка і визначались величини реального максимального тиску пульсуючого зануреного струменя.

Дослідження проводились при наступних постійних та змінних параметрах: діаметр камери пульсації 100 мм; діаметр отвору змінювався: 6, 8, 10 мм; амплітуда коливань змінювалася: 1, 2, 3 мм; частота коливань змінювалася: 5, 10, 15, 20 Гц.

3.4. Методика проведення порівняльних досліджень різних способів очищення і мийки та визначення продуктивності зняття забруднень у вібраційній машині

Для проведення порівняльних досліджень різних способів очищення і мийки були зроблені пласкі зразки розміром 40x40 мм на які наносилось модельне забруднення.

Для отримання візуальної картини процесу взаємодії пульсуючого потоку рідини із забрудненням поверхні для процесу мийки було взято у якості модельних забруднень полірувальну пасту, яка слабо зв'язана з поверхнею а для процесу очистки потоком рідини із твердими частинками для очистки сильно зв'язаних з поверхнею забруднень, які імітують полімеризовані плівки, більш в'язкий забруднювач – пластилін. Вони наносилися рівним шаром на пласку поверхню зразка (рис.3.9).

Зразок закріплювався у тримачу за допомогою гвинта та розташовувався навпроти насадка або сопла на відстані 20-30 мм. Після включення віброприводу машини на певний час та проходження процесу мийки або очистки зразки знімалися та проводилося фотографування поверхні зразка. На рис.3.9 показана фотографія зразка з модельним забрудненням, який ще не підлягав очищенню [119,120].

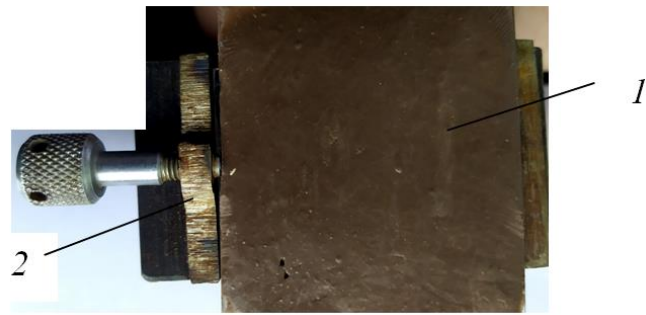


Рис.3.9 – Фотографія поверхні зразка у тримачу із модельним забрудненням:

1 – зразок із модельним забрудненням; *2* – гвинтовий тримач зразків

Для визначення продуктивності процесу мийки та очищення модельних забруднень застосовано масовий метод. Зразки оброблялись певний час, потім просушувались та проводилось зважування зразка на електронних терезах і визначалось відносне зменшення ваги зразка із забрудненням.

3.5. Методика досліджень та опис експериментального обладнання для відео-фіксації процесів у насадку камери пульсації вібраційної машини

З метою з'ясування, як впливають режими роботи приводу вібраційної машини на процеси руху рідини (вода при 20°C) при зворотно-поступальному руху крізь насадки та аналізу процесів, що утворюються у камері пульсації було розроблено прозорий макет насадка та камери пульсації, на якому можливо дослідити поведінку процесу створення пульсуючого струменя рідини та виникнення кавітаційних процесів при зміні режимів роботи приводу вібраційної машини.

Рух рідини крізь насадки фіксувався цифровою відеокамерою з подальшою обробкою і перетворенням інформації у комп'ютерний файл.

На рис.3.10 показана експериментальна установка для проведення швидкісної відео зйомки та фотографування картини руху рідини крізь насадки і процесів, що утворюються у камері пульсації при русі мембрани уверх та униз [118]. Попередніми дослідженнями встановлено, що на відповідних частотах

коливань у камері пульсації утворюється газова фаза та крізь насадок виходить пульсуючий струмінь рідини із газовими пухирцями.

Зйомка проводилась при наступних умовах: діаметр насадка 10 мм, відношення діаметра камери D до діаметра насадка d $D/d = 10$, амплітуда коливань $A = 2$ мм, частоту коливань f збільшували поступово від нуля до 25 Гц.

Отриманий відео файл вводився у персональний комп'ютер та за допомогою програмного продукту «Daum PotPlayer» проводився їх по кадровий аналіз за часом в залежності від зміни частоти коливань приводу вібраційної машини.

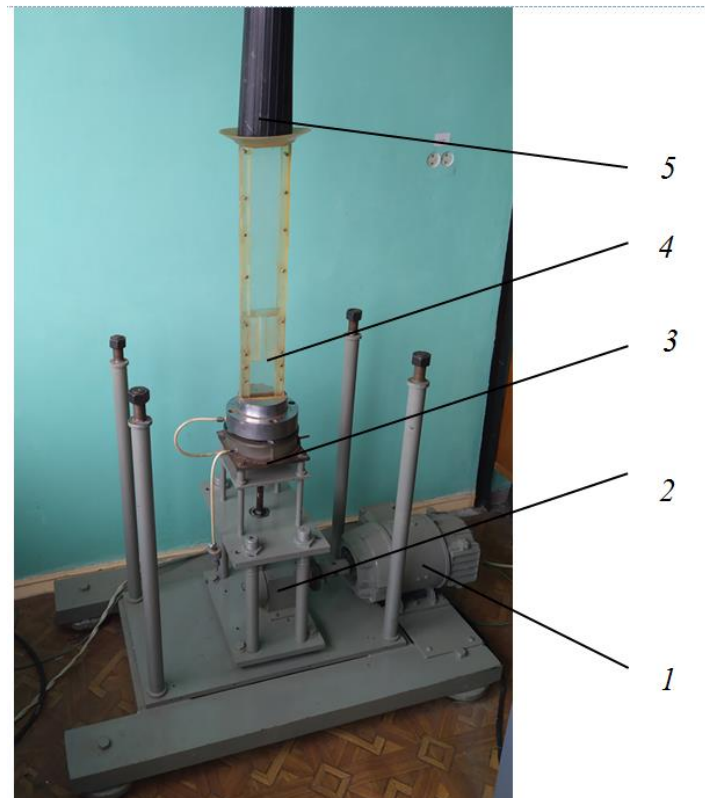


Рис. 3.10 – Установка для візуалізації процесу проходження рідини крізь насадок та процесів, що утворюються у камері пульсації: 1 – електродвигун постійного струму; 2 – ексцентриковий вібратор; 3 – камера пульсації; 4 – прозорий насадок; 5 – ємкість для згладжування коливань рідини

3.6. Методика проведення багатofакторного експерименту для визначення динамічних характеристик робочого органа для мийки від його конструктивних параметрів та режимів роботи приводу

В попередніх розділах було з'ясовано, що на продуктивність мийки впливає максимальна швидкість та максимальний тиск пульсуючого зануреного струменю рідини, який взаємодіє з забрудненням поверхні, який залежить від багатьох конструктивних параметрів вібраційної машини і режимів роботи її приводу та з урахуванням явища виникнення у камері пульсації кавітаційних пухирців.

Виходячи з цього, що на тиск струменя впливає багато факторів було запропоновано застосувати багатofакторний експеримент для визначення зміни величини максимального тиску зануреного пульсуючого струменя від конструктивних характеристик та режимів роботи робочого органа вібраційної машини для модуля мийки. Згідно математичного методу планування експерименту, перед початком дослідів було проведено пошукові експериментальні дослідження по вибору діапазону границь параметрів проведення дослідів. Завдяки використанню математичного апарату [121-124] формалізовано експериментальні дії, дослідження проведено з варіюванням визначених попередньо факторів, рівні факторів прийнято за спеціальними розрахунками, число дослідів зведено до мінімуму.

Планування і проведення багатofакторного експерименту складається з наступних етапів [121,122]: кодування факторів; складання плану - матриці експерименту; рандомізація дослідів; реалізація плану експерименту; оцінка значущості коефіцієнтів регресії; перевірка адекватності отриманої моделі.

Для встановлення зміни величини максимального пульсуючого тиску струменя з насадку визначено основні змінні фактори, які впливали на його величину:

x_1 – співвідношення діаметра камери пульсації до діаметра насадка (D_k / d_n);

x_2 – частота коливань вібраційного приводу;

x_3 – амплітуда коливань вібраційного приводу.

Проведено кодування факторів для переведення їх у безрозмірні величини для побудови плану-матриці експерименту. Оброблення отриманих результатів експериментальних даних проводили за загальновідомими методиками та методами кореляційного й регресійного аналізу експериментальних даних для отримання у кінцевому результаті емпіричних рівнянь регресії [117-118].

Проведені попередні одно факторні експерименти показали нелінійну залежність максимального пульсуючого тиску з насадка від частоти коливань приводу, завдяки виникненню кавітаційних пухирців у камері пульсації.

Тому для отримання регресійної моделі залежності максимального пульсуючого струменя рідини з насадка від параметрів коливального процесу, тобто: залежності максимального пульсуючого тиску з насадка від співвідношення діаметра камери пульсації до діаметра насадка D_k / d_n , частоти пульсацій вібраційного приводу f , та амплітуди пульсацій вібраційного приводу A , було вибрано відповідний умовний план експерименту – центральне композиційне рототабельне планування другого порядку.

Оскільки, під час проведення експериментів, змінні незалежні фактори неоднорідні та мають різний вплив на величину максимального пульсуючого тиску струменя, то їх приводили до єдиної системи обрахунків шляхом переходу від дійсних значень до кодованих.

Зв'язок між кодованими X_i та натуральними X_i змінними факторами встановлюється за залежністю [121,122]:

$$x_i = \frac{X_i - X_{i0}}{\Delta X_i}, \quad (3.4)$$

де X_{i0} – натуральне значення i -го фактору на нульовому рівні;

ΔX_i – інтервал варіювання i -го фактору.

Багатофакторний експеримент проведено на трьох рівнях варіювання факторами. Нульовий рівень або середнє значення кожного вхідного фактору, визначено за формулою:

$$X_{0i} = \frac{X_{i\max} + X_{i\min}}{2}, \quad (3.5)$$

де X_{0i} – числове значення нульового рівня вхідного фактору;

$X_{i\max}$ – числове значення верхнього рівня вхідного фактору;

$X_{i\min}$ – числове значення нижнього рівня вхідного фактору.

Інтервали варіювання факторами визначалися за залежністю:

$$\Delta X_i = \frac{X_{i\max} - X_{i\min}}{2}. \quad (3.6)$$

Для побудови план-матриці експериментів введено умовні позначення верхнього, нижнього та нульового рівнів варіювання факторів, відповідно +1, -1, 0.

Визначено основний (нульовий) рівень для кожного фактору:

- для співвідношення діаметра камери пульсації до діаметра насадка D_k / d_n ;

$$X_{01} = \frac{16+6}{2} = 11,$$

- для частоти коливань приводу;

$$X_{02} = \frac{20+6}{2} = 13(\Gamma u),$$

- для амплітуди коливань приводу:

$$X_{03} = \frac{3+1}{2} = 2(\text{мм}).$$

Інтервали варіювання та кодовані значення вибраних факторів відповідно дорівнюють:

$$\Delta X_1 = \frac{16-6}{2} = 5,$$

$$\Delta X_2 = \frac{20-13}{2} = 3,5(\Gamma u),$$

$$\Delta X_3 = \frac{3-1}{2} = 1(\text{мм}).$$

Попередній аналіз результатів досліджень (глава 2, рис. 2.12) показав, що залежність на максимальний тиск пульсуючого струменя рідини з насадка не можна описати лінійною моделлю, оскільки в поверхні відгуку переважають ефекти взаємодії факторів та їх квадратичні форми.

Щоб описати таку область необхідно використати плани другого порядку, в яких кожна змінна має варіюватися мінімум на трьох рівнях. У випадку для трьох факторів модель другого порядку можна записати наступною регресійною залежністю [121,124]:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{33}x_3^2. \quad (3.7)$$

де y – функція, що вивчається;

$b_0, b_1, b_2, b_3, b_{12}, b_{13}, b_{23}, b_{11}, b_{22}, b_{33}$ – вибіркові коефіцієнти рівняння регресії;

x_1, x_2, x_3 – незалежні змінні.

Вибіркові коефіцієнти рівняння регресії визначали за допомогою матриць планування та результатів експерименту. За допомогою цього плану можна отримати модель типу (3.7), яка з однаковою точністю передбачає значення параметра оптимізації в усіх точках факторного простору, що знаходяться на однаковій відстані від центру. Для визначення адекватної моделі залежності максимального тиску пульсуючого струменя від конструктивних параметрів та режимів роботи приводу був реалізований центральний композиційний ротатабельний план другого порядку при сукупності трьох факторів ($k = 3$).

Рівні та інтервали варіювання незалежних змінних, а також робоча матриця плану проведення експериментів наведена в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1

Фактори та рівні їх варіювання

Рівні варіювання досліджуваних факторів	Досліджувані фактори					
	співвідношення діаметра камери до діаметра насадка D_k/d_n		частота коливань приводу f , Гц		амплітуда коливань приводу A , мм	
	x_1	x_1	x_2	x_2	x_3	x_3
Зоряна точка $+a$		+1,682		+1,682		+1,682
Верхній рівень $X_{i\max}$	16	+1	20	+1	3	+1
Нульовий рівень X_{01}	10	0	13	0	2	0
Нижній рівень $X_{i\min}$	6	-1	6	-1	1	-1
Зоряна точка $-a$		-1,682		-1,682		-1,682
Інтервали варіювання ΔX_i	5	1	3,5	1	1	1

Моделювання незалежними змінними на трьох рівнях для отримання моделі другого порядку призводить до різкого збільшення загальної кількості експериментів, тобто збільшує витрати часу і матеріалів на дослідження.

Тому, щоб скоротити ці витрати, запропоновано композиційний план, який отримується за рахунок додавання до дослідів планів першого порядку типу $2k$ зіркових і нульових точок. Загальна кількість експериментів різко зменшується, оскільки:

$$N = n \cdot (n_{\text{я}} + n_a) + n_0, \quad (3.8)$$

де N – загальна кількість вимірювань;

n – кількість повторювань в одній серії експерименту;

$n_{\text{я}}$ – кількість дослідів в ядрі плану;

n_a – кількість зоряних точок;

n_0 – кількість нульових точок.

Для симетричного ротатбельного композиційного плану для трьох факторів варіювання маємо: $n_{\alpha} = 8$; $n_{\alpha} = 6$; $n_{\alpha} = 6$. Кількість повторювань в одній серії експериментів приймемо рівною двом, тоді $N = 34$. Зоряне плече $a = \pm 1,682$ [121,124].

Після обробки результатів дослідів було знайдено оцінку вільного члена b_0^I лінійної моделі та середнє значення експериментальних даних отриманих у центрі плану:

$$b_0^I = \frac{\sum_{u=1}^8 \bar{y}_u}{n_{\alpha}}; \quad \bar{y}_0 = \frac{\sum_{i=1}^{n_0} y_{0i}}{n_0}, \quad (3.9)$$

де y_u – середні експериментальні дані в u - му рядку;

y_0 – середнє значення експериментальних даних у центрі плану;

y_{0i} – значення експериментальних даних у центрі плану.

Дисперсія помилок спостереження визначена за результатами паралельних дослідів в центрі плану:

$$S_{n_0}^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n_0} (y_{0i} - \bar{y}_0)^2}{n_0 - 1}. \quad (3.10)$$

Число ступенів свободи дисперсії:

$$f_{n_0} = n_0 - 1. \quad (3.11)$$

При рівні значущості $\alpha = 0,05$ і $f_{n_0} = 5$ знаходимо табличне значення t_T критерію Стьюдента $t_T = 2,571$ [121,124].

Визначаємо значущість відмінності між завбаченим (b_0) і спостережуваним (y_0) значеннями функції відгуку в центрі плану, використовуючи залежність:

$$|\bar{y}_0 - b_0| \geq t_{TC} \cdot S_{n_0} \cdot \sqrt{\frac{(n_0 + n \cdot n_{\alpha})}{n_0 \cdot n_{\alpha}}}. \quad (3.12)$$

Якщо умова (3.9) виконується, відмінність вважається значущою. Це свідчить про істотний вплив на функцію відгуку ефектів при квадратичних

членах і про необхідність постановки додаткових дослідів, щоб дістати квадратичну модель. Оскільки при розгляді експериментів умова (3.12) виконувалась, в подальшому були розглянуті досліди в зоряних точках.

План експерименту та результати дослідів показано в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2.

План проведення експерименту

№	Матриця планування										y_{u1}	y_{u2}	y_u
	x_0	x_1	x_2	x_3	x^2_1	x^2_2	x^2_3	x_1x_2	x_1x_3	x_2x_3			
1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	y_{11}	y_{12}	y_1
2	+1	+1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	-1	+1	y_{21}	y_{22}	y_2
3	+1	-1	+1	-1	+1	+1	+1	-1	+1	-1	y_{31}	y_{32}	y_3
4	+1	+1	+1	-1	+1	+1	+1	+1	-1	-1	y_{41}	y_{42}	y_4
5	+1	-1	-1	+1	+1	+1	+1	+1	-1	-1	y_{51}	y_{52}	y_5
6	+1	+1	-1	+1	+1	+1	+1	-1	+1	-1	y_{61}	y_{62}	y_6
7	+1	-1	+1	+1	+1	+1	+1	-1	-1	+1	y_{71}	y_{72}	y_7
8	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	y_{81}	y_{82}	y_8
9	+1	+1,682	0	0	2,828	0	0	0	0	0	y_{91}	y_{92}	y_9
10	+1	-1,682	0	0	2,828	0	0	0	0	0	y_{101}	y_{102}	y_{10}
11	+1	0	+1,682	0	0	2,828	0	0	0	0	y_{111}	y_{112}	y_{11}
12	+1	0	-1,682	0	0	2,828	0	0	0	0	y_{121}	y_{122}	y_{12}
13	+1	0	0	+1,682	0	0	2,828	0	0	0	y_{131}	y_{132}	y_{13}
14	+1	0	0	-1,682	0	0	2,828	0	0	0	y_{141}	y_{142}	y_{14}
15	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	y_{151}	y_{152}	y_{15}
16	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	y_{161}	y_{162}	y_{16}
17	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	y_{171}	y_{172}	y_{17}
18	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	y_{181}	y_{182}	y_{18}
19	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	y_{191}	y_{192}	y_{19}
20	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	y_{201}	y_{202}	y_{20}

Коефіцієнти моделі другого порядку (3.4) визначаються за формулами [121,124]:

$$\begin{aligned}
 b_0 &= 0,166338 \sum_{u=1}^n y_u - 0,056791 \sum_{u=1}^n \sum_{i=1}^k x_{iu}^2 \cdot y_u; \\
 b_i &= 0,073224 \sum_{u=1}^n x_{iu} \cdot y_u; \\
 b_{ij} &= 0,1250 \sum_{u=1}^n x_{iu} \cdot x_{ju} \cdot y_u; \\
 b_{ii} &= 0,0625 \sum_{u=1}^n x_{iu}^2 \cdot y_u + 0,006889 \sum_{i=1}^k \sum_{u=1}^n x_{iu}^2 \cdot y_u - 0,056791 \sum_{u=1}^n y_u.
 \end{aligned} \tag{3.13}$$

де x_{iu} – значення кодової змінної у відповідному стовпці плану експерименту;

y_u – середній результат u -го досліду;

u – порядковий номер досліду;

i – номер фактору;

j, k – номер фактору, відмінного від i -го;

N – кількість серій дослідів.

Щоб перевірити значущість коефіцієнтів, визначаємо їх дисперсії за формулами:

$$\begin{aligned}
 S_{b_0}^2 &= a_8 \cdot S_n^2; & S_{b_i}^2 &= a_9 \cdot S_n^2; \\
 S_{b_y}^2 &= a_{10} \cdot S_n^2; & S_{b_u}^2 &= a_{11} \cdot S_n^2,
 \end{aligned} \tag{3.14}$$

де S_n^2 – дисперсія помилки досліду;

a_8, a_9, a_{10}, a_{11} , – допоміжні константи, наведені у літературі [121,124].

Дисперсію помилки досліду визначаємо за формулою:

$$S_n^2 = \frac{\sum_{u=1}^{N-n_0+1} S_u^2}{N-n_0+1}, \tag{3.15}$$

де s_u^2 – дисперсія помилки у рядках плану.

Дисперсію помилки у рядках плану знаходимо за формулою:

$$s_u^2 = \frac{\sum_{i=1}^u (y_{ui} - \bar{y}_u)^2}{n - 1}, \quad (3.16)$$

де y_{ui} – паралельний результат u -го дослідження.

Також визначаємо надійні інтервали коефіцієнтів за залежностями:

$$\Delta b_0 = t_T \cdot S_{b_0}; \quad \Delta b_i = t_T \cdot S_{b_i}; \quad \Delta b_y = t_T \cdot S_{b_y}; \quad \Delta b_u = t_T \cdot S_{b_u},$$

де t_T – значення t -критерію Стюдента, яке вибирається при заданому рівні значущості α і числі ступенів свободи f_n .

Якщо виконується умова $|b_i| \geq \Delta b_i$, то коефіцієнти регресії вважаються значущими, тобто їх вплив на функцію відгуку перевищує похибки вимірювання [121,124].

Гіпотезу про адекватність отриманої математичної моделі було перевірено за допомогою критерію Фішера [121,124]:

$$F = \frac{S_n^2}{S_n^2}, \quad (3.17)$$

де S_n^2 – дисперсія адекватності.

Дисперсію адекватності визначали за формулою:

$$S_n^2 = \frac{\sum_{u=1}^{N-n_0+1} n \cdot (\bar{y}_u - y_u)^2}{N - k' - (n_0 - 1)}, \quad (3.18)$$

де y_u – значення функції в u -му рядку, обчислене за знайденою математичною моделлю;

k – кількість значущих коефіцієнтів рівняння регресії.

Якщо отриманий критерій Фішера менше табличного $F < F_T$, вибраного при знайденому значенні надійної ймовірності a і числа ступенів свободи f_H f_B , то отримана модель вважається адекватною, її можна використовувати для опису процесу, що досліджується.

За результатами розрахунків при наявності пакету прикладних статистичних програм оброблення та аналізу результатів експериментальних даних за допомогою ПК, можливо побудувати залежності поверхні відгуку параметрів оптимізації та двомірний переріз поверхні відгуку для наочного зображення результатів проведених експериментальних досліджень. Залежність параметра, тобто залежність величини тиску пульсуючого струменя з насадку від зміни одного вхідного фактора за постійних значень інших факторів можна побудувати за допомогою пакета прикладної програми "MathCad 15".

Апроксимацію отриманих експериментальних ліній, побудованих за результатами проведених досліджень, проведено за відомими стандартними методиками, при цьому величину відхилення визначено за способом найменших квадратів.

3.7. Методика визначення параметрів конструктивних елементів приводу вібраційної машини та особливості їх розрахунку у SOLIDWORKS Simulation

При проектуванні параметрів окремих деталей вібраційної машини виникає завдання забезпечити їх міцність та отримати оптимальні розміри конструкції. Оскільки чим більше маси деталей, тим більше і сили інерції, що виникають під час роботи вібраційної машини. Так, як вони працюють при циклічних навантаженнях, то це може призводити до прискорення їхнього руйнування.

Для проведення досліджень застосуємо програмний продукт SOLIDWORKS Simulation компанії Structural Research & Analysis Corporation.

SOLIDWORKS - це система інженерних розрахунків на основі метода скінчених елементів. Він дозволяє проводити навантаження деталей та визначає напружені ділянки, а також шляхом повторів зміни розмірів моделі деталі та прикладання навантаження визначити необхідні розміри елемента для заданого навантаження.

У методі скінчених елементів основним поняттям є поняття про скінчений елемент. Користувач повинен розуміти, які властивості покладені у скінчені елементи, щоб з них зібрати математичну модель. У результаті дії прикладених сил тіло деформується, і ця деформація може бути описана за допомогою поля переміщень: $\vec{u} = \vec{u}(\vec{r})$. Знайти рівноважне поле переміщень $\vec{u} = \vec{u}(\vec{r})$ - ось завдання теорії пружності. Основна ідея методу скінчених елементів полягає в тому, що тіло розбивається на сукупність достатньо малих під-областей, які називаються скінченими елементами. В межах кожного скінченого елемента поле переміщень апроксимується за допомогою функції форми по відомим значенням переміщень у вузлах елемента $\vec{u}(\vec{r}), \vec{r} = 1, 2, \dots, n$, (n - кількість вузлів скінченого елемента).

Програма SOLIDWORKS дуже зручна при багатоваріантному аналізі, оскільки із змінами геометрії виробу автоматично оновлюються встановлені обмеження, навантаження та геометрія на яку посилаються. Достатньо перебудувати сітку та знову запустити модуль.

Користувач визначає параметри дискретизації - середній розмір скінченого елемента та, при необхідності, зони з більш мілкою сіткою. Крім того, можливо дозволити системі самостійно керувати розмірами комірок у зонах з різкою зміною геометрії.

Для виконання розрахунків у програмному забезпеченні SOLIDWORKS необхідно виконати наступні кроки:

- викреслити моделі деталей, що досліджуються в середовищі параметричного моделювання SOLIDWORKS;
- накласти на модель всі обмеження;

- накласти на модель всі навантаження (сили, тиски рівнорозподілені зусилля...) визначених розмірів;
- визначити матеріал, з якої виготовлена модель (відповідно визначаються певні властивості матеріалу);
- розбити модель на сукупність скінчених елементів (накласти сітку з скінчених елементів);
- провести розрахунки необхідних величин.

Для оцінювання статичної міцності при складному напруженому стані використовують критерії міцності або руйнування, що залежать від напруженого та деформованого стану, а також механічних властивостей матеріалу. Ці критерії дозволяють перенести результати дослідів по руйнуванню зразків при простих напружених станах на випадок складних напружених станів. Вони також мають назву теорії або гіпотези міцності.

Умову статичної міцності або руйнування зручно представити у вигляді:

$$\sigma_{екв} = f(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \lambda_0, \lambda_1, \dots) = \sigma_b, \quad (3.19)$$

де $\sigma_{екв}$ - еквівалентне напруження; $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ - головні напруження, причому $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$;

λ_0, λ_1 – параметри, що залежать від механічних властивостей матеріалу;

σ_b – межа міцності матеріалу при одноосному напруженні.

Еквівалентне напруження встановлює відповідність між складним напруженим станом та одноосним розтягом.

Якщо у найбільш напруженій точці деталі:

$$\sigma_{екв} < \sigma_b, \quad (3.20)$$

то умову міцності вважають виконаною. При $\sigma_{екв} \geq \sigma_b$ настає руйнування у небезпечній точці. Умова (320) є граничною для стану міцності та руйнування.

Для пластичних матеріалів умови міцності при розтягу та при стисканні співпадають. Руйнування таких матеріалів визначається переважно дотичними напруженнями. Основними критеріями руйнування є критерій інтенсивності напружень, що виражає «середнє» дотичне напруження в точці, та критерій максимального дотичного напруження.

Критерії міцності:

1. Критерій інтенсивності напружень (критерій Губера - Мізеса).
2. Критерій максимальних дотичних напружень.

Оскільки процес роботи деталей динамічний, то в аналітичних розрахунках у CosmosWorks будемо обмежуватись границею міцності при симетричному циклі напружень для сталі, при розтягу та стисканню:

$$\sigma_{-1p} = 0,35 \cdot \sigma_{\sigma}, \quad (3.22)$$

де σ_{σ} – границя міцності, для даного матеріалу сталі 45 $\sigma_{\sigma} = 640$ МПа,

$$\sigma_{-1p} = 0,35 \cdot 640 = 224 \text{ МПа.}$$

3.8. Обробка експериментальних даних та оцінка точності отриманих результатів

Перед проведенням експериментальних вимірювань для зменшення випадкових помилок проводили контрольні вимірювання, а для видалення систематичних помилок усі вимірювальні прилади були повірені та таровані.

Основні експериментальні дослідження проводились як одно факторні, тобто змінювався один фактор при сталості всіх інших. Кількість основних дослідів вибиралося не менше п'яти згідно з рекомендаціями [125,126], а місця перегину кривих досліджувалась додатково п'ятьма дослідями.

Обробка результатів експериментів проводилась із застосуванням методів математичної статистики. Визначалось середнє математичне значення вимірювань:

$$\bar{X}_k = \frac{1}{n_k} \sum_{i=1}^n x_{k,i}, \quad (3.23)$$

де n – кількість вимірювань;

$x_{k,i}$ – результат i -го виміру k -ї серії вимірів.

Передбачено, що середнє значення є оцінка справжнього значення, оскільки випадкові похибки, які мають різні знаки, компенсують одна одну. Очевидно, що чим більша кількість вимірів проведена, тим точніше це припущення.

Абсолютна похибка вимірювання визначалася за формулою:

$$\Delta X_i = X_{k,i} - \bar{X}_k. \quad (3.24)$$

Стандартне відхилення – це оцінка можливого ступеня відхилення отриманих експериментальних даних від справжнього значення, воно обумовлене наявністю випадкової похибки та розраховувалось за формулою:

$$S_k = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta X_i^2}{n_k - 1}}. \quad (3.25)$$

Для всіх k серій вимірів повне стандартне відхилення розраховувалось за формулою:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_1^k (S_k^2 (n_k - 1))}{\sum_1^k (n_k - 1)}}. \quad (3.26)$$

Графічні залежностей досліджуваних величин будували по середньому значенню відповідних серій досліджень.

РОЗДІЛ 4
РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ
ОБГРУНТУВАННЯ КОНСТРУКТИВНИХ ПАРАМЕТРІВ ТА РЕЖИМІВ
РОБОТИ ПРИВОДУ ВІБРАЦІЙНОЇ МАШИНИ ДЛЯ ОЧИСТКИ ТА
МИЙКИ ДЕТАЛЕЙ

4.1. Експериментальне дослідження візуалізації процесу виникнення пульсуючого зануреного струменя рідини у камері пульсації вібраційної машини

Дослідження проводились на експериментальній установці, конструкція якої наведена у розділі 3. Рис.3.10. При проведенні експериментальних досліджень [118] по візуалізації процесу коливання рідини у камері пульсації вібраційної машини за методикою описаною у розділі 3 було встановлено, що при коливальному ході мембрани робочого органу уверх у насадку виникає занурений пульсуючий струмінь рідини, а при певних частотах коливань приводу вібраційної машини виникає пульсуючий занурений струмінь у насадку із включенням кавітаційних пухирців (рис.4.1). При витіканні рідини через круглий отвір із гострими крайками спостерігається стискання струменя в наслідок опору, вигину окремих струмків рідини на вході в отвір, а також звуження струменя, але після досягнення певного перепаду тиску, йде зрив його потоку.

Відомо [127], що при певних швидкостях при проходженні рідини крізь насадок виникає кільцева ізольована кавітаційна порожнина, наповнена газовими та парогазовими пухирцями, а при збільшенні швидкості втікання з насадку ця порожнина руйнується та у пульсуючому зануреному струмені спостерігається газорідина суміш рис.4.1. Таке явище було запропоновано для застосування у вібраційній машині для процесу мийки забруднень тому, що газорідинний потік має більш значні сили тертя по поверхні [128], що

промивається та збільшує продуктивність процесу промивання забруднень на деталях.

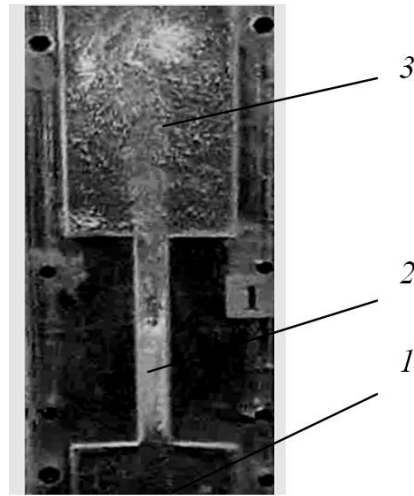


Рис.4.1 – Фотографія прозорого стенду та процесу отримання пульсуючого струменя з включенням кавітаційних пухирців: 1 – камера пульсації; 2 – насадок з утворенням кавітаційної порожнини; 3 – пульсуючий струмінь з насадка із кавітаційними пухирцями; частота коливань 14 Гц; амплітуда коливань $A = 2$ мм; діаметр насадка 10 мм; діаметр камери пульсації 100 мм

При ході мембрани робочого органу униз в камері пульсації виникає тиск нижче атмосферного і в камеру пульсації рідина втягується крізь насадок, з якої починають з'являтися пухирці повітря, розчиненого у рідині рис. 4.2.

Це призводить до зменшення об'єму рідини, яка могла би попасти у камеру пульсації, а надалі при ході мембрани у вгору зменшений об'єм рідини викидається крізь насадок з меншим тиском, тому що у камері пульсації при підвищенні тиску за цикл стиснення проходить зменшення розмірів кавітаційних пухирців і вони потім разом з рідиною викидаються з камери пульсації у пульсуючому струмені з насадка.

Також це явище призводить до зменшення максимальної швидкості струменя рідини за цикл коливання і відповідно до зменшення його максимального тиску на поверхню, що очищується або промивається.

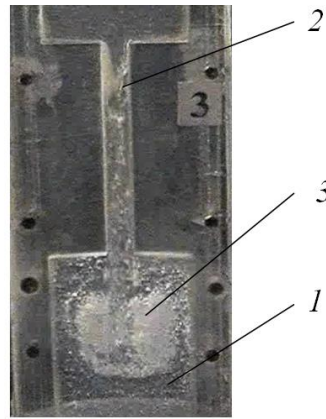


Рис.4.2 – Фотографія прозорого стенду з камерою пульсації у момент руху рідини в камеру пульсації та вигляд кавітаційної порожнини з включенням кавітаційних пухирців: 1 – камера пульсації; 2 – кавітаційна каверна на вході у насадок; 3 – вигляд газорідинної суміші у камері пульсації; частота коливань 14 Гц; амплітуда коливань $A = 2$ мм; діаметр насадка 10 мм; діаметр камери пульсації 100 мм

Виходячи з результатів отриманих досліджень візуальних явищ у насадку та у камері пульсації рекомендовано для процесу мийки використовувати ефект створення пульсуючого струменя з газовими пухирцями, що не сплеснулися, а для процесу очистки зануреним пульсуючим струменем з твердими частинками використати зворотний клапан, який з'єднує камеру пульсації та ванну для очистки з метою зменшення попадання у камеру пульсації газових пухирців тим саме зменшити ефект демпфування середовища і збільшити сили удару рідини пульсуючого струменя з твердими частинками по поверхні [109].

4.2. Дослідження зміни величини тиску пульсуючого струменя від конструктивних параметрів робочого органу та амплітуди і частоти коливань приводу вібраційної машини

Основними завданнями експериментальних досліджень було: визначення залежності максимального тиску зануреного пульсуючого струменя рідини з насадка від режимів роботи приводу, а саме від частоти та амплітуди коливань,

взаємозв'язку конструктивних параметрів вібраційної машини та співвідношенню діаметра насадка до діаметра камери пульсації.

Для процесу мийки пошук залежності максимального тиску зануреного пульсуючого струменя рідини з газовими пухирцями з насадка від режимів роботи приводу вібраційної машини проводився експериментально за допомогою вимірювання зміни максимального тиску струменя з насадка за цикл коливання приводу. Для цього було застосовано модернізований датчик миттєвого тиску MPM489, попередньо тарований на тиск, який встановлено над соплом на відстані 10 мм у початковій ділянці зануреного пульсуючого струменя в експериментальній установці рис.3.6. Для вимірювання миттєвого значення гідродинамічного тиску рідини з насадка застосовано USB осцилограф VM8020, який з'єднаний з персональним комп'ютером через порт USB і обслуговується програмним продуктом «DiSco».

В експериментальному дослідженні проводилась фіксація максимального тиску пульсуючого струменя на виході з насадка при наступних умовах: температура води 20° , амплітуда коливань мембрани $A = 0,002$ м; діаметр камери пульсації $D_k = 0,1$ м, діаметр насадка $d_n = 0,01$ м, частота коливання f приводу вібраційної машини змінювалася від 0 до 20 Гц. Вигляд осцилограми, яку отримано у результаті вимірювання показано на рис.4.3.

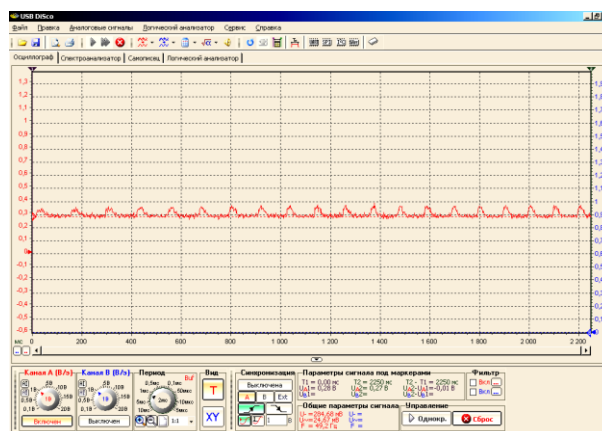


Рис.4.3 – Вигляд скріншоту осцилограми фіксації максимального тиску пульсуючого зануреного струменя рідини з насадка вібраційної машини

Після оброблення осцилограм, отриманих у результаті проведених досліджень, згідно тарувального графіку, при прийнятих конструктивних параметрах камери пульсації за зміною частоти коливання приводу, побудовано графік (рис.4.4) зміни максимального тиску з насадку, який нанесено на сітку графіка, отриманих аналітичних моделей з [109].

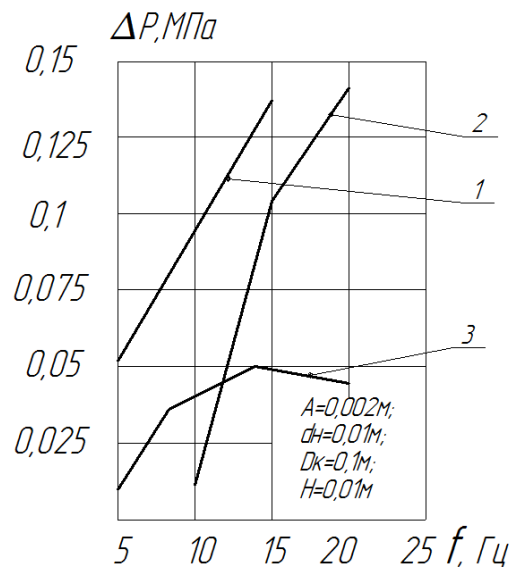


Рис.4.4 – Графіки залежності максимального тиску зануреного пульсуючого струменя з газовими пухирцями насадка на відстані 10 мм від частоти коливань приводу: 1 – аналітична крива за першою моделлю; 2 – аналітична крива за другою моделлю; 3 – експериментальна крива; A – амплітуда коливань; D_k – діаметр камери; d_n – діаметр насадка; H – відстань від зрізу насадка до датчика

З графіка рис.4.4 встановлено, що зміна експериментально визначеного максимального тиску рідини пульсуючого струменя з насадка від частоти, починаючи з частоти коливань 13 Гц до 14 Гц має максимальне значення завдяки виникненню гідравлічного удару, чим визначені значення аналітично де явище гідроудару не враховувалося. Починаючи з частоти 15 Гц максимальний тиск пульсуючого струменя знижується – це пояснюється виникненням у камері пульсації значної кількості газових пухирців, які відіграють роль пружного елемента.

Максимальний тиск струменя з насадка знаходиться у межах частот від 13 до 14 Гц, тому і пульсуючий струмінь з насадки має максимальну швидкість у цих межах, а також і максимальну продуктивність очисти та мийки.

Для процесу очистки з метою збільшення максимального тиску пульсуючого струменя, який захватує тверді частинки в ежекторі, запропоновано застосовувати зворотний клапан, який з'єднує камеру пульсації та ванну для очистки з метою зменшення попадання у камеру пульсації газових пухирців при втягуванні рідини у камеру пульсації. Вигляд осцилограми, яку отримано у результаті вимірювання максимального пульсуючого тиску струменя показано на рис.4.5.

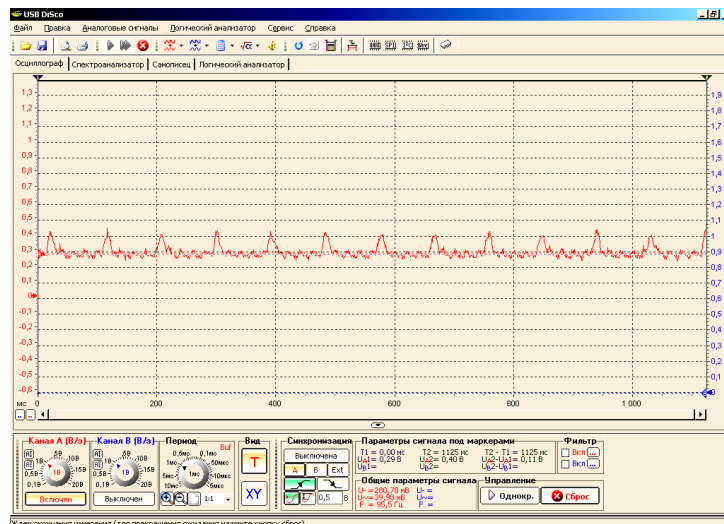


Рис.4.5 – Вигляд скріншоту осцилограми фіксації максимального тиску пульсуючого зануреного струменя рідини з насадка вібраційної машини із застосуванням зворотного клапана

Було проведено експериментальні дослідження вимірювання тиску пульсуючого струменя з встановленим зворотним клапаном в залежності від зміни частоти коливань приводу та зміни діаметру насадка.

Результати вимірювань після оброблення осцилограм згідно тарувального графіку представлені у вигляді графіків на рис.4.6 та рис.4.7.

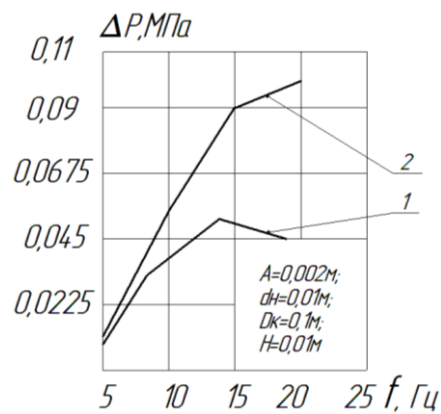


Рис. 4.6 – Графіки експериментальних досліджень зміни тиску пульсуючого струменя від частоти коливань мембрани: 1 – без зворотного клапана; 2 – із застосуванням у камері пульсації зворотного клапана

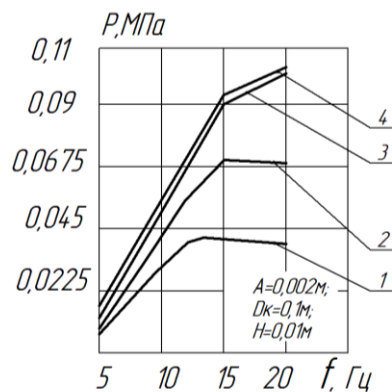


Рис. 4.7 – Графіки експериментальних досліджень зміни тиску пульсуючого струменя від частоти коливань мембрани із застосуванням зворотного клапана: 1 – діаметр насадка 6 мм; 2 – діаметр насадка 8 мм; 3 – діаметр насадка 10 мм; 4 – діаметр насадка 12 мм

У результаті проведених досліджень (рис.4.6) встановлено, що застосування зворотного клапана мембранного типу дозволяє збільшити величину максимального тиску зануреного пульсуючого струменя на частотах від 16 до 18 Гц та уникнути значного росту газової фази при втягуванні рідини у камеру пульсації, що призводить до збільшення продуктивності вібраційної машини на операції очистки. Встановлено (рис.4.7), що при збільшенні

діаметра насадка при незмінному розмірі камери пульсації тиск пульсуючого струменя зростає але збільшення діаметру насадка до 12 мм не дає значного росту значень миттєвого тиску пульсуючого струменя.

Тому для камери пульсації діаметром 100 мм найбільш ефективним по створенню максимального тиску зануреного пульсуючого струменя є насадок діаметром 10 мм. Раціональним діапазоном частот коливання мембрани приводу із застосуванням зворотного клапана для процесу очистки, з досліджень (рис.4.7) встановлено, що він знаходиться від 16 до 18 Гц.

Також експериментально визначено залежність зміни величини максимального тиску зануреного пульсуючого струменя від зміни амплітуди при постійній частоті та постійній відстані від зрізу насадка до поверхні, що промивається.

Встановлено, що збільшення амплітуди коливань приводу на малих частотах дає зростання величини максимального тиску, а при частотах більше 14 Гц веде до зменшення величини максимального тиску. Результати досліджень представлені на рис.4.8 та рис.4.9.

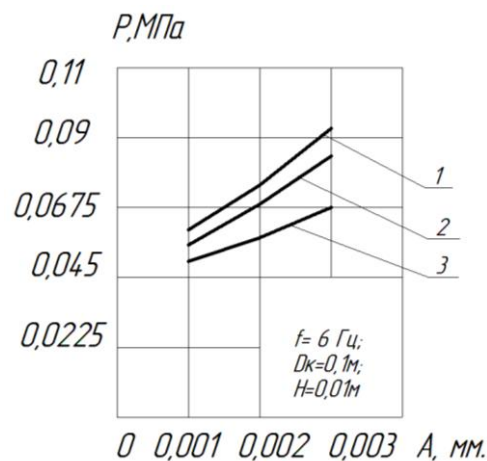


Рис.4.8 – Графік зміни тиску пульсуючого струменя від амплітуди коливань при постійній частоті 6 Гц зі зміною діаметру насадка: 1 – діаметр насадка 10 мм; 2 – діаметр насадка 8 мм; 3 – діаметр насадка 6 мм

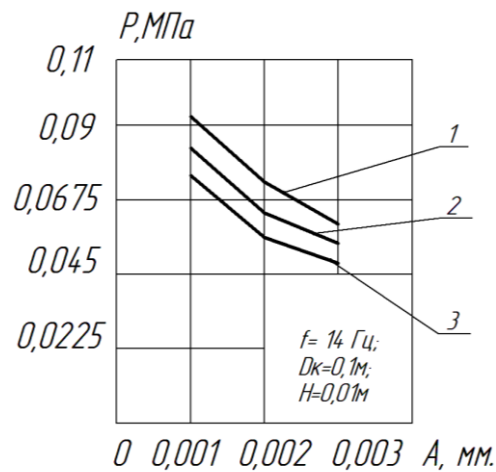


Рис.4.9 – Графік зміни тиску пульсуючого струменя від амплітуди коливань при постійній частоті 14Гц зі зміною діаметру насадка: 1 – діаметр насадка 10 мм; 2 – діаметр насадка 8 мм; 3 – діаметр насадка 6 мм

Проведено експериментальні дослідження, пливу на максимальний тиск зануреного пульсуючого струменя відстані від зрізу сопла до поверхні датчика при постійній частоті та різних діаметрів насадків (поверхні, що очищується). Встановлено, що при збільшенні відстані від сопла до датчика величина тиску пульсуючого струменю зменшується (рис.4.10) та зменшується із зміною діаметру насадка.

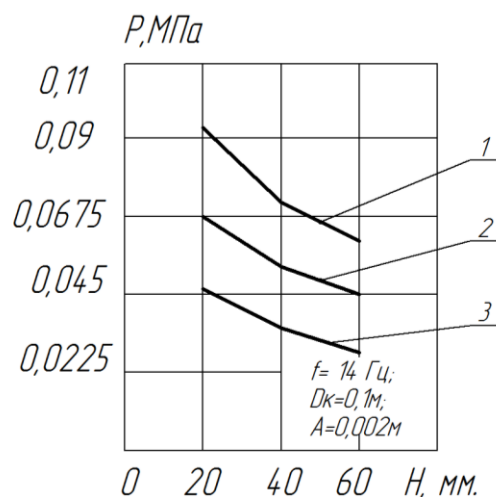


Рис. 4.10 – Графіки експериментальних досліджень зміни тиску пульсуючого струменя в залежності відстані від сопла до датчика H при зміні діаметра насадка: 1 – діаметр насадка 10 мм; 2 – діаметр насадка 8 мм; 3 – діаметр насадка 6 мм

Проведені дослідження по визначенню впливу різних конструктивних параметрів та режимів роботи приводу вібраційної машини для очистки та мийки дали можливість проаналізувати відповідність запропонованих аналітичних моделей, побудованих з різними припущеннями, реальним значенням величини тиску пульсуючого зануреного струменя рідини.

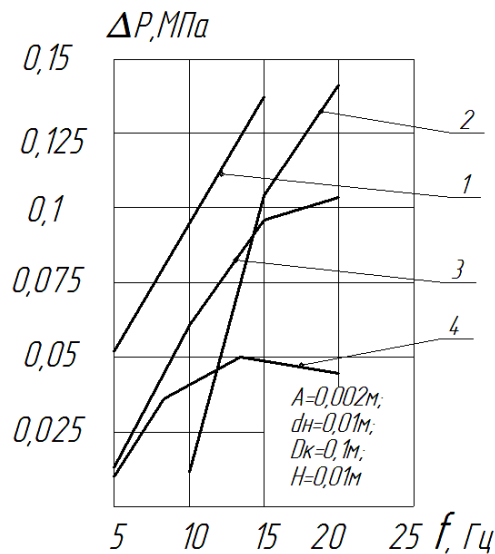


Рис.4.11 – Порівняльні графіки динамічного тиску рідини струменя на виході з насадка за різними моделями та експериментальними результатами:

- 1 – за теорією гідроудару; 2 – за моделлю руху рідини у насадку вібраційної машини; 3 – експериментальні результати із зворотним клапаном;
- 4 – експериментальні результати без зворотного клапану

У результаті проведеного дослідження встановлено, що першу аналітичну модель можна застосовувати для розрахунків параметрів приводу вібраційної машини для мийки з кавітаційними пухирцями. З аналізу графіків 1 та 4 рис.4.11 для практичного використання у методиці розрахунку параметрів вібраційного приводу для процесу мийки струменем з кавітаційними пухирцями введено коефіцієнт корегування k зміни розрахункового тиску у формулу (2.6), що дає можливість користуватися нею при проектуванні

вібраційного приводу для визначення реального перепаду тиску у насадку вібраційної машини для мийки ($k = 0,38$ в межах від 10 до 14 Гц). Тоді розрахункова залежність максимального тиску (2.6) для практичного використання у методиці розрахунку параметрів вібраційного приводу для мийки приймає вигляд:

$$P_{\max} = k \cdot \rho \frac{\xi \cdot D_k^2 \cdot A \cdot f}{d_n^2} C - \rho \cdot g \cdot h. \quad (4.1)$$

Для практичного використання у методиці розрахунку параметрів вібраційного приводу для процесу очистки струменем з твердими частинками із застосуванням зворотного клапана більше підходить аналітична модель [11], у якій зміна тиску пульсуючого струменя визначається за допомогою його амплітудно-частотної характеристики. З аналізу графіків 2 та 3 рис.4.11 значення коефіцієнта корегування k_1 зміни дійсного тиску пульсуючого струменя рідини визначено, як $k_1 = 0,74$ в межах від 14 до 18 Гц. Тоді розрахункова залежність (2.15) для практичного використання у методиці розрахунку параметрів вібраційного приводу для очистки приймає вигляд:

$$P_{\max} = k_1 \frac{\rho \cdot V_{\max}^2}{2} - \rho \cdot g \cdot h, \quad (4.2)$$

Проведений аналіз, запропонованих аналітичних моделей показав, що при проектуванні вібраційних машин для мийки та очищення від забруднень та вибору їх конструктивних параметрів, визначення режимів роботи приводу застосовувати їх можливо із коефіцієнтами коригування, які отримані експериментально, тому що дуже складно аналітично описати процес зародження кавітаційної порожнини у камері пульсації приводу вібраційної машини. Застосування аналітичних моделей для визначення максимального перепаду тиску можливо при попередніх розрахунках, а остаточні значення

параметрів необхідно визначати при налагоджуванні вібраційного приводу шляхом корегування частоти або амплітуди в рекомендованих межах.

4.3. Результати багатofакторного експериментального дослідження динамічних параметрів пульсуючого зануреного струменя в залежності від конструктивних параметрів та режимів роботи приводу вібраційної машини

На основі методики (розділ 3) планування багатofакторного експерименту були проведені експериментальні дослідження по встановленню залежності максимального миттєвого тиску пульсуючого зануреного струменя з насадку від конструктивних параметрів робочого органу та режимів роботи приводу, а саме: від співвідношення діаметра камери пульсації до діаметра насадку D_k / d_n , частоти коливань приводу f , та амплітуди коливань приводу A при відстані датчика до зрізу насадку $H = 0,005\text{м}$.

Максимальний тиск пульсуючого струменя з насадку діаметром 10 мм визначалося за допомогою датчика тиску та експериментальної установки, описаної в підрозділі 3.3. В процесі виконання експерименту змінювали розміри внутрішнього діаметру камери пульсації, а за допомогою кулачків з різним ексцентриситетом змінювали амплітуду коливань, а зміною напруги, яка подавалась на двигун постійного струму, змінювали частоту коливань приводу.

Для кожного з незмінних факторів проводили фіксування значень в трикратній повторюваності, а в нульовій точці фіксували значення 6 разів для визначення дисперсії, після чого встановлювали середнє значення результату, яке використовували для подальшого статистичного оброблення [125,126].

При проведенні досліджень визначалося максимальне значення миттєвого тиску з скріншотів отриманих осцилограм. Для побудови математичної моделі з усього експериментального масиву даних складено таблицю 4.1. результатів досліджень.

Визначено коефіцієнти регресії квадратичного полінома (3.7) за формулами (3.13), Отримані значення коефіцієнтів регресії та їх надійні інтервали. Виконавши кодування факторів, проводились експерименти по робочій матриці (табл.3.2). Значення максимального тиску струменя заносились у табл. 4.1.

Таблиця 4.1.

Умови та результати дослідів по плану другого порядку для $k = 3$

	№	x_1	x_2	x_3	y
Повний факторний експеримент	1	60	13,5	1	0,065
	2	140	13,5	1	0,410
	3	60	21,5	1	0,08
	4	140	21,5	1	0,38
	5	60	13,5	3	0,056
	6	140	13,5	3	0,125
	7	60	21,5	3	0,096
	8	140	21,5	3	0,075
Досліди в зіркових точках	9	30	17,5	2	0,156
	10	180	17,5	2	0,294
	11	100	11	2	0,210
	12	100	24	2	0,195
	13	100	17,5	0.32	0,304
	14	100	17,5	3.68	0,223
Досліди в нульовій точці	15	100	17,5	2	0,270
	16	100	17,5	2	0,265
	17	100	17,5	2	0,270
	18	100	17,5	2	0,275
	19	100	17,5	2	0,275
	20	100	17,5	2	0,265

Після оброблення отриманих результатів рівняння регресії максимального миттєвого тиску залежно від співвідношення діаметра камери пульсації до діаметра насадка, частоти пульсацій приводу, амплітуди пульсацій приводу у кодованих величинах має вигляд:

$$y = 0,2728 + 0,067x_1 + 0,0091x_2 - 0,052x_3 - 0,0156x_1x_2 - 0,0756x_1x_3 - 0,0007x_2x_3 - 0,0339x_1^2 - 0,00225x_2^2 - 0,0203x_3^2. \quad (4.3)$$

де x_1 – співвідношення діаметра камери пульсації до діаметра насадка (D_K / d_H);

x_2 – частота пульсацій приводу;

x_3 – амплітуда пульсацій приводу.

Оцінку статистичної значущості коефіцієнтів рівняння регресії та перевірку адекватності (відповідності) отриманого теоретичного розподілу випадкових величин рівняння регресії (4.3) до реального експериментального процесу проводили згідно методики, яка наведена у розділі 3.

Таким чином, після проведених розрахунків коефіцієнтів рівнянь регресії для коефіцієнта b_{23} не виконується умова його значущості, тобто його величина була менша за надійні інтервали.

Тоді кінцеве рівняння регресії, що відображає функціональну залежність у кодованих величинах має вигляд [97]:

$$y = 0,2728 + 0,067x_1 + 0,0091x_2 - 0,052x_3 - 0,0156x_1x_2 - 0,0756x_1x_3 - 0,0339x_1^2 - 0,00225x_2^2 - 0,0203x_3^2. \quad (4.4)$$

Потім проводилась перевірка адекватності отриманої моделі по критерію Фішера. Модель адекватна, якщо:

$$F = \frac{S_{ad}^2}{S^2\{y\}} < F(Q; f_a; f_s) \quad , \quad (4.5)$$

де S_{ad}^2 – дисперсія адекватності;

$S^2\{y\}$ – дисперсія відтворюваності;

$F(Q; f_a; f_s)$ – квантиль розподілу Фішера, знаходиться згідно [102]

$$F(Q; f_a; f_s) = 4,735. \quad (4.6)$$

Дисперсія адекватності визначається за формулою 3.18. Значення дисперсії адекватності при $\gamma_a = 10,5$; $\gamma_s = 5$; $S_{ad}^2 = 9,04 \cdot 10^{-5}$. Тоді $F = 4,52$, тобто $4,52 < 4,735$ – модель адекватна.

Визначимо оптимальні значення параметрів z_1, z_2, z_3 , провівши диференціювання рівняння регресії по параметрам, прирівнявши отримані рівняння до нуля.

$$\begin{aligned} 65 - 15,4z_2 - 75,2z_3 - 67,4z_1 &= 0 \\ 9,1 - 15,4z_2 - 0,58z_3 - 44z_2 &= 0 \\ -5,1 - 75,2z_1 - 0,6z_2 - 40,1z &= 0 \end{aligned} \quad (4.8)$$

Рішення системи рівнянь має корені $z_1 = 0,38$; $z_2 = 0,34$; $z_3 = 1,16$. Визначимо натуральні значення параметрів z_1, z_2, z_3 , розкодувавши їх. Це відповідно: співвідношення діаметру камери до насадка гідропульсатора $D/d = 10$, частота коливань $f = 14$ Гц, амплітуда коливань $A = 0,002$ м [111].

Відповідно у натуральних величинах (координатах) рівняння регресії (4.2) після перетворення та спрощення виразів прийме остаточний кінцевий вигляд:

$$\begin{aligned} P_{\max} &= 0,91 + 0,007D + 0,006f + 0,18A - 0,000065Df - 0,00126DA - \\ &- 0,0000094D^2 - 0,00146f^2 - 0,02A^2 \end{aligned} \quad (4.9)$$

Отримане рівняння регресії (4.7) може бути використане для визначення максимального миттєвого тиску у насадку залежно від співвідношення діаметра камери пульсації до діаметра насадка, частоти пульсацій приводу, амплітуди пульсацій приводу у таких межах зміни вхідних факторів [111]:

$$60 \leq (D_k / d_n) \leq 120; \quad 6 \leq f \leq 20(\text{Гц}); \quad 1 \leq A \leq 3 (\text{мм}).$$

Для визначення впливу основних складових показників (змінних факторів) на параметр оптимізації, тобто встановлення залежності величини тиску у насадку від величини діаметра камери пульсації при діаметрі насадка 10 мм, амплітуди коливань, частоти коливань мембрани використовували програмне забезпечення "MathCad 14" для ПК і за допомогою нього побудували графічне відтворення проміжних загальних регресійних моделей у вигляді квадратичних поверхонь відгуку.

Результати аналізу даних експериментальних досліджень величини тиску у насадку представлено в графічній формі на рис. 4.12 - 4.13. Графіки побудовано за допомогою програми «MathCad 14» [111].

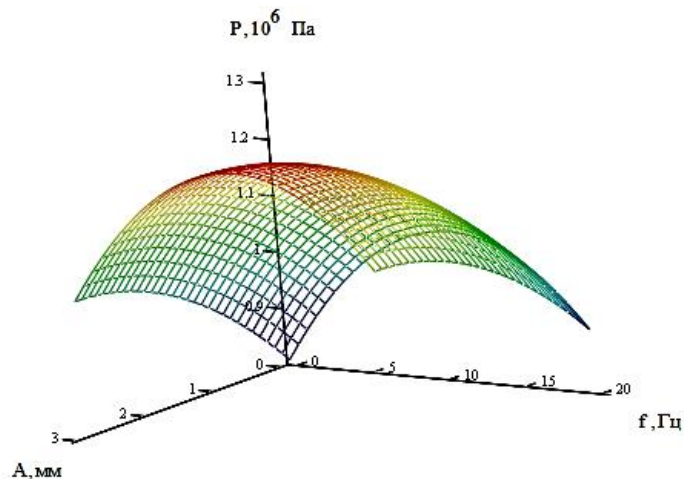


Рис. 4.12. Поверхня відгуку залежності максимального миттєвого тиску у насадку від частоти та амплітуди коливань для камери пульсації $D = 100$ мм,
 $d_n = 10$ мм

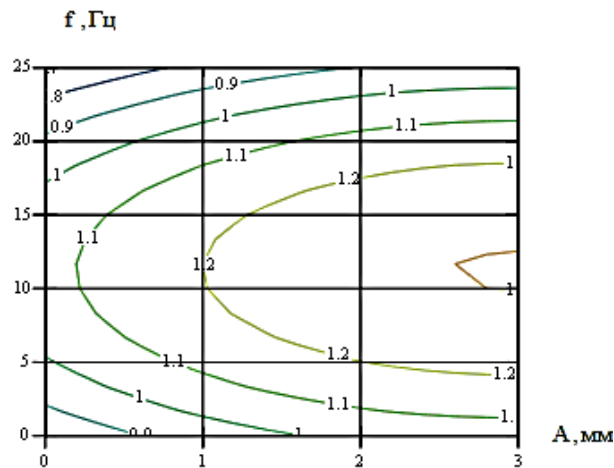


Рис. 4.13. Двомірний переріз поверхні відгуку залежності максимального миттєвого тиску у насадку від частоти та амплітуди коливань для камери пульсації $D = 100$ мм, $d_H = 10$ мм

На рис. 4.14 зображена поверхня відгуку та двомірний переріз поверхні відгуку (рис.4.12), які показують вплив на максимальний тиск з насадки камери пульсації від частоти та амплітуди коливань приводу. Встановлено, що при постійному діаметрі насадка збільшення діаметру камери пульсації веде до зменшення сили тиску [117,118].

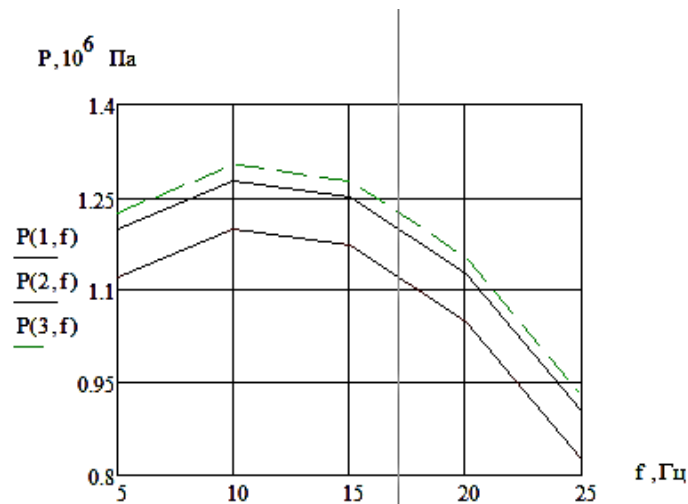


Рис. 4.14. Залежність максимального тиску пульсуючого зануреного струменя від частоти пульсацій при зміні амплітуди коливань: $P(F1) - A = 1$ мм; $P(F2) - A = 2$ мм; $P(F3) - A = 3$ мм при $D = 100$ мм, $d_H = 10$ мм

Встановлено, що при збільшенні амплітуди коливань миттєвий максимальний тиск у насадку не зростає пропорційно по причині збільшення швидкості протікання рідини крізь насадок та збільшенні кільцевої порожнини у ньому, що зменшує прохідний переріз насадка. Збільшення амплітуди коливань до 3 мм веде до зростання динамічних навантажень та паразитних коливань самої машини.

4.4. Експериментальні дослідження процесу мийки поверхонь деталей зануреним пульсуючим струменем рідини з пухирцями

Для підтвердження природи фізичного процесу мийки та механізму механічної взаємодії струменя рідини з кавітаційними пухирцями із забрудненням були проведені порівняльні дослідження різних методів мийки. Досліджувались струминний (вільним струменем у повітрі) та струмино-пульсуючий газорідинний (зануреним струменем у рідині) способи промивання.

Для усунення впливу хімічних факторів на процес миття в якості робочого тіла використовувалась водопровідна вода при $T = 20^{\circ} \text{C}$. Для досліджень процесу мийки вільним струменем рідини та для мийки зануреним пульсуючим струменем рідини для однорідності умов експерименту використовувався насадок діаметром 10 мм. Для проведення досліджень мийки модельних забруднень застосовано стенд (див. рис.3.1) де замість датчика кріпився тримач для зразків (рис.3.9). Зворотний клапан був виключений з метою отримання кавітаційних пухирців, які не сплеснулись у пульсуючому зануреному струмені рідини. Дослідження проводились при наступних параметрах: частота коливань вібраційного приводу 14Гц, амплітуда коливань 2 мм, діаметр насадка 10 мм при діаметрі камери 100 мм, відстань до зрізу насадка 30 мм.

На рис.4.15 показано фотографію поверхні зразка із залишками в'язких забруднень (алмазна паста), який промивалися не пульсуючим не зануреним

струменем рідини. На зразку добре розрізняється зона дії нормальних напружень рідини (темна у центрі) та зона дії дотичних напружень тертя рідини (відцентрові канавки на поверхні дії дотичних напружень потоку). На рис.4.16,*а* та рис.4.16,*б* показано фотографії поверхонь зразків, які промивалися пульсуючим зануреним струменем рідини із газовими пухирцями на початку та у середині процесу оброблення.

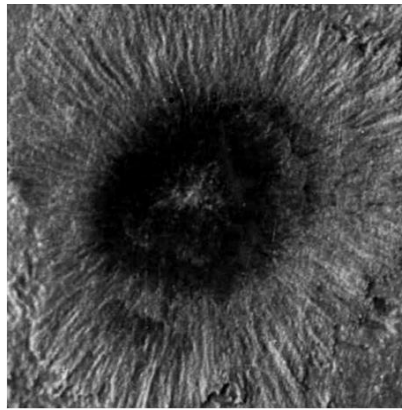
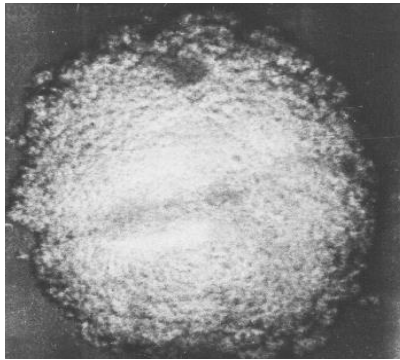
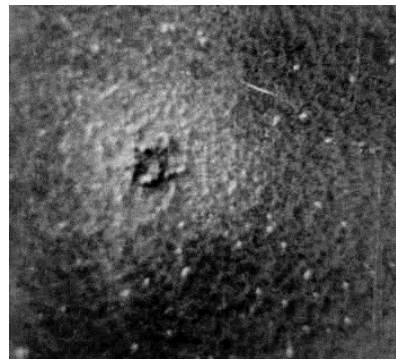


Рис. 4.15 – Фотографії разка із модельним забрудненням при промиванні на повітрі вільним не пульсуючим струменем рідини з насадка Ø10 мм



а



б

Рис. 4.16 – Фотографії разків із модельним забрудненням (алмазна паста) при:
а – при промиванні зануреним пульсуючим струменем рідини із газовими пухирцями на початку оброблення з насадка Ø10 мм; *б* – при промиванні зануреним пульсуючим струменем рідини із газовими пухирцями у середині процесу оброблення з насадка Ø10 мм

Промивання площини зразка відбувається за таким механізмом. На початку промивання зразка найбільш інтенсивно відмивається центральна площа в зоні дії нормальних напружень газорідного потоку (рис.4.16, *a*). Але наприкінці промивання зразка відбувається більш інтенсивне видалення забруднень по периферії потоку, що розтікається під дією дотичних напружень газорідної суміші (рис.4.16,*б*), а в центральній частині інтенсивність видалення забруднень менша завдяки неоднорідності структури потоку. Центральна частина потоку має менший вміст газових пухирців та більшу ударну дію струменя (рис.4.16,*б*), зате периферійна частина потоку, де великий вміст газових пухирців, має значно більші дотичні напруження сили тертя двофазного потоку, що призводить до інтенсивного миття забруднення.

Для однорідності промивання поверхні необхідно переміщення поверхні, що промивається, обертанням чи повздовжнім переміщенням, що і реалізовано в конструкції установки [104,135].

Поверхня модельного забруднення має вигляд «лускоподібних» лунок із зміщенням від центру зразка. Це говорить про вдавлення та зрушення модельного забруднення кавітаційними пухирцями, що не сплеснулися. Пухирці, розмірами від 0,1 до 0,2 мм, завдяки поверхневому натягу мають у середині значний тиск і працюють із модельним забрудненням як «тверді» частинки, а при розтіканні струменя по поверхні забруднення, відповідно збільшують дотичні сили тертя на її поверхні.

Проведено дослідження продуктивності мийки модельного забруднення зануреним пульсуючим струменем з газовими пухирцями за часом. Інтенсивність продуктивності мийки визначалось у процентному залишку площі забруднення до загальної площі зразка за 0,5 хвилини. Продуктивність очищення визначали зменшенням площі забруднення зразків за формулою:

$$\Delta S = S_z / S_{zp} \cdot \% \quad (4.10)$$

де S_z – площа забруднення зразка;

$S_{зр}$ – вага загальна площа зразка.

Результати проведених досліджень по мийці зразків представлені на графіку рис.4 17.

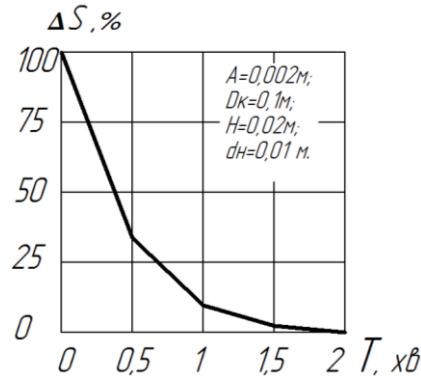


Рис. 4.17 – Графік продуктивності мийки модельного забруднення за часом

Проведені дослідження мийки модельних забруднень підтвердили основні теоретичні припущення [4,12,128] по механічній природі взаємодії миючої рідини з газовими пухирцями із забрудненням та показали ефективність способу мийки із кавітаційними пухирцями, які отримуються при роботі вібраційної машини для процесу мийки.

Виходячи з результатів досліджень, можна рекомендувати застосування зануреного пульсуючого газорідинного струменя в якості інтенсифікатора процесу мийки в'язких розчинних забруднень.

4.5. Експериментальні дослідження процесу очистки поверхонь деталей зануреним пульсуючим струменем рідини з твердими частинками

Проведено експериментальні дослідження процесу очистки модельних забруднень на стенді (рис.3.1) пульсуючим струменем з твердими частинками.

У якості твердих частинок застосовувались: полістиролова крихта (ПС) та металеві кульки діаметром 1 мм. У якості модельного забруднення використано в'язку суміш пилу на основі пластиліну, яку наносили на поверхню сталевого

зразка розміром 40x40 мм. Вигляд процесу очистки забруднень потоком твердих частинок ПС показано на рис.4.18.

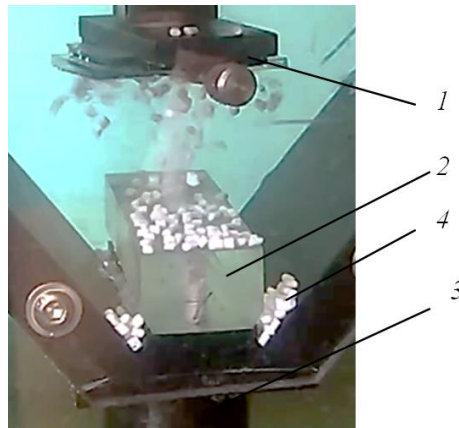


Рис.4.18 – Фотографія процесу очистки забруднень потоком твердих частинок ПС: 1 – тримач зразків; 2 – сопло; 3 – насадок; 4 – тверда крихта ПС

Для приводу вібраційної машин були вибрані раціональні режими оброблення: частота коливань вібраційного приводу 18 Гц, амплітуда коливань 2 мм, діаметр насадка 10 мм при діаметрі камери 100 мм, відстань до зрізу насадка 30 мм та застосовано зворотний клапан, який з'єднує камеру пульсації та ванну для очистки.

Кут атаки струменя 90°. На рис.4.19 показано фотографію зразка з модельним забрудненням після оброблення зануреним пульсуючим струменем рідини з твердими частинками полістиролової крихти (ПС). Поверхня має шаржований вигляд та спостерігаються результати врізання та зрушення частки забруднення. Процес очищення за часом можна прискорити збільшенням маси твердої частинки застосувавши металеві кульки.

На рис.4.20 та рис.4.21 показано фотографію зразка з модельним забрудненням після оброблення пульсуючим зануреним струменем рідини з металевими кульками 1 мм.

На поверхні зразка спостерігаються результати процесу вдавлювання кульки у в'язке забруднення та наступне зрушення частки забруднення при дотичному руху кульки у потоці рідини по поверхні забруднення.

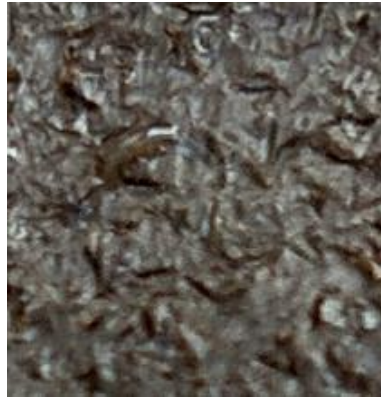


Рис. 4.19 – Фотографія поверхні зразка з модельним забрудненням після взаємодії пульсуючого струменя рідини з твердими частинками (ПС), 90°



Рис. 4.20 – Фотографія поверхні зразка з модельним забрудненням після оброблення пульсуючим струменем рідини металевими кульками, кут 90°



Рис. 4.21 – Фотографія поверхні зразка з модельним забрудненням після оброблення пульсуючим струменем рідини металевими кульками, кут 125°

Проведено дослідження продуктивності очищення модельного забруднення зануреним пульсуючим струменем з металевими кульками за часом із зміною кута атаки струменя [119,120]. Інтенсивність продуктивності очищення визначалось за середнім відносним зменшенням ваги зразка. Зменшення ваги зразків визначали за різницею ваги до та після обробки протягом контрольованого часу (2 хв.) за формулою:

$$\Delta m = m_1 - m_2, \quad (4.10)$$

де m_1 – вага зразка до очищення;

m_2 – вага зразка після очищення.

Продуктивність очищення визначали залежністю:

$$G = \Delta m(F, t), \quad (4.11)$$

де Δm – зміна ваги зразка;

(F, t) – функція зміни ваги за часом.

На рис.4.22 показано залежність продуктивності очищення з поверхні зразка модельного забруднення за часом оброблення та зі зміною кута атаки пульсуючого струменя рідини з твердими частинками (металевими кульками) до поверхні, що очищається [119,120].

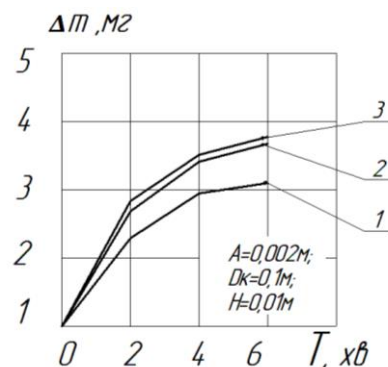


Рис. 4.22 – Графіки продуктивності очищення з поверхні зразка модельного забруднення за часом при різних кутах затопленого струменя з металевими кульками від вертикальної осі струменя до поверхні: 1 – кут 90° ; 2 – кут 125° ; 3 – кут 135°

Масове зношування металевих кульок та зміна шорсткості основи зразка практично не спостерігалася завдяки виникненню на поверхні незначних напружень пружного характеру.

У результаті проведеного дослідження продуктивності очищення модельного забруднення встановлено, що збільшення кута атаки пульсуючого зануреного струменя з металевими кульками від 90° до 125° призводить до зростання продуктивності очистки (починають значно впливати дотичні напруження між кулькою та забрудненням, що призводять до його більш активного зривання). Подальше збільшення кута веде до незначного зростання продуктивності обробки (починається зменшення впливу нормальних напружень між кулькою та забрудненням).

4.6. Висновки до розділу 4

1. Результати експериментальних досліджень візуалізації процесу виникнення пульсуючого зануреного струменя рідини у камері пульсації вібраційної машини показали, що при частотах більше 15 Гц руху униз мембрани камери пульсації виникає значна кількість кавітаційних пухирців у камері пульсації і відповідно при стисненні і вони відіграють роль демпфера і зменшують об'єм рідини, який виштовхується крізь насадок та знижують тиск у ньому. Для модуля очистки запропоновано застосувати зворотний клапан, який при втягуванні рідини у камеру пульсації збільшує прохідне січення і виникнення кавітаційних пухирців проявляється при частотах більше 18 Гц і при цьому тиск у насадку зростає.

2. Порівняльний аналіз результатів, отриманих за допомогою аналітичних моделей та експериментальним шляхом надав можливість встановити величину коефіцієнтів корегування аналітичних моделей, які будувалися з певними припущеннями та складністю достатньо коректно аналітично описати кавітаційні процеси у камері пульсації вібраційної машини.

3. У результаті проведених експериментальних досліджень встановлено, що застосування зворотного клапану мембранного типу у приводі вібраційної машини для очистки дозволяє збільшити величину максимального тиску зануреного пульсуючого струменя рідини на 0,045МПа при частотах коливання привода від 16 до 18Гц, що дає можливість збільшити продуктивність процесу очищення забруднень.

4. Встановлено експериментально, що оптимальна частота коливання приводу модуля для мийки 14Гц та амплітуда коливання 2мм при співвідношенні діаметра насадка до діаметра камери 1:10, а для модуля очистки раціональний діапазон частот коливання від 16 до 18Гц та амплітуда коливання 2 мм при співвідношенні діаметра насадка до діаметра камери 1:10.

5. Проведені дослідження мийки модельних забруднень підтвердили основні теоретичні припущення по механічній природі взаємодії миючої рідини із забрудненням та показали ефективність способу мийки із кавітаційними пухирцями, які отримуються при роботі вібраційної машини та ефективність способу очистки пульсуючим струменем рідини з твердими частинками або металевими кульками із застосуванням зворотного клапана у камері пульсації вібраційної машини.

6. Проведені експериментальні дослідження зміни величини максимального тиску зануреного пульсуючого струменя від відстані зрізу сопла до поверхні датчика при постійній частоті та при різних діаметрах насадків показали, що при збільшенні відстані від зрізу сопла до датчика величина тиску пульсуючого струменя зменшується та зменшується із зміною діаметру насадка у мещу сторону. Рекомендовано проводити процес очистки на відстані від сопла в межах від 30 до 60 мм та при діаметрі 10 мм.

7. У результаті проведених досліджень впливу кута атаки пульсуючого струменя встановлено, що при очищенні в'язких забруднень продуктивність процесу зростає при розташуванні забрудненої поверхні під певним кутом. Рекомендований діапазон кутів атаки зануреного пульсуючого струменя рідини з твердими частинками до поверхні знаходиться в межах 125° - 130° .

РОЗДІЛ 5

МЕТОДИКА ПРОЕКТУВАННЯ МОДУЛІВ ОЧИСТКИ ТА МИЙКИ ВІБРАЦІЙНОЇ МАШИНИ І ОБГРУНТУВАННЯ КОНСТРУКТИВНИХ ПАРАМЕТРІВ ЇЇ ВУЗЛІВ

5.1. Методика визначення параметрів модуля вібраційної машини для мийки та загальна методика його проектування

У результаті проведених теоретичних та експериментальних досліджень обґрунтування конструктивних параметрів та визначення режимів роботи приводу модуля вібраційної машини для мийки забруднень зануреним пульсуючим струменем миючої рідини з газовими пухирцями запропонована загальна методика проектування параметрів вузла вібраційної машини та режимів роботи його приводу.

Послідовність проектування вузла мийки вібраційної машини.

1. На першому етапі проектування вибираємо конструктивні розміри камери пульсації D_k від 100 до 120 мм та діаметр диску мембрани $D_d = 0,9 D_k$, діаметр отвору у насадку d_H від 9 до 10 мм. Довжину камери пульсації $H_{к.п.}$ приймаємо $H_{к.п.} = 30$ мм. (рис.5.1). Відстань h від зрізу насадка до деталі приймаємо згідно графіку 4.10 $h = 20 \dots 30$ мм.

2. За рівнянням аналітичної моделі (4.1) знаходимо максимальний тиск зануреного струменя при рекомендованій частоті коливання приводу машини $f = 14$ Гц та амплітуді $A = 0,002$ м.

3. За допомогою рівняння регресії (4.9) визначенням відносно амплітуди коливань уточнюємо величину амплітуди коливань приводу при визначеному максимальному тиску.

4. За рекомендованою частотою коливань $f = 14$ Гц визначаємо значення обертів електродвигуна за хвилину. Проводимо розрахунок крутного моменту та потужності електродвигуна за формулами підрозділу 5.5.

5. Визначаємо раціональні параметри конструктивних елементів вузла пульсації вібраційної машини для мийки у програмному продукті Cosmos Works за методикою та прикладом, наведеним у підрозділі 5.4.

6. Створюємо 3-D модель вузла мийки вібраційної машини у програмному продукті SolidWorks, з якої зручно отримати робочі креслення деталей.

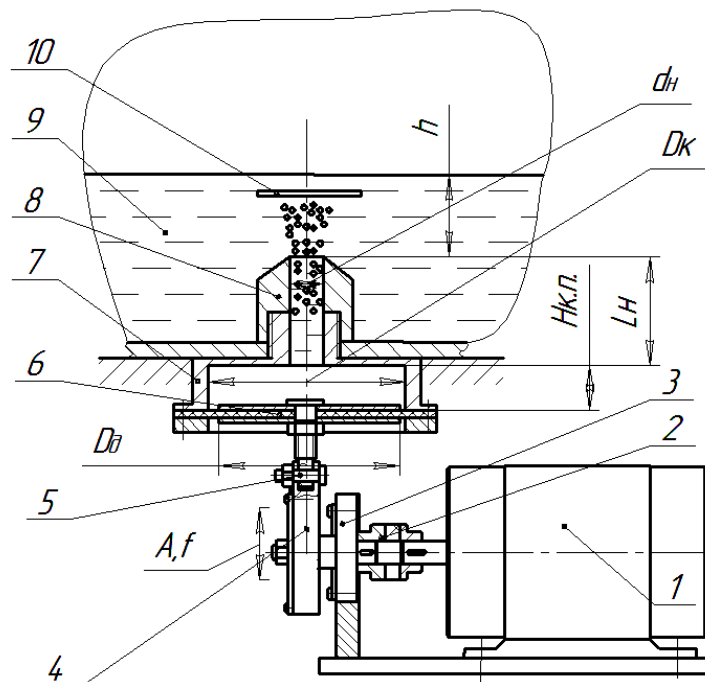


Рис. 5.1 – Розрахункова схема модуля вібраційної машини для мийки забруднень потоком пульсуючого струменя рідини з кавітаційними пухирцями:

1 – електродвигун; 2 – муфта; 3 – корпус з підшипником; 4 – обойма ексцентрика з підшипником; 5 – вісь; 6 – пружна мембрана з дисками; 7 – камера пульсації; 8 – насадок; 9 – рідина; 10 – поверхня, що промивається; d_n – діаметр насадка; D_k – діаметр камери пульсації; D_δ – діаметр диска; h – відстань від зрізу насадка до поверхні, що промивається; A, f – амплітуда та частота коливань приводу вібраційної машини; $H_{к.п.}$ – висота камери пульсації;

L_n – довжина насадка

5.2. Методика визначення параметрів модуля вібраційної машини для очистки та загальна методика його проектування

У результаті проведених теоретичних та експериментальних досліджень обґрунтування конструктивних параметрів та визначення режимів роботи приводу модуля вібраційної машини для очистки забруднень зануреним пульсуючим струменем миючої рідини з твердими частинками запропонована загальна методика проектування параметрів вузла вібраційної машини та режимів роботи його приводу.

Послідовність проектування вузла очистки вібраційної машини.

1. На початку проектування вибираємо конструктивні розміри ежектора та сопла (рис.5.2) за залежностями: $D_e = 1,2 D_n$; $H_3 = 0,8 d_k$; $H_1 = 1,5 d_k$; $H_2 = 15$ мм; $D_c = 1,3 D_e$; $H_4 = 2..3$ мм;

2. Вибираємо конструктивні розміри камери пульсації D_k від 100 до 120 мм та діаметр диску мембрани $D_d = 0,9 D_k$, діаметр отвору у насадку D_H від 9 до 10 мм. Довжину камери пульсації $H_{к.п.}$ приймаємо $H_{к.п.} = 30$ мм. (рис.5.2). Відстань L від зрізу насадка до деталі приймаємо згідно графіку 4.10 $h = 20...30$ мм. Розраховуємо максимальну кількість кульок у ежекторі за ф. 2.19. Розмір металевих кульок рекомендовано у межах від 0,8 до 1 мм .

3. Згідно графіка рис.4.6.та 4.11, з урахуванням застосування зворотного клапану, вибираємо раціональний діапазон частоти коливань приводу від 16 до 18 Гц. та амплітуду коливань мембрани $A = 0,002$ м. За рівнянням аналітичної моделі (4.2) та (2.14) знаходимо максимальний тиск зануреного струменя при рекомендованій частоті коливання приводу машини $f = 18$ Гц при $D_k d_n = 10$.

4. За допомогою рішення рівняння регресії (4.9) відносно амплітуди коливань уточнюємо величину амплітуди коливань приводу при визначеному максимальному тиску.

5. Проводимо визначення конструктивних параметрів зворотного клапану для вузла утворення пульсуючого струменя вібраційної машини для очистки забруднень за методикою підрозділу 5.3.

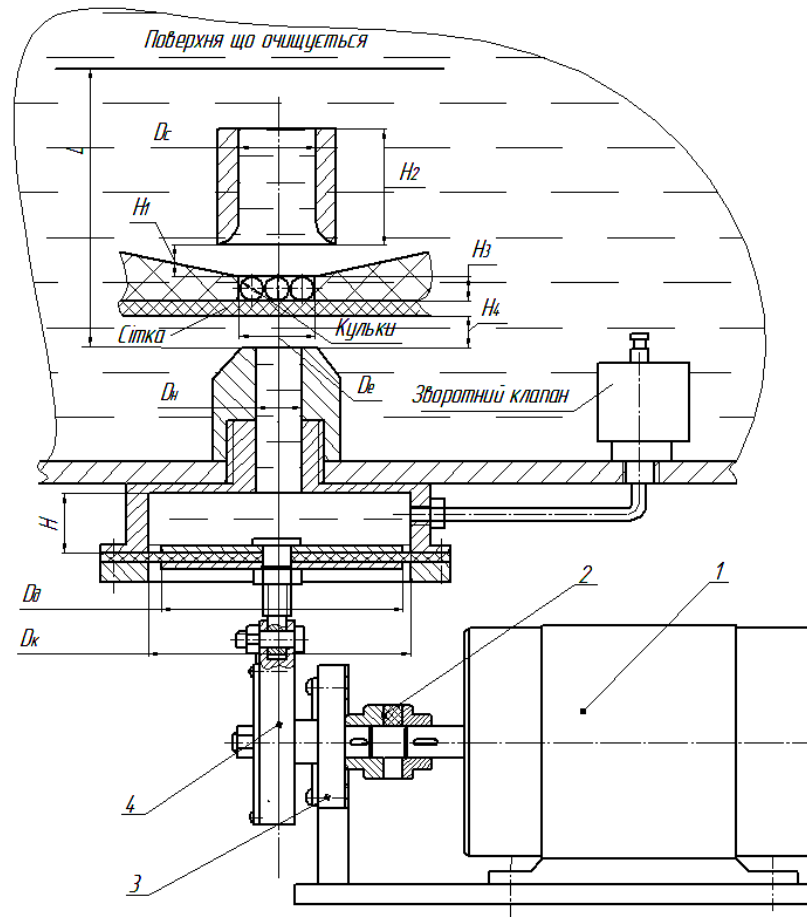


Рис. 5.2 – Розрахункова схема модуля вібраційної машини для очистки забруднень потоком пульсуючого струменя рідини з твердими частинками:

1 – електродвигун; 2 – муфта; 3 – корпус з підшипником; 4 – обойма ексцентрика з підшипником; H – висота камери пульсації; D_e – діаметр ежектора; D_c – діаметр сопла; H_1 – відстань від сопла до ежектора; H_2 – довжина сопла; H_3 – висота кармана ежектора; H_4 – відстань від зрізу насадка до сітки ежектора D_n – діаметр насадка; D_k – діаметр камери пульсації; D_δ – діаметр диска; h – відстань від зрізу насадка до поверхні, що промивається; A, f – амплітуда та частота коливань приводу вібраційної машини; $H_{к.п.}$ – висота камери пульсації; L_n – довжина насадка

6. За рекомендованою частотою коливань визначаємо значення обертів електродвигуна за хвилину. Проводимо розрахунок крутного моменту та потужності електродвигуна за формулами підрозділу 5.5.

7. Визначаємо раціональні параметри конструктивних елементів вузла пульсації вібраційної машини для очистки у програмному продукті Cosmos Works за методикою та прикладом, наведеним у підрозділі 5.4.

8. Створюємо 3-D модель вузла очистки вібраційної машини у програмному продукті SolidWorks, з якої зручно отримати робочі креслення деталей.

5.3. Техніко-функціональний аналіз та методика проєктування зворотного клапану для вузла утворення пульсуючого струменя вібраційної машини для очистки забруднень

З метою збільшення сили тиску зануреного пульсуючого струменя у вузлі вібраційної машини для очистки забруднень у конструкції машини було запропоновано застосувати зворотний клапан, який з'єднує камеру пульсації з ванною для миючої рідини [109].

На рисунку 5.3 показана схема будови зворотного клапана.

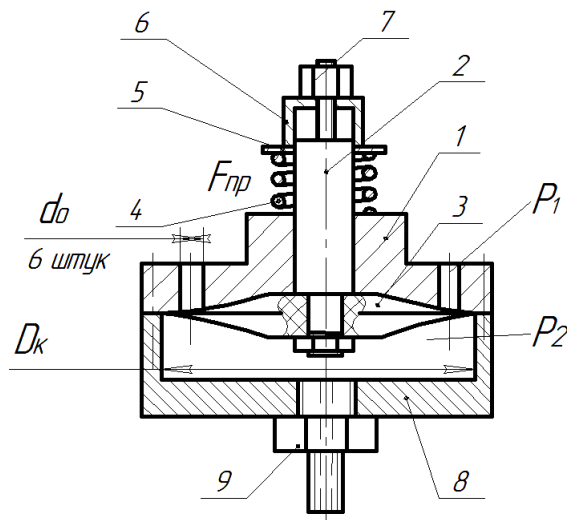


Рис. 5.3 – Розрахункова схема зворотного клапану вібраційної машини для очистки забруднень потоком пульсуючого струменя рідини з твердими частинками: 1 – корпус; 2 – шток; 3 – пружна мембрана; 4 – пружина; 5 – шайба; 6 – стакан; 7 – гайка регулювальна; 8 – кришка; 9 – штуцер

Рідина всмоктується крізь отвори у корпусі 1 при зниженні тиску P_2 при переміщенні пелюстки гумового клапану, яка притискається до вхідних отворів штоком 2 за допомогою пружини 4.

З метою зменшення виникнення значної кількості кавітаційних пухирців у камері пульсації для зворотного клапана важливо розрахувати максимальну сумарну площу отворів та їх кількість, виходячи з об'ємного витоку рідини крізь нього за період коливання.

Максимальний об'єм рідини, який теоретично може потрапити у камеру пульсації крізь клапан за період коливання, без урахування втягування рідини крізь насадок, визначається за формулою:

$$V_{к.п.} = \frac{\pi \cdot D_{к}^2}{4} \cdot 2 \cdot A, \quad (5.3)$$

де A – амплітуда коливань рідини у камері пульсації;

$D_{к}$ – діаметр камери пульсації.

Об'ємний виток рідини $V_{кл}$ крізь клапан визначається для рідини, що не стискуються, за формулою [129]:

$$V_{кл} = \mu \cdot \Sigma S_o \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta P}{\rho}}, \quad (5.4)$$

де ρ – густина води, $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$;

μ – коефіцієнт витоку, $\mu = 0,9$;

ΣS_o – сумарна площа отворів у клапані;

ΔP – різниця тисків атмосферного та у камері пульсації $\Delta P = 0,005 \text{ МПа}$.

Припустимо, що максимальний об'єм рідини $V_{к.п.}$ дорівнює об'ємному витоку крізь клапан $Q_{кл}$ без урахування об'єму рідини, що може втягуватися крізь насадок.

$$\frac{\pi \cdot D_k^2}{2} \cdot A = \mu \cdot \Sigma S_o \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta P}{\rho}}. \quad (5.5)$$

Звідки можна отримати загальну площу вхідних отворів клапана за формулою:

$$\Sigma S_o = \frac{\pi \cdot D_k^2 \cdot A}{2 \cdot \mu \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta P}{\rho}}}. \quad (5.6)$$

Проведемо чисельні розрахунки за формулою (5.6) при наступних параметрах: діаметр камери пульсації $D_k = 0,1$ м; амплітуда $A = 0,002$ м; $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$; $\mu = 0,9$; перепад тиску $\Delta P = 0,05$ МПа.

$$\Sigma S_o = \frac{\pi \cdot D_k^2 \cdot A}{2 \cdot \mu \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta P}{\rho}}} = \frac{3,14 \cdot 0,1^2 \cdot 0,002}{2 \cdot 0,9 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 0,05}{1000}}} = 0,00348 \text{ м}^2.$$

Прийmemo діаметр отворів $d = 0,01$ м та кількість 10 штук. Визначимо їх сумарну площу за формулою:

$$\Sigma S_o = \frac{\pi \cdot d_o^2}{4} \cdot n = \frac{3,14 \cdot 0,01^2}{4} \cdot 8 = 0,00314 \text{ м}^2.$$

Порівнявши сумарну теоретичну площу отворів з прийнятою фактичною сумарною площею отворів та враховуючи, що об'ємний виток крізь клапан фактично буде меншим, за рахунок втягування рідини у камеру пульсації крізь насадок, можна зробити висновок, що фактичні конструктивні розміри забезпечують роботоздатність запропонованої конструкції зворотного клапану.

Виконаємо перевірку за частотною характеристикою спрацювання клапана запропонованої конструкції.

Час спрацювання зворотного клапана визначається за формулою [130,131]:

$$t = \sqrt{\frac{2 \cdot m \cdot h}{(P_1 - P_2) \cdot \Delta S - R}}, \quad (5.7)$$

де m – маса клапана з штоком, 0,02 кг;

h – максимальний хід мембрани, 0,1 см;

ΔS – площа прохідного січення клапану, 34,8 см²;

R – сумарна сила опору руху мембрани клапана з штоком, 0,5 кгс;

P_1 – тиск вхідний, зовнішній, 1 кг/см²;

P_2 – тиск на виході з клапану, 0,5 кг/см²;

Проведемо розрахунок, за отриманими конструктивними параметрами, за формулою (5.7):

$$t = \sqrt{\frac{2 \cdot 0,02 \cdot 0,1}{(1 - 0,5) \cdot 34,8 - 0,5}} = 0,014 \text{ с},$$

Визначений час спрацювання клапану 0,014 с. говорить, що його роботоздатність забезпечується при частотах від 0 до 70 ГЦ коливань вібраційного приводу.

Тому при рекомендованих частотах його ефективна робота забезпечена.

Проведемо розрахунок конструктивних параметрів пружної системи клапану. Пружина клапана призначена для роботи в певному діапазоні тиску і характеризується двома робочими тисками: початковим $P_{min} = 0,01$ МПа і кінцевим $P_{max} = 0,05$ МПа.

Діапазон роботи пружини визначається такими умовами:

1) Перевищення тиску над робочим при відкритті клапана на розрахункову величину h_0 має бути $\Delta P \leq 0,1 P_p$ тобто $\Delta F_{np} \leq 0,1 F_p$ або $\eta \geq 0,9$; ;

2) При нормальному розрахунковому тиску $P_H = 0,5(P_{\min} + P_{\max})$ для клапана має бути $\Delta F = (0,06 \dots 0,07)F_H$ або $\eta = (0,94 \dots 0,93)$ (де F_H номінальне навантаження);

3) Максимальне розрахункове навантаження можливо бути в 1,5 рази більше номінальної, тобто $F_{\max} = 1,5F_H$.

Співвідношення максимальної і мінімального навантаження для пружини дає коефіцієнт діапазону пружини:

$$\psi = \frac{F_{\max}}{F_{\min}} = \frac{P_{\max}}{P_{\min}} = \frac{0,005}{0,001} = 5.$$

Визначимо параметри конструкції пружини зворотного клапану [132].

Прийmemo для пружини матеріал, з якої вона виготовляється, Сталь 60С2.

Діаметр штока клапана конструктивно прийнято $d_{шт} = 10$ мм.

Діаметр дроту пружини визначаємо за формулою:

$$d = \sqrt[3]{\frac{8kF_2D_{сер}}{\pi\tau}} = \sqrt[3]{\frac{8 \cdot 1,2 \cdot 1,7 \cdot 12}{3,14 \cdot 750 \cdot 0,5}} = \sqrt[3]{0,166} = 1 \text{ мм}, \quad (5.8)$$

де $D_{сер}$ – середній діаметр пружини, який приймаємо, виходячи із конструктивних розмірів клапана, $D_{сер} = 12$ мм;

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

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

F_2 – сила стиснення пружини при робочій деформації, яка відповідає максимальному тиску на площу мембрани. $F_2 = \Sigma S_o \cdot P_{\max} = 0,0034 \cdot 500 = 1,7$ Н.

Зовнішній діаметр пружини (рис.4.24) визначаємо як:

$$D_{зов} = D_{сер} + d = 12 + 1 = 13 \text{ мм}, \quad (5.9)$$

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

Внутрішній діаметр пружини визначаємо як:

$$D_{вн} = D_{сер} - d = 12 - 1 = 11 \text{ мм}. \quad (5.10)$$

Максимальну величину стиснення пружини при збиранні конструкції клапана X_k визначаємо за формулою:

$$X_k = \frac{X \cdot F_2}{F_2 - F_1} = \frac{2 \cdot 1,7}{1,7 - 0,85} = 4 \text{ мм}, \quad (5.11)$$

де X – хід пружини в робочому стані, $X = 1$ мм;

F_2 – сила пружини при робочій деформації, $F_2 = 1,7$ Н;

F_1 – сила пружини при попередній деформації, $F_1 = 0,5 \cdot F_2 = 0,5 \cdot 1,7 = 0,85$ Н.

Тоді число робочих витків:

$$n = \frac{Gd^4 X_k}{8F_2 D_{сер}^3} = \frac{7,85 \cdot 10^4 \cdot 1^4 \cdot 4}{8 \cdot 1,7 \cdot 12^3} = 13, \quad (5.12)$$

де G – модуль зсуву для пружинної сталі 60С2, прийнято $G = 7,85 \cdot 10^4$ МПа.

Повне число витків пружини:

$$n_1 = n + n_2 = 13 + 2 = 15, \quad (5.13)$$

де n – число робочих витків;

n_2 – число опорних витків, що доповнюють приймаємо $n_2 = 2$.

5.4. Визначення параметрів конструктивних елементів вузла пульсації вібраційної машини для очистки та мийки у SOLIDWORKS

У процесі проектування елементів вібраційної машини необхідно проаналізувати умови роботи деталей у її вузлах під час роботи та визначити найбільш навантажені деталі, що підлягають циклічним впливам з метою забезпечення надійності їх роботи при знакозмінних навантаженнях та рекомендованих розмірах [135].

В якості досліджуваних елементів вузла утворення зануреного пульсуючого струменя (рис.5.4) приймаємо деталі, які найбільше підлягають циклічним навантаженням: диск 3, що являється елементом мембрани та корпус камери пульсації 2 у якому періодично зростає тиск рідини або знижується нижче атмосферного та на який діє циклічне зусилля від штоку.

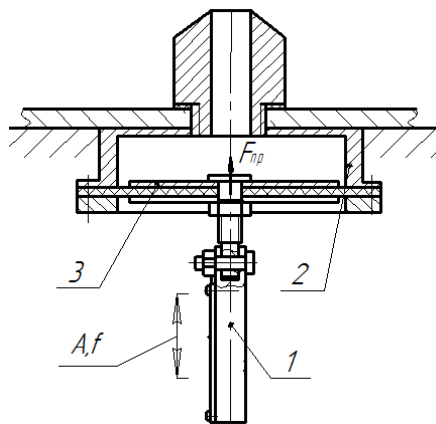


Рис. 5.4 - Схема камери пульсації з елементом приводу:

1 – ексцентриковий вузол; 2 – корпус камери пульсації; 3 – диск мембрани

Для розрахунків визначаємо, які зусилля діють на елементи камери та диску. Для цього визначаємо приведену силу, що діє на шток у вузлі пульсації.

Приведену силу на штокові F_{np} визначаємо наступним чином:

$$F_{np} = F_1 + F_{in}, \quad (5.14)$$

де F_{in} - сила інерції, $F_{in} = 0,4 \cdot F_1$, Н.

Силу F_1 визначаємо за формулою:

$$F_1 = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot p, \quad (5.15)$$

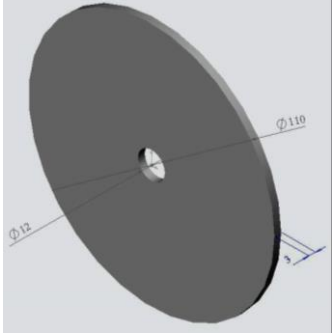
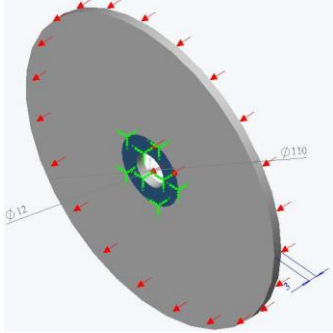
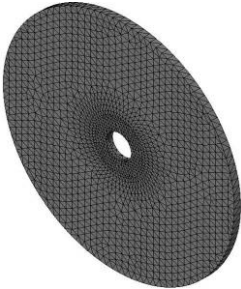
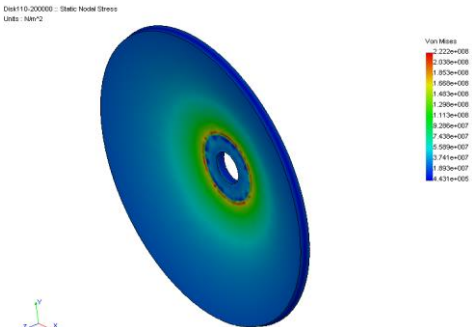
де D - діаметр порожнини камери пульсації;

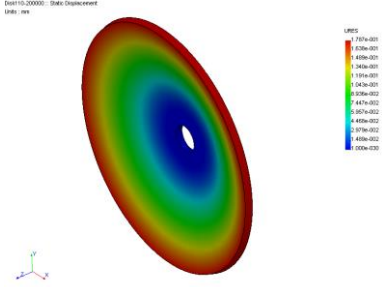
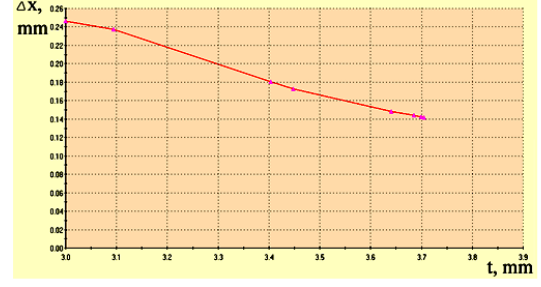
p - робочий тиск в камері пульсації МПа.

Згідно методики розрахунків (розділ3) у SOLIDWORKS [133] проведемо необхідні етапи проектування та дослідження по визначенню конструктивних розмірів вибраних деталей. Етапи аналізу та його результати занесемо у таблиці 5.1 та 5.2.

Таблиця 5.1

Етапи розрахунків за програмою SOLIDWORKS деталі диск

1	2
	
<p>Рис. 5.5 - Елемент мембрани гідропульсатора диск</p>	<p>Рис. 5.6 - Схема зусиль та навантажень, що діють на диск</p>
	
<p>Рис.5.7 - Схема сітки розбиття диску на скінчені елементи</p>	<p>Рис. 5.8 - Схема розподілення напружень в структурі диску</p>

1	2
	
<p>Рис. 5.9 - Схема переміщення елементів диска при деформуванні</p>	<p>Рис. 5.10 - Залежність прогину диска ΔX від його товщини t</p>

Диск 3 (рис. 5.5) являється елементом мембрани та працює в таких умовах: при рухові ексцентрика 1 вгору, шток тисне безпосередньо на диск 3 знизу, а зверху на диск 3 діє гумова мембрана та тиск рідини у камері пульсації.

Представимо це наступним чином, диск 3 знаходиться у положенні защемлення по колу діаметром, що рівний діаметру зовнішньої частини штоку, а зверху на поверхню диска діє рівнорозподілене навантаження (рис.5.6).

У нашому випадку закріплення концентратором зусиль у диска 3 буде центральний отвір, та ділянка поверхні, яка контактує з торцем штоку, саме в цих зонах задаємо розмір скінчених елементів меншим за середній. Схему сітки розбиття диска 3 на скінченні елементи зображено на рисунку 5.7 табл.5.1.

Результати розрахунків навантаження за допомогою програмного продукту SOLIDWORKS [135] подані у вигляді діаграми розподілення напружень у структурі деталі диск 3 та діаграми переміщень елементів деталі диск 3 при деформації (рис.5.8 та рис.5.9). Результати розрахунків прогину краю диска показані на рис.5.10.

Корпус 2 камери пульсації (рис.5.11) у вібраційній машині конструктивно закріплено чотирма болтами крізь отвори по поверхні кола та циліндричною з різьбою в отворі.

Аналізуючи умови роботи деталі корпус 2 камери пульсації визначено, що концентраторами напружень буде різьбовий центральний отвір та кріпильні

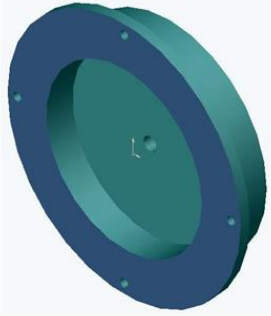
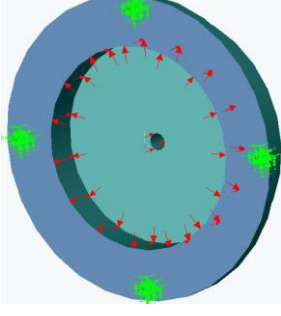
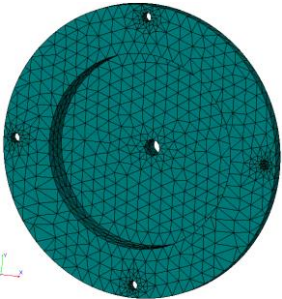
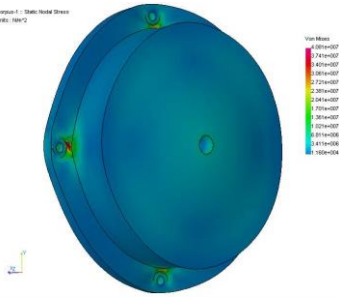
отвори. Проводимо прикладання відповідного навантаження (рис.5.12). Відповідно в цих зонах задаємо розмір комірки меншим (рис.5.13).

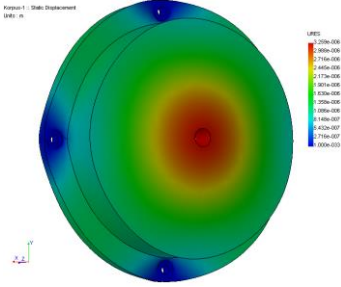
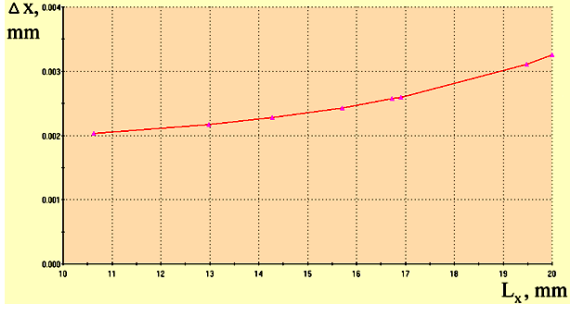
Результати розрахунків навантаження за допомогою програмного продукту SOLIDWORKS подані у вигляді діаграми розподілення напружень у структурі деталі корпус 2 та діаграми переміщень елементів деталі корпус 2 при деформації (рис. 5.14 та рис. 5.15).

Результати розрахунків прогину краю диску показані на рис.5.16 [135].

Таблиця 5.2

Етапи розрахунків за програмою SOLIDWORKS деталі корпус камери пульсації

1	2
	
Рис.5.11 - Корпус камери пульсації	Рис. 5.12 - Схема зусиль та навантажень, що діють на корпус.
	
Рис. 5.13 - Схема сітки розбиття корпусу на скінчені елементи	Рис. 5.14 - Схема розподілення напружень в структурі корпусу

1	2
	
<p>Рис. 5.15 - Схема переміщення елементів корпусу при деформуванні</p>	<p>Рис. 5.16 - Залежність прогину площини корпусу ΔX від її товщини t</p>

У результаті проведених досліджень [135] побудовані залежності прогину поверхонь диска рис.5.10 та камери пульсації рис.5.16 від їх товщини. Виходячи з критерію зниження інерційності диска та мінімального його прогину по краю 0,21 мм приймаємо товщину диска 3 мм та з урахуванням необхідних витків різьби кріплення камери приймаємо товщину площини корпусу камери пульсації 12 мм при її прогину на 0,0021 мм, що задовольняє її працездатність у вузлі пульсації.

5.5. Визначення енергетичних витрат приводу машини від конструктивних параметрів та режимів його роботи

Для вибору параметрів електродвигуна вібраційної машини та його потужності застосовуються результати по визначенню максимального тиску у камері пульсації (рис.2.10) з урахуванням частот коливання мембрани для мийки та частот коливання мембрани для очистки (див. розділ 4) $f = 14$ Гц, (840 об/хв.) та $f = 18$ Гц (1080 об/хв.).

Розрахунок сили на штокові ведемо за формулою:

$$F_1 = \frac{\pi \cdot D_M^2}{4} P, \quad (5.16)$$

де D_m^2 – діаметр мембрани, мм;

P – тиск у камері пульсації, МПа $P = 0,18 \text{ МПа}$ (вибираємо з рис.2.10).

Максимальне значення зусилля на штокові для модуля очистки:

$$F_1 = \frac{3,14 \cdot 100^2}{4} \cdot 0,18 = 1413 \text{ Н}.$$

Мінімальне значення зусилля на штокові для модуля мийки:

$$F_1 = \frac{3,14 \cdot 100^2}{4} \cdot 0,1 = 785 \text{ Н}.$$

Розрахунок крутного моменту на валу ексцентрика ведемо за формулою:

$$M_{кр} = F_1 \cdot A, \text{ Н} \cdot \text{м}, \quad (5.17)$$

де F_1 – сила на штокові мембрани;

A – плече, на яке прикладена сила від штока, дорівнює амплітуді коливань (величині ексцентритету), $A = 0,002 \text{ м}$.

Максимальне значення крутного моменту для модуля очистки:

$$M_{кр} = 1413 \cdot 0,002 = 2,83 \text{ Н} \cdot \text{м},$$

Мінімальне значення крутного моменту для модуля мийки:

$$M_{кр} = 785 \cdot 0,002 = 1,57 \text{ Н} \cdot \text{м},$$

Потужність електродвигуна розраховуємо за формулою:

$$N = \frac{M_{кр} \cdot n}{9549} \text{ кВт}. \quad (5.18)$$

Максимальне значення потужності двигуна для модуля очистки:

$$N = \frac{2,83 \cdot 1080}{9549} = 0,32 \text{ кВт}.$$

Максимальне значення потужності двигуна для модуля мийки:

$$N = \frac{1,57 \cdot 840}{9549} = 0,14 \text{ кВт.}$$

Приймаємо асинхронний електродвигун АИР 63 А6 для модуля очистки з наступними параметрами $N = 0,37$ кВт; $n = 1100$ об/хв., а для модуля мийки асинхронний електродвигун MS 712-6 0.25KW. $N = 0,25$ кВт; $n = 900$ об/хв.

5.6. Порівняння основних параметрів вібраційної машини для мийки та очистки з аналогами

Запропонована конструкція модульної вібраційної машини для очистки та мийки забруднень на деталях, легко та сильно зв'язаних з поверхнею деталей, при їх ремонті у дрібносерійному та одиничному виробництві.


Створено технічну документацію та експериментально-промислову модель вібраційної машини для очистки та мийки деталей, яка відзначається не великою енергоємністю та необхідною інтенсивністю технологічної дії. Оцінку рівня енергоємності та собівартості розробленої вібраційної машини виконано в порівнянні з існуючими аналогами та наведено у таблиці 5.3.

Таблиця 5.3

Порівняння основних характеристик розробленої машини з аналогами

№	Вид струминної машини	Амплітуда Коливань, мм	Частота Коливань, Гц	Потужність, кВт	Час оброблення, хв	Ціна, тис. грн
1	2	3			4	
1	Аналог машина для мийки РУМ-650					
		-	-	Двигуна насоса 1	В залежності виду забруднення 4-6	21,5

Закінчення таблиці 5.3

1	2	3				4
2	Аналог машина для мийки PERKUTE Clean-o-mat RC 68					
		-	-	Двигуна насоса 0,75	В залежн ості виду забруд нення 4-6	18,6
3	Спроектвана вібраційна машина					
	Вібраційна машина очистки та мийки зануреним пульсуючим струменем	Мийка 2 Очистка 2	Мийка 14 Гц Очистка 18 Гц	0,25 0,37	В залежн ості виду забруд нення 2-5	8,2

5.7. Висновки до розділу 5

1. Завдяки теоретичним та експериментальним дослідженням запропоновано загальну методику вибору конструктивних параметрів вузлів і проектування елементів приводу модулів очистки та мийки вібраційної машини з визначенням потужності електродвигунів.

2. Наведено методику проектування та розрахунку конструктивних елементів зворотного клапану для вузла утворення зануреного пульсуючого струменя у модулі вібраційної машини для очистки забруднень.

3. Наведено методику та приклад розрахунку і визначення оптимальних розмірів основних, найбільш динамічно навантажених деталей приводу, що необхідно для остаточного проектування та вибору конструктивних параметрів

елементів приводу установки за допомогою програмного продукту SOLIDWORKS.

4. Наведено порівняльний аналіз основних параметрів вібраційної машини для мийки та очистки у співставленні з аналогами, а саме порівняно споживану потужність і проведено порівняння економічних показників аналогів машин для мийки та очистки із запропонованою конструкцією вібраційної машини.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішена актуальна науково-технічна задача машинобудування, яка має важливе народногосподарське значення, що полягає у створенні нових конструкцій вібраційних машин для очищення та мийки деталей при ремонті з обґрунтуванням їх конструктивних параметрів і раціональних режимів роботи приводу та створення методики їх розрахунків.

Більш детально основні результати і висновки сформульовані наступним чином:

1. Проведений аналіз стану наукових досліджень застосування різних способів у процесах очищення та мийки поверхонь деталей показав, що процес очищення поверхні від забруднення проходить більш інтенсивно із застосуванням зануреного пульсуючого струменя з твердими частинками, а процес мийки більш інтенсивно проходить при застосуванні зануреного пульсуючого струменя з газовими пухирцями, які виникають в процесі кавітаційної дії на миючий водний склад і постає доцільність створення конструкцій вібраційних машин які реалізують ці переваги.

2. Аналіз існуючих теоретичних досліджень процесу очищення та мийки забруднень показав, що на поверхню із забрудненням від струменя діють сили гідродинамічного тиску рідини, що створюють нормальний тиск на поверхню забруднення та сили швидкісної дії потоку рідини, який при розтіканні по поверхні забруднення створює дотичні напруження тертя, що ініціюють процес мийки та очистки.

3. У результаті проведеного аналізу способів та сучасних конструкцій обладнання було запропоновано застосувати для мийки та очистки забруднень пульсуючий занурений струмінь рідини, який отримується із застосуванням вібраційного приводу з робочим органом у вигляді камери пульсації мембранного типу з насадком.

4. Побудовано аналітичні моделі процесу зміни тиску пульсуючого струменя ідеальної рідини у насадку камери пульсації вібраційної машини з

урахуванням гідравлічного удару та на основі диференціальних рівнянь руху рідини крізь насадок з урахуванням нерозривності потоку в залежності від конструктивних параметрів від режимів роботи приводу та проведено їх аналіз.

5. Проаналізовано аналітичну моделі роботи сопла-ежектора та встановлено, що втрати тиску у соплі вібраційної машини мають невеликі значення, тому у подальших розрахунках їх можна не враховувати.

6. Запропоновано залежність визначення величини продуктивності процесу очистки поверхні пульсуючим струменем з твердими частинками з урахуванням параметрів вібраційної машини та побудовані графічні залежності продуктивності від параметрів

7. Порівняльний аналіз результатів, отриманих за допомогою аналітичних моделей та експериментальним шляхом надав можливість встановити величину коефіцієнтів корегування аналітичних моделей, які будувалися з певними припущеннями та складністю достатньо коректно аналітично описати кавітаційні процеси у камері пульсації вібраційної машини.

8. У результаті проведених експериментальних досліджень встановлено, що застосування зворотного клапану мембранного типу у модулі для очистки вібраційної машини дозволяє збільшити величину максимального тиску зануреного пульсуючого струменя рідини на 0,045МПа при частотах коливання приводу від 16 до 18Гц, що дає можливість збільшити продуктивність процесу очищення забруднень.

9. Експериментально встановлено, що оптимальна частота коливання приводу модуля для мийки від 13 до 14Гц та амплітуда коливання 2мм при співвідношенні діаметра насадка до діаметра камери 1:10, а для модуля очистки раціональний діапазон частот коливання від 16 до 18Гц та амплітуда коливання 2мм при співвідношенні діаметра насадка до діаметра камери 1:10. Рекомендовано проводити процес очистки на відстані від сопла в межах від 30 до 60мм та при діаметрі 10мм. Рекомендований діапазон кутів атаки зануреного пульсуючого струменя рідини з твердими частинками до поверхні знаходиться в межах 125° - 130° .

10. Проведені дослідження мийки модельних забруднень підтвердили основні теоретичні припущення по механічній природі взаємодії миючої рідини із забрудненням та показали ефективність способу мийки із кавітаційними пухирцями та ефективність способу очистки пульсуючим струменем рідини з твердими частинками або металевими кульками із застосуванням зворотного клапана у камері пульсації вібраційної машини.

11. Запропоновано узагальнену методологію для розрахунку раціональних конструктивних і технологічних параметрів модулів вібраційної машини для мийки та очистки, а також методику проектування елементів зворотного клапану для вузла утворення пульсуючого струменя.

12. Наведено порівняльний аналіз основних параметрів вібраційної машини для мийки та очистки у порівнянні з аналогами, саме споживаної потужності і наведено економічні показники аналогів машин для мийки та очистки.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Тельнов Н. Ф. Технология очистки сельскохозяйственной техники. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Колос, 1983. 256с.
2. Тельнов Н. Ф. Технология очистки и мойки сельскохозяйственных машин. М.: Колос, 1973. 295с.
3. Козлов Ю. С., Кузнецов О. К., Тельнов Н. Ф. Мойка изделий в машиностроении. М. : Машиностроение, 1982. 264 с.
4. Козлов Ю. С. Очистка автомобилей при ремонте. М.: Транспорт, 1981.- 151 с.
5. Куликов, А. А. Исследование процесса мойки деталей пульсирующими струями при ремонте сельскохозяйственных машин: дис. ... канд. техн. наук. МИИСП. М. 1973. 168 с.
6. Динамика вертикальных колебаний очищаемых объектов в среде моющей жидкости / Тельнов Н. Ф. и др. *Техника в сельском хозяйстве*. 1978. № 3. С.71–75.
7. Очистка массивных объектов колебанием в среде моющей жидкости / Тельнов Н. Ф. и др. *Техника в сельском хозяйстве*. 1984. № 1. С. 49–50.
8. Основные параметры абразивно-кавитационной струи и их влияние на интенсивность мойки сельскохозяйственных машин / Латышенко М.Б. и др. *Вестник РГАТУ*. 2010. № 4. С. 65–66.
9. Савченко В. И. Очистка и мойка машин. М.: Россельхозиздат, 1974. 124 с.
10. Машина для очистки узлов методом погружения / Садовский А. и др. *Техника в сельском хозяйстве*. 1975. №2. С.81–83.
11. Фадеев, И. В., Белов И. В. К расчету продолжительности мойки загрязненных деталей. *Известия Международной академии аграрного образования*. 2016. №27. С. 5–8.

12. Садовский А. П. Мойка деталей гидравлическими струями при ремонте тракторов, автомобилей и сельскохозяйственных машин: дис. ... канд. техн. наук. МИИСП. М., 1972. 175 с.
13. Исследование некоторых вопросов интенсификации процесса струйной очистки машин / Садовский А. П. и др. М.: *Труды ГОСНИТИ*. 1975. т.44, С. 69–75.
14. Фадеев И. В., Садетдинов Ш. В. Выбор рационального режима мойки деталей, узлов и агрегатов транспортных средств. *Автотранспортное предприятие*. 2016. № 5. С. 28-31.
15. Фадеев И. В. Совершенствование технологического процесса мойки деталей при ремонте узлов и агрегатов транспортных средств: монография. Чебоксары: Изд-во Волжского филиала МАДИ, 2018. 284 с.
16. Современные способы повышения эффективности процесса очистки сельскохозяйственных машин / Шемякин А. В. и др. *Международный научный журнал*. 2017. № 2. С. 95–99.
17. Устройство для мойки техники / Шемякин А. В. и др. *Сельский механизатор*. 2009. № 3. С. 12.
18. Теоретические основы повышения эффективности струйной мойки сельскохозяйственных машин / Шемякин А. В. та др. *Ремонт, восстановление, модернизация*. 2010. № 11. С. 2.
19. Крутоус Е. Б., Некрич А. Н. Техника мойки изделий в машиностроении. М.: Машиностроение, 1969. 236 с., ил.
20. Белянин П. Н., Данилов В. М. Промышленная чистота машин. М.: Машиностроение, 1982. 224 с.: ил.
21. Автоматизация процесса мойки деталей / Долбэ Е. Е. и др. *Техника в сельском хозяйстве*. 1975. № 11. С. 52–54.
22. Ярулин М. Г. Методика и технология экспериментов по исследованию качества очистки в моечных машинах. *Труды Казанской государственной сельскохозяйственной академии (раздел: технические науки)*. т.70. Казань, 2001. С. 221–223.

23. Ярулин М. Г. Трехмерная гидродинамическая очистка изделий. Казань: Изд-во Казанского университета, 2001. 174 с.
24. Проволоцкий А. Е. Гидроабразивное разрушение металлических поверхностей. *Механическая обработка деталей машин и приборов*. Киев: Общество «Знание» УССР, 1976. С. 27.
25. Проволоцкий А. Е. Исследование процесса гидроабразивной обработки сложнопрофильных поверхностей : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня к-та. техн. наук : 05.02.08. Одеса, 1974. 20 с.
26. Проволоцкий А. Е. Механизация отделки деталей с использованием струйно-абразивной обработки. *Механизация и автоматизация производства*. 1990. № 5. С. 7–10.
27. Проволоцкий А. Е. Технологический эффект действия гидроабразивной струи. *Эффективность финишных методов обработки материалов в машиностроении и приборостроении*. 1978. С. 25–26.
28. Андилахай А. А. Абразивная обработка деталей затопленными струями. Мариуполь : ПГТУ, 2006. 190 с.
29. Андилахай А. А., Новиков Ф. В. Теоретические и экспериментальные исследования динамики струйно-абразивной обработки. *Вісник Приазов. держ. техн. ун-ту*: Зб. наук. пр. Серія: Технічні науки. Маріуполь: ДВНЗ “Приазов. держ. техн. ун-т”, 2010. Вип. 20. С. 206–212.
30. Андилахай А. А. Теоретический анализ параметров струйно-абразивной обработки деталей. *Вестник НТУ «ХПИ»*. 2009. № 1. С. 15–22.
31. Встановлення граничної швидкості атаки при дробоструминному очищенні / Горик О. В. та ін. *Проблеми та перспективи розвитку сільськогосподарського машинобудування: матеріали II Всеукр. інтернет-конф.*, 18-19 квіт. 2019 р. Полтава : ПДАА, 2019. С. 4–8.
32. Вибір економічно оптимальної швидкості атаки при дробеструменевому очищенні металевих поверхонь / Горик О. В. та ін. *Вісник Сумського національного аграрного університету. Серія «Механізація та автоматизація виробничих процесів»*. 2016. Вип. 10/3. С. 27–30.

33. Визначення оптимальних технологічних режимів дробеструменевого очищення металевих поверхонь / Горик О. В., Чернявський А. М., Ландар А. А., Шулянський Г. А. Полтава : ПДАА, 2012. 100 с.
34. Експериментальні дослідження впливу швидкості і кута атаки на технічні показники дробеструминного очищення / Горик О. В. та ін. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2016. № 3. С. 83–89.
35. Новіков Ф. В., Анділахай О. О. Основи струминно-абразивної обробки дрібних деталей: монографія. Харків : Вид. ХНЕУ ім. С. Кузнеця, 2014. 348 с.
36. Стоцько З. А., Стефанович Т. О. Енергетична концепція процесу струменевої обробки поверхонь незв'язними твердими тілами. *Автоматизація виробничих процесів у машино використанні та приладобудуванні*. 2005. Вип. № 39. С. 99–104.
37. Стоцько З. А., Стефанович Т. О. Загальні аспекти технології обробки поверхонь струменем незв'язаних твердих тіл. *Вісник Нац. університету «Львівська політехніка»*. 2004. № 515. С. 95–100.
38. Цыгановский А. Б. Технологические возможности гидроабразивной обработки затопленными струями. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2010. № 2. С. 205–215.
39. Цыгановский А. Б. Экспериментальное определение скорости абразивных частиц в затопленной гидроабразивной струе. *Ресурсозберігаючі технології виробництва та обробки тиском матеріалів у машинобудуванні: Зб. наук. пр. Луганськ: вид-во СЛУ ім В. Даля, 2008. С. 92–97.*
40. Шулянський Г. А., Брикун О. М. Автоматизація технологічного процесу дробеструменевого очищення сільськогосподарських резервуарів. Динаміка та міцність енергетичних і сільськогосподарських машин та біотехнічних систем: колективна монографія. Полтава, 2015. С. 84–87.
41. О механизме интенсификации процесса мойки деталей машин в пульсирующем газожидкостном потоке Сообщение 1. / Силин Р. И. и др.

Известия вузов. Технология легкой промышленности. 1985. Т 28, №5. С. 121–124.

42. Гордеев А. И., Савицкий Ю. В. Реологична модель вібраційного гідропульсатора. *Машинознавство.* 2004. №1(79). С. 32–34.

43. О механизме интенсификации процесса мойки деталей машин в пульсирующем газожидкостном потоке. Сообщение 2. / Силин Р. И. и др. *Известия вузов. Технология легкой промышленности.* 1985. №6. С.128–131.

44. Сілін Р. І., Гордєєв А. І. Вібраційне обладнання на основі гідропульсатора: монографія. Хмельницький : ХНУ, 2007. 386 с.

45. Спринг С. Очистка поверхности металлов. Перевод с английского Т. П. Колоса. Под ред. к. т. н. О.И. Бабилова. М., «Мир», 1966. 350 с.

46. Chen J., Desai D., Heyns S., Pietra F. Literature review of numerical simulation and optimisation of the shot peening process. *Advances in Mechanical Engineering.* 2019. Vol. 11(3). pp. 1–19. DOI: 10.1177/1687814018818277.

47. Frija M., Hassine T., Fathallah R., Bouraoui C., Dogui A. Finite element modelling of shot peening process : Prediction of the compressive residual stresses, the plastic deformations and the surface integrity. *Materials Science and Engineering.* 2006. № 426. pp. 173–180. DOI: 10.1016/j. msea. 2006.03.097.

48. Li Z., Yang F., Liu Y., Gao Y. Numerical simulation of derusting treatment of steel parts by shot blast. *CMES-Computer Modeling in Engineering & Sciences.* 2019. Vol. 120, N° 1. pp. 157–175. DOI: 10.32604/cmes.2019.05187.

49. Hiltinen K., Jasberg A., Kallio S. Multiphase Flow Dynamics. *Theory and Numerics.* Helsinki: Edita Prima Oy. 2009. 113 p.

50. Latz A., Schmidt S. Hydrodynamic modeling of dilute and dense granular flow. *Granul Matter* 12 (4). 2010. pp. 387–397.

51. Helland E., Occelli E., Tadriss L. Numerical study of cluster and particle rebound effects in a circulating fluidized bed. *Chemical engineering science.* 2005. 60. pp.27–40.

52. Ciampini D., Spelt J. K., Papini M. Simulation of interference effects in particle streams following impact with a flat surface. *Part I. Theory and analysis*. *Wear* 254. 2003. pp. 237–249.

53. Ciampini D., Spelt J. K., Papini M. Simulation of interference effects in particle streams following impact with a flat surface. Part II. Parametric study and implications for erosion testing and blast cleaning. *Wear* 254 (2003). pp. 250–264.

54. Келлер О. К., Кратыш Г. С., Лубяницкий Г. Д. Ультразвуковая очистка. Л.: Машиностроение, 1977. 184 с., ил.

55. Старий А. Р., Гордєєв А. І. Технологія очистки та мийки забруднень деталей машин при ремонті потоком рідини з твердими частками та вібраційна машина для її реалізації. *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*. №4. т.2. 2019. С. 7–14. . DOI 10.31891/2307-5732-2019-275-4-7-14.

56. Исследование способа мойки деталей сельскохозяйственных машин от консервационного материала с использованием устройства струйно-щеточного действия / А. В. Шемякин и др. *Вестник РГАТУ*. 2012. № 3. С. 51–53.

57. Имитационное моделирование процесса обработки потоком абразивных частиц / Проволоцкий А. Е. и др. *Изв. вузов. Машиностроение*. 1987. № 4. С. 112–116.

58. Проволоцкий А. Е. Струйно-абразивная обработка деталей машин. К.: Техника, 1989. 177 с.

59. Анділахай О. О. Наукові основи ефективної оздоблювальної абразивної обробки деталей затопленими струменями : дис. ... д-ра. техн. наук : 05.02.08 / Одеса. 2013. 533 с.

60. Анділахай А. А. Методика и описание экспериментально-аналитического исследования процесса абразивной обработки деталей затопленными струями. *Захист металургійних машин від поломок: Зб. наук. пр. Маріуполь: ПДТУ, 2003. Вип. 7. С. 205–213.*

61. Анділахай А. А. Методы очистки металлических поверхностей от

окалины и коррозии. *Вісн. Харків. нац. техн. ун-ту сільськ. госп-ва ім. Петра Василенка*: Зб. наук. пр. Харків: ХНТУСГ, 2010. Вип. 101. С. 241–245.

62. Андилахай А. А., Новиков Ф. В. Аналитические исследования энергоёмкости абразивной обработки деталей затопленными струями. *Наук. пр. Донецьк. нац. техн. ун-ту. Серія: Машинобудування і машинознавство*. Донецьк: ДонНТУ, 2012. Вип. 9 (205). С. 49–54.

63. Андилахай А. А. Определение областей эффективного применения абразивной обработки затопленными струями. *Захист металургійних машин від поломок: Зб. наук. пр.* Маріуполь: ПДТУ, 2012. Вип. 14. С. 217–223.

64. Цыгановский А. Б. Эффективность гидроабразивной обработки затопленными струями. *Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля*. 2002. №7 (53). С. 261–264.

65. Цыгановский А. Б. О влиянии геометрических характеристик струйных аппаратов на производительность гидроабразивной обработки затопленными струями. *Вопросы вибрационной технологии*. Ростов-на-Дону, ДГТУ. 2003. С. 109–112.

66. Цыгановский А. Б. Определение степени влияния коэффициента эжекции и скоростного напора струи на эффективность гидроабразивной обработки затопленными струями. *Вісник СХУ ім. В. Даля*. № 7 (89). 2005. С. 234–239.

67. Брикун О. М. Удосконалення технології дробоструминного очищення внутрішніх поверхонь корпусних виробів типу тіл обертання : дис. канд. техн. наук : 05.02.08 / Полтава. 2021. 196 с.

68. Петросов В. В. Гидродробеструйное упрочнение деталей машин и инструмента. М. : Машиностроение, 1977. 166 с.

69. Кирилин А. В. Теоретические аспекты устранения загрязнения сельскохозяйственной техники. *Современная наука*. 2017. № 4-1. С. 38-41.

70. Зимон А. Д. Адгезия пыли и порошков . М.: Химия, 1976. 431 с.

71. Черненко Ж. С. Топливные системы транспортных самолетов. М. Редиздат МГА, 1970. 270 с.

72. Бернулли Д. Гидравлика или записки о силах и движениях жидкости. М.: ГИТТЛ, 1959. 248 с.
73. Левич В. Г. Физико-химическая гидродинамика. М.: Гос. изд. физ.-мат. лит., 1959. 354 с.
74. Протодьяконов И. О., Сыщиков. Ю. В Турбулентность в процессах химической технологии. Л.: Наука, 1983. 318 с.
75. Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа. Изд. 5-е, перераб. и доп. М.: Наука, 1978. 736 с.
76. Рождественский В. В. Кавитация. Л.: Судостроение, 1977. 248 с., ил.
77. Рид Р. и др. Свойства газов и жидкостей. Л.: Химия, 1982. 591 с.
78. А. с.1297952 СССР, МКИ³ В08В7/02. Устройство для очистки мелких изделий / А.И. Гордеев, М.А. Фетисов, С.А. Дытюк. №3978755/31– 12; заяв. 22.11.85; опубл. 23.03.87, Бюл. №11.
79. А. с. 880519 СССР, МКИ³ В08В3/10. Устройство для промывки деталей / Р.И. Силин, В.П. Кошель, А.И. Гордеев. №2869224/28 – 12; заяв.17.12.79; опубл.15.11.81, Бюл. №42.
80. А. с. 1130422 СССР, МКИ³ В08В3/10. Устройство для мойки мелких деталей / А.И. Гордеев, Р.И. Силин, Н.А. Сивченко. №3613130/28 – 12; заяв.05.04.83; опубл. 23.12.84, Бюл. №47.
81. Herringe P. A., Davis M. R. Structural development of gas-liquid mixture flows. *I. Fluid Mech.* 1976. vol.73. pt.1. p.97–123.
82. Serizava A., Kataoka I., Michioishi I. Turbulense structure of air – water bubbles flow. *Intevhat I Multiphase Flow.* 1975. vol 2. pt 1. 84–95.
83. Валукина Н. В., Кашинский О. Н. Исследование напряжения трения на стенке в монодисперсном газожидкостном потоке. *ПМТФ.* 1979. №1. С.73–76.
84. Кутателадзе С. С., Стырикович М. А. Гидродинамика газожидкостных систем. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Энергия, 1975. 296 с.

85. А. с. 678097 СССР, МКИ³ С23G3/00. Устройство для мойки / Р.И. Силин, В.П. Кошель, Н.И. Шандабура, Н.Н. Косиук, Я.Н. Эльгорт, А.И. Гордеев, В.А. Осипов. № 2483930/22-02; заяв.03.05.77; опубл.05.08.79, Бюл. №29.
86. Сілін Р. І. Застосування гідропульсаторів у технології чистки та миття / Сілін, Р.І. та ін. *Технологічний університет в системі реформування освітньої та наукової діяльності Подільського регіону*: Тез. доп. наук.-практ. конф. Хмельницький, 1995. С. 322.
87. Взаимодействие двухфазного турбулентного потока с вязким загрязнением / Силин Р. И. и др. *Проблемы трибологии*. 1996. №1. С. 87–89.
88. Келлер О. К., Кратыш Г. С., Лубяницкий Г. Д. Ультразвуковая очистка. Л.: Машиностроение, 1977. 184 с.
89. Хорбенко И. Г. Ультразвук в машиностроении. Изд . 2-е, перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1974. 280 с.
90. Зарембо Л. К., Красильников Л. К. Введение в нелинейную акустику. М.: Наука, 1966. 342 с.
91. Панов А. П. Ультразвуковая очистка прецизионных деталей. М.: Машиностроение, 1984. 88 с.
92. Патент РФ 2024336 Устройство для очистки деталей В08В3/10 / Абрашкин А. М., Громаковский Д. Г., Комаров Г. Л., Матвеева Е. А. подача заяв. 06.24.91; опубл.15.12.94.
93. Разработка низкочастотных кавитационных устройств для мойки поверхностей деталей машин и приборов / Громаковский Д. Г. и др. *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. т. 13, №1(3), 2011.
94. А. с. 1397093 СССР, МКИЗ В08 В 3/02. Машина для мойки изделий / Н.Г. Кеслер, Л.И. Гордон. №4679353–12; заяв.14.06.85; опубл.23.05.88, Бюл. №19.
95. А. с. 1335334 СССР, МКИЗ В08 В 3/02. Установка для очистки изделий / В.Я. Самийленко, А.А. Дуканич. №5378045–12; заяв.15.08.85; опубл. 07.09.87, Бюл. №33.

96. А. с. 1674982 СССР, МКИЗ В08 В 3/02. Установка для мойки изделий / В.Н. Писаренко. №48475836; заяв.12.08.89; опубл. 07.09.91, Бюл. №33.

97. А. с. 1139795 СССР, МКИЗ В08 В 3/10. Способ очистки поверхности изделий / С.Н. Ткаченко, В.И. Пеньков. №356983-12; заяв.14.06.89; опубл. 16.02.91, Бюл. №13.

98. Громаковский Д. Г., Шигин С. В. Разработка кавитационного оборудования для мойки деталей. *Высокие технологии в машиностроении : материалы XVII Всероссийской научно технической конференции*. Самара. 2018. С. 5–7.

99. Патент RU 2414308 В08В3/10. Способ гидрокавитационной очистки деталей и устройство для его осуществления. / В.П. Родионов. НПП «Экотехнологии». опубл. 20.03.11.

100. Патент RU № 115250, МПК В08В1/00. Устройство для механической мойки деталей / А.В. Шемякин, М.Б. Латышенок, М.Ю. Костенко, А.В. Подъяблонский, В.Н. Володин. № 2011146177; заявл. 14.11.11; опубл. 27.04.12, Бюл. № 12.

101. Патент RU 26498, МПК В60S1/00. Устройство для мойки транспортных средств / Р.А. Паюров, М.Б. Латышенок, С.Г. Малюгин, А.В. Шемякин. № 2002113262/20; заявл. 24.05.02 ; опубл. 10.12.02.

102. Патент RU № 115250, МПК В08В1/00. Устройство для механической мойки деталей / А.В. Шемякин, М.Б. Латышенок, М.Ю. Костенко, А.В. Подъяблонский, В.Н. Володин. № 2011146177; заявл. 14.11.11; опубл. 27.04.12, Бюл. № 12.

103. Патент RU 2441781, МПК В60S1/00, В08В3/02. Устройство для мойки двигателей / А.В. Шемякин, К.А. Жильцов, Н.М. Тараканова. № 2010132396/11 ; заявл. 02.08.10 ; опубл. 10.02.12, Бюл. № 4.

104. Вібраційна машина для очистки забруднень потоком твердих часток та мийки деталей при ремонті обладнання: пат. 132837 Україна : МПК В08В 3/10. u2018 10344 ; заявл. 19.10.18; опубл. 11.03.19, Бюл. №5.

105. Старий А.Р., Гордєєв А.І., Гордєєв О.А. Вібраційна машина для очистки та мийки. *Science and civilization – 2020: 2020 рік : materials of the XVI International scientific and practical Conference. 30 January – 07 February, 2020. Sheffield : Science and education LTD, 2020. С. 67–71.*

106. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. М.: Наука, 1969. 742 с.

107. Соколов В.І., Кроль О.С., Єпіфанова О.В. Гідравліка: Навчальний посібник. Сєверодонецьк: вид-во СНУ ім. В. Даля, 2017. 160 с.

108. Старий А. Р., Гордєєв А. І. Обґрунтування параметрів динамічних процесів очистки та мийки у вібраційній машині зануреним пульсуючим струменем рідини з твердими частинками. *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. №6. 2020. С. 84–92. DOI 10.31891/2307-5732-2020-291-6-84-92.*

109. Старий А. Р., Гордєєв А. І. Аналіз аналітичних моделей вібраційного приводу машини для мийки і очистки пульсуючим струменем рідини та експериментальне дослідження режимів його роботи. *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. №4. 2021. С. 77–83. DOI 10.31891/2307-5732-2021-299-4-77-83.*

110. Сілін Р. І., Гордєєв А. І., Савицький Ю. В. Визначення характеристики деформаційної здатності мембрани пульсаційної камери устаткування для очищення. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. № 2. 1997. С. 67–70.*

111. Справочник по гидравлике / под ред. В. А. Большакова. 2-е изд., перераб. и доп. К. : Вища школа, 1984. 343 с.

112. К вопросу об определении расходной характеристики эрлифта на основе гидравлических уравнений течения газожидкостных смесей в вертикальных трубах / Криль С. И. и др. *Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки. Науково-технічний збірник. Випуск 25. К.: КНУБА. 2013. С.131–137.*

113. Майоров А. В., Яйцева Н. Э. Анализ воздействия струй на очищаемый объект. *International Journal of Humanities and Natural Sciences*, vol.5, part 1. 2019. С. 217–219.

114. Цыгановский А. Б. Производительность гидроабразивной обработки затопленными струями. Збірник наукових праць Східноукраїнського державного університету. *Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції “Проблеми електронної промисловості у перехідний період”*. Луганськ. СУДУ. 1998. С. 48–51.

115. Андилахай А. А. Условия повышения производительности абразивной обработки. *Вісник НТУ “ХП”*. №53(959). 2012. С. 42–47.

116. Старий А.Р., Гордєєв А.І. Використання багатофазних середовищ для очистки та мийки забруднень деталей машин. *VIII Українсько-Польські Наукові Діалоги: 2019 рік* : тези доповідей VIII Міжнародної наук.-техн. конф., 16 – 19 жовт. 2019 р. Хмельницький : ХНУ, 2019. С. 83–84.

117. Старий А. Р., Гордєєв А. І., Сілін І. Р. Визначення оптимальних конструктивних параметрів та режимів роботи приводу вібраційної машини для мийки зануреним пульсуючим струменем рідини з твердими частинками. *Europejska XXI powieka – 2021: 2021: materialy XVII Miedzynarodowej nauk.-prakt. konf.*, 07 – 15 maja, 2021 roku. Przemysl : Nauka I studia, 2021. С. 71–76.

118. Staryi A. R., Hordeev A. I. Research the impact on productivity of parameters and operating modes of the vibration machine drive for cleaning and washing contamination by submerget stream jet with sold particles. *East European science journal*. V.1.4 (68) 2021. pp. 46–52. doi.org / 10.31618/ESSA.2782-1994.2021.1.68.

119. Старий А. Р. Експериментальне дослідження параметрів приводу вібраційної машини для мийки і очистки зануреним пульсуючим струменем рідини з твердими частинками та визначення її продуктивності. *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*. №5. 2021. С. 52–58. DOI 10.31891/2307-5732-2021-301-5-52-58.

120. Старий А. Р., Гордєєв А. І. Експериментальне дослідження процесу мийки забруднення пульсуючим струменем рідини з кавітаційними пухирцями. IX Українсько-Польські наукові діалоги: *Тези наукових праць міжнародної наукової конференції*. 20-23 жовтня 2021р. Хмельницький: ХНУ, 2021. С. 153–155.
121. Адлер Ю. П., Маркова Е. В., Грабовский Ю. В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. М.: Наука, 1976. 279 с.
122. Душинський В. В. Основи наукових досліджень [Теорія і практикум з програмним забезпеченням] К.: НТУУ «КПІ», 1988. 408 с.
123. Тихомиров В. Б. Планирование и анализ эксперимента (при проведении исследований в легкой и текстильной промышленности). М.: Легкая индустрия, 1974. 263 с.
124. Спиридонов А. А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов. М.: машиностроение, 1981. 184 с.
125. Скіцько І. Ф, Скіцько О. І. Обробка результатів фізичних вимірювань. [Електронний ресурс]: навч. посіб. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. 88 с.
126. Нарынян А. Р. Поздеев В. А. Основы научных исследований . К.: Изд - во Европейского ун-та, 2002. 110 с.
127. Сиов Б. Н. Истечение жидкости через насадки. М.: Машиностроение, 1968. 139 с.
128. Старий А.Р., Гордєєв А.І. Аналіз процесу взаємодії газорідного середовища з поверхнею деталей при мийці перед нанесенням покриттів. *Проблеми довговічності матеріалів, покриттів та конструкцій: 2018 рік* : тези доповідей VI Міжнародної наук.-техн. конф., 13 – 15 верес. 2018 р. Вінниця : ВНТУ, 2018. С. 14–15.
129. Поршневые компрессоры: Учебное пособие для студентов. / Б.С. Фотин, И.Б. Пирумов, И.К. Прилуцкий, П.И. Пластинин Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1987. 372 с.

130. Гідроприводи та гідропневмоавтоматика: Підручник / В. О. Федорець, М. Н. Педченко, В. Б. Струтинський та ін. За ред. В. О. Федорця. К: Вища школа, 1995. 463 с
131. Герасімов Є. Г., Герасимов Г. Г., Іванов С. Ю. Динамічні процеси в трубопровідних системах : монографія. Рівне : НУВГП, 2020. 597 с.
132. Гузенков П. Г. Детали машин : Учеб. для вузов. М.: Висш.шк., 1986. 359 с.
133. Алямовский А. А. Инженерные расчеты в SolidWorks Simulation. М.: ДМК Пресс, 2010. 464 с.
134. Старий А., Гордєєв А. Розробка технології та конструкції вібраційної машини для очистки та мийки деталей обладнання легкої промисловості при ремонті. *Вібрації в техніці та технологіях*: 2018 рік : тези доповідей XVII Міжнародної наук.-техн. конф., 11 – 12 жовт. 2018 р. Дрогобич : Посвіт, 2018. С. 62–63.
135. Старий А. Р., Гордєєв А. І. Особливості методики визначення параметрів конструктивних елементів вузла пульсації вібраційної машини для очистки та мийки у Cosmos Works. *Proceedings of the 9th International Scientific and Practical Conference «International Forum: Problems and Scientific Solutions»* (February 6-8, 2022). Melbourne, Australia: CSIRO Publishing House, 2022. С.465-470.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ ТА
ВІДОМОСТІ ПРО АПРОБАЦІЮ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у закордонних наукових періодичних виданнях:

1. Staryi A. R., Hordeev A. I. Research the impact on productivity of parameters and operating modes of the vibration machine drive for cleaning and washing contamination by submerget stream jet with sold particles. *East European science journal*. 2021. Vol.1, №4(68). pp. 46–52. doi.org/10.31618/ESSA.2782-1994.2021.1.68.

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

2. Старий А. Р., Гордєєв А. І. Технологія очистки та мийки забруднень деталей машин при ремонті потоком рідини з твердими частками та вібраційна машина для її реалізації. *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*. 2019. №4, т.2. С. 7–14. DOI 10.31891/2307-5732-2019-275-4-7-14.

3. Старий А. Р., Гордєєв А. І. Обґрунтування параметрів динамічних процесів очистки та мийки у вібраційній машині зануреним пульсуючим струменем рідини з твердими частинками. *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*. 2020. №6. С. 84–92. DOI 10.31891/2307-5732-2020-291-6-84-92.

4. Старий А. Р., Гордєєв А. І. Аналіз аналітичних моделей вібраційного приводу машини для мийки і очистки пульсуючим струменем рідини та експериментальне дослідження режимів його роботи. *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*. 2021. №4. С. 77–83. DOI 10.31891/2307-5732-2021-299-4-77-83.

5. Старий А. Р. Експериментальне дослідження параметрів приводу вібраційної машини для мийки і очистки зануреним пульсуючим струменем рідини з твердими частинками та визначення її продуктивності. *Вісник*

Хмельницького національного університету. Технічні науки. 2021. №5. С. 52–58. DOI 10.31891/2307-5732-2021-301-5-52-58.

Патент на корисну модель України:

6. Вібраційна машина для очистки забруднень потоком твердих часток та мийки деталей при ремонті обладнання: пат. 132837 Україна : МПК В08В 3/10. u2018 10344 ; заявл. 19.10.18; опубл. 11.03.19, Бюл. №5.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

7. Старий А., Гордєєв А. Розробка технології та конструкції вібраційної машини для очистки та мийки деталей обладнання легкої промисловості при ремонті. *Вібрації в техніці та технологіях: 2018 рік* : тези доповідей XVII Міжнародної наук.-техн. конф., 11 – 12 жовт. 2018 р. Дрогобич : Посвіт, 2018. С. 62–63.

8. Старий А. Р., Гордєєв А. І. Аналіз процесу взаємодії газорідного середовища з поверхнею деталей при мийці перед нанесенням покриттів. *Проблеми довговічності матеріалів, покриттів та конструкцій: 2018 рік* : тези доповідей VI Міжнародної наук.-техн. конф., 13 – 15 верес. 2018 р. Вінниця : ВНТУ, 2018. С. 14–15.

9. Старий А. Р., Гордєєв А. І. Використання багатофазних середовищ для очистки та мийки забруднень деталей машин. *VIII Українсько-Польські Наукові Діалоги: 2019 рік* : тези доповідей VIII Міжнародної наук.-техн. конф., 16 – 19 жовт. 2019 р. Хмельницький : ХНУ, 2019. С. 83–84.

10. Старий А. Р., Гордєєв А. І., Гордєєв О. А. Вібраційна машина для очистки та мийки. *Science and civilization – 2020: 2020 рік* : materials of the XVI International scientific and practical Conference. 30 January – 07 February, 2020. Sheffield : Science and education LTD, 2020. С. 67–71.

11. Старий А. Р., Гордєєв А. І., Сілін І. Р. Визначення оптимальних конструктивних параметрів та режимів роботи приводу вібраційної машини для мийки зануреним пульсуючим струменем рідини з твердими частинками. *Europejska XXI powieka – 2021: 2021: materialy XVII Miedzynarodowej nauk.-prakt. конф., 07 – 15 maja, 2021 roku. Przemysl : Nauka I studia, 2021. С. 71–76.*

12. Старий А. Р., Гордєєв А. І. Експериментальне дослідження процесу мийки забруднення пульсуючим струменем рідини з кавітаційними пухирцями. *IX Українсько-Польські Наукові Діалоги: 2021 рік* : тези доповідей IX Міжнародної наук.-техн. конф., 20 – 23 жовт. 2021 р. Хмельницький : ХНУ, 2021. С. 153–155.

13. Старий А. Р., Гордєєв А. І. Особливості методики визначення параметрів конструктивних елементів вузла пульсації вібраційної машини для очистки та мийки у Cosmos Works. *Proceedings of the 9th International Scientific and Practical Conference «International Forum: Problems and Scientific Solutions»* (February 6-8, 2022). Melbourne, Australia: CSIRO Publishing House, 2022. С.465-470.

АКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ



«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Директор ВСП «Львівський фахового коледж індустрії моди Київського національного університету технологій та дизайну»

Неля КРЕДЕНЕЦЬ
Неля КРЕДЕНЕЦЬ

« 13 » 01 2022 р.

АКТ

про впровадження в навчальний процес у ВСП «Львівський фаховий коледж індустрії моди Київського національного університету технологій та дизайну» результатів дисертації на здобуття ступеня доктора філософії Старого А.Р. за темою «Обґрунтування параметрів вібраційної машини для очищення та мийки деталей при ремонті»

Даний акт складений про те, що в навчальному процесі на цикловій комісії галузевого машинобудування при викладанні дисциплін: «Технологія ремонту побутової техніки», «Прикладна механіка» впроваджені і використовуються наступні результати дисертації на здобуття ступеня доктора філософії Старого А.Р., а саме:

- розроблені концепції побудови і методика інженерних розрахунків вібраційних машин для очищення та мийки деталей затопленими пульсуючими струменями миючої рідини при ремонті, завдяки яким молодші спеціалісти, які працюватимуть у цьому напрямку, матимуть можливість впроваджувати у виробництво високоефективні та надійні зразки вібраційних машин;

- теоретичні і експериментальні результати дали можливість встановити нові співвідношення конструктивних параметрів вібраційної машини для очищення поверхонь деталей від забруднень та мийки, рекомендувати раціональні частотні границі роботи вібраційного приводу машини.

Впровадження цих результатів в навчальний процес сприяє ширшому ознайомленню учнів з проблемами технологічних процесів забезпечення точності та якості обробки деталей машин, проектування конструкцій машин в машинобудуванні та досягнення якості їх збирання та дозволяє підвищити теоретичний і практичний рівень підготовки молодших спеціалістів за напрямом «Інженерна механіка».

Заступник директора з навчальної роботи

Ольга СКОРОПАД

Голова ЦК галузевого машинобудування

Тамара КОШЕЛЕНКО



«ЗАТВЕРДЖУЮ»
 Директор ТДВ «Власта»
 Володимир ЗВОНАР
 23 грудня 2021 р.



АКТ
 передачі результатів
 дисертаційної роботи на здобуття ступеня доктора філософії
 Старого Андрія Романовича

Комісія у складі голови – головного інженера ТДВ «Власта» Анни Воловець, членів комісії: головного механіка ТДВ «Власта» Степана Околіти, аспіранта кафедри технології машинобудування ХНУ Андрія Старого, склала цей акт про те, що результати наукових досліджень та практичних рекомендацій дисертаційної роботи на здобуття ступеня доктора філософії Старого А.Р. за темою: «Обґрунтування параметрів вібраційної машини для очищення та мийки деталей при ремонті» та результати, що отримані у ролі виконавця держбюджетної теми: «Обґрунтування конструктивних параметрів, режимів роботи вібраційної машини для очистки та мийки деталей та дослідження її працездатності» (№ державної реєстрації 0121U110967), передані ТДВ «Власта» і прийняті для використання та впровадження.

Зокрема із теоретичних та практичних результатів роботи було використано:

- рекомендації по застосуванню методу очистки та мийки у ваннах зануреним пульсуючим струменем м'якої рідини з твердими частинками.
- технологію очистки та мийки деталей обладнання зануреним пульсуючим струменем, конструктивна схема вібраційної машини, оптимальні співвідношення конструктивних параметрів та рекомендації по вибору раціональних режимів роботи приводу вібраційної машини;
- комплект робочих креслень вібраційної машини для очистки та мийки і рекомендації по її налагодженню та експлуатації.

Використання цих результатів дасть змогу механізувати процеси очистки та мийки деталей при виконанні ремонту технологічного обладнання, підвищити якість чистоти поверхонь його деталей перед збиранням, зменшити час ремонтного періоду.

Головний інженер ТДВ «Власта»

Анна ВОЛОВЕЦЬ

Головний механік ТДВ «Власта»

Степан ОКОЛИТА

Аспірант кафедри технології
 машинобудування ХНУ

Андрій СТАРИЙ



Handwritten signatures of Anna Volovets, Stepan Okolita, and Andriy Staryi.



АКТ
 передачі результатів
 дисертаційної роботи на здобуття ступеня доктора філософії
 Старого Андрія Романовича

Комісія у складі голови – заступника директора ТОВ «Ролада» Миколи Дзюбатового, членів комісії: начальника виробництва ТОВ «Ролада» Ірини Гаєвської, аспіранта кафедри технології машинобудування ХНУ Андрія Старого, склала цей акт про те, що результати наукових досліджень та практичних рекомендацій дисертаційної роботи на здобуття ступеня доктора філософії Старого А.Р. за темою: «Обґрунтування параметрів вібраційної машини для очищення та мийки деталей при ремонті» та результати, що отримані у ролі виконавця держбюджетної теми: «Обґрунтування конструктивних параметрів, режимів роботи вібраційної машини для очистки та мийки деталей та дослідження її працездатності» (№ державної реєстрації 0121U110967), передані ТОВ «Ролада» і прийняті для використання та впровадження.

Зокрема із теоретичних та практичних результатів роботи було використано:

- рекомендації по застосуванню методу очистки та мийки у ваннах зануреним пульсуючим струменем миючої рідини з твердими частинками.
- технологію очистки та мийки деталей обладнання зануреним пульсуючим струменем, конструктивна схема вібраційної машини, оптимальні співвідношення конструктивних параметрів та рекомендації по вибору раціональних режимів роботи приводу вібраційної машини;
- комплект робочих креслень вібраційної машини для очистки та мийки і рекомендації по її налагодженню та експлуатації.

Використання цих результатів дасть змогу механізувати процеси очистки та мийки деталей при виконанні ремонту технологічного обладнання, підвищити якість чистоти поверхонь його деталей перед збиранням, зменшити час ремонтного періоду.

Заступник директора ТОВ «Ролада»

Микола ДЗЮБАТИЙ

Начальник виробництва ТОВ «Ролада»

Ірина ГАЄВСЬКА

Аспірант кафедри технології
 машинобудування ХНУ

Андрій СТАРИЙ

ПАТЕНТ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ УКРАЇНИ



(11) **132837**(19) **UA**(51) МПК
B08B 3/10 (2006.01)

- | | |
|---|--|
| <p>(21) Номер заявки: u 2018 10344</p> <p>(22) Дата подання заявки: 19.10.2018</p> <p>(24) Дата, з якої є чинними права на корисну модель: 11.03.2019</p> <p>(46) Дата публікації відомостей про видачу патенту та номер бюлетеня: 11.03.2019, Бюл. № 5</p> | <p>(72) Винахідники:
Скиба Микола Єгорович, UA,
Старий Андрій Романович, UA,
Гордєєв Анатолій Іванович, UA,
Гордєєв Олексій Анатолійович, UA</p> <p>(73) Власники:
Скиба Микола Єгорович,
вул. Інститутська, 3, кв. 52, м.
Хмельницький, 29013, UA,
Старий Андрій Романович,
вул. Дем'янська, 16, кв. 45, м.
Львів, 79031, UA,
Гордєєв Анатолій Іванович,
вул. Водопровідна, 44/1, кв. 4,
м. Хмельницький, 29000, UA,
Гордєєв Олексій Анатолійович,
вул. Водопровідна, 44/1, кв. 4,
м. Хмельницький, 29000, UA</p> |
|---|--|

(54) Назва корисної моделі:

ВІБРАЦІЙНА МАШИНА ДЛЯ ОЧИСТКИ ЗАБРУДНЕНЬ ПОТОКОМ ТВЕРДИХ ЧАСТОК ТА МИТТЯ ДЕТАЛЕЙ ПРИ РЕМОНТІ ОБЛАДНАННЯ

(57) Формула корисної моделі:

Вібраційна машина для очистки забруднень потоком твердих часток та миття деталей при ремонті обладнання, що містить дві ванни з кришкою, два корпуси камер пульсації, дві мембрани з дисками, що за допомогою штока з'єднані з вібраційним приводом, яка відрізняється тим, що у ванну очищення, яка з'єднана з камерою пульсації мембранним клапаном, встановлено сітчастий контейнер, у якому розміщено сопло над сіткою з твердими частками і вісь сопла, співвісна з віссю насадка, у ванні для миття на дні встановлено насадок, з'єднаний з камерою пульсації, а кришка встановлена на роликах у напрямних, а конструктивні параметри і режими роботи вібраційного приводу вибирають за умови:

$$f = \frac{D_n^2}{2D_k^2 \cdot A} \sqrt{\frac{P}{\gamma}}$$

де f - частота коливань мембрани, Гц; D_n - діаметр насадка, D_k - діаметр мембрани камери пульсації, $(D_n^2 / D_k^2 = 12-14)$; P - тиск у рідині, $P = 0,12 - 0,15$ МПа ; A - амплітуда коливань мембрани камери пульсації, $A = (2 \div 3) \cdot 10^{-3}$ м; γ - питома вага рідини, $\gamma = 1000$ Н/м³.

(11) 132837

Державне підприємство
«Український інститут інтелектуальної власності»
(Укрпатент)

Оригіналом цього документа є електронний документ з відповідними реквізитами, у тому числі з накладеним електронним цифровим підписом уповноваженої особи Міністерства економічного розвитку і торгівлі України та сформованою позначкою часу.

Ідентифікатор електронного документа 3368070319.

Для отримання оригіналу документа необхідно:

1. Зайти до ІДС «Стан діловодства за заявками на винаходи та корисні моделі», яка розташована на сторінці <http://base.uipv.org/searchInvStat/>.
2. Виконати пошук за номером заявки.
3. У розділі «Документи Укрпатенту» поруч з реєстраційним номером документа натиснути кнопку «Завантажити оригінал» та ввести ідентифікатор електронного документа.

Ідентичний за документарною інформацією та реквізитами паперовий примірник цього документа містить 2 арк., які пронумеровані та прошиті металевими люверсами.

Уповноважена особа Укрпатенту

І.Є. Матусевич

11.03.2019





МІНІСТЕРСТВО
ЕКОНОМІЧНОГО
РОЗВИТКУ І ТОРГІВЛІ
УКРАЇНИ

УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **132837** (13) **U**
(51) МПК
B08B 3/10 (2006.01)

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

(21) Номер заявки: **u 2018 10344**
(22) Дата подання заявки: **19.10.2018**
(24) Дата, з якої є чинними права на корисну модель: **11.03.2019**
(46) Публікація відомостей про видачу патенту: **11.03.2019, Бюл.№ 5**

(72) Винахідник(и):
**Скиба Микола Єгорович (UA),
Старий Андрій Романович (UA),
Гордєєв Анатолій Іванович (UA),
Гордєєв Олексій Анатолійович (UA)**

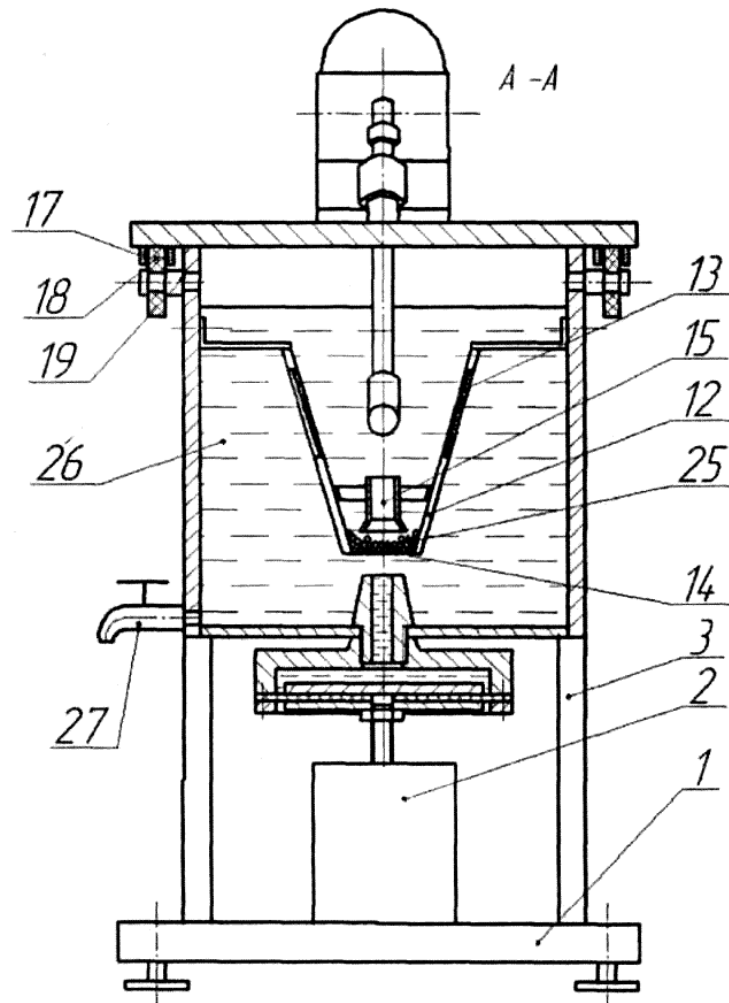
(73) Власник(и):
**Скиба Микола Єгорович,
вул. Інститутська, 3, кв. 52, м.
Хмельницький, 29013 (UA),
Старий Андрій Романович,
вул. Дем'янська, 16, кв. 45, м. Львів, 79031
(UA),
Гордєєв Анатолій Іванович,
вул. Водопровідна, 44/1, кв. 4, м.
Хмельницький, 29000 (UA),
Гордєєв Олексій Анатолійович,
вул. Водопровідна, 44/1, кв. 4, м.
Хмельницький, 29000 (UA)**

(54) ВІБРАЦІЙНА МАШИНА ДЛЯ ОЧИСТКИ ЗАБРУДНЕНЬ ПОТОКОМ ТВЕРДИХ ЧАСТОК ТА МИТТЯ ДЕТАЛЕЙ ПРИ РЕМОНТІ ОБЛАДНАННЯ**(57) Реферат:**

Вібраційна машина для очистки забруднень потоком твердих часток та миття деталей при ремонті обладнання містить дві ванни з кришкою, два корпуси камер пульсації, дві мембрани з дисками, що за допомогою штока з'єднані з вібраційним приводом, причому у ванну очищення, яка з'єднана з камерою пульсації мембранним клапаном, встановлено сітчастий контейнер, у якому розміщено сопло над сіткою з твердими частками і вісь сопла, співвісна з віссю насадка, у ванні для мийки на дні встановлено насадок, з'єднаний з камерою пульсації, а кришка встановлена на роликах у напрямних.

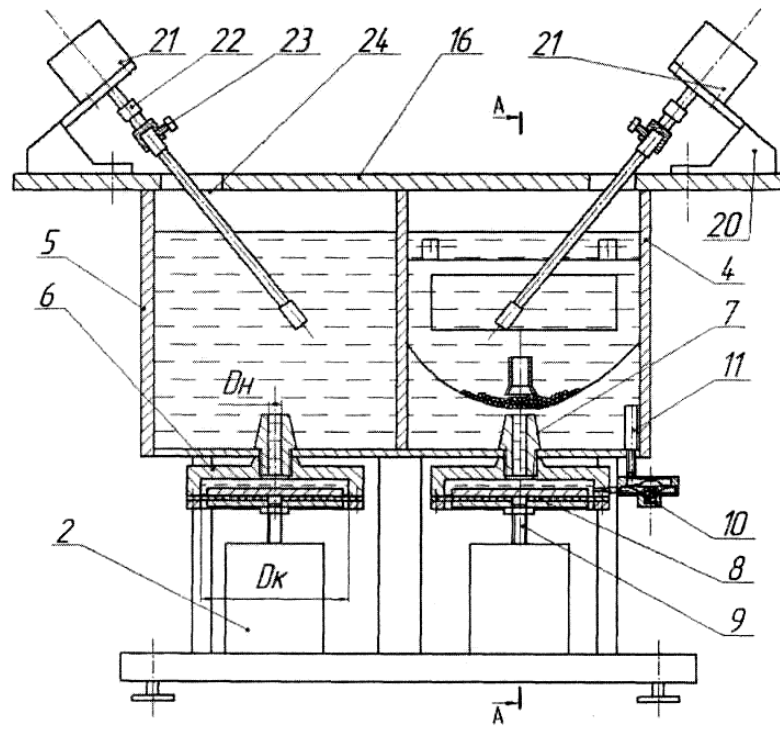
UA 132837 U

UA 132837 U



Фиг. 2

UA 132837 U



UA 132837 U

Корисна модель належить до вібраційних машин для очистки та миття деталей обладнання легкої промисловості від забруднень при обслуговуванні та ремонті.

В процесі роботи обладнання легкої промисловості його рухомі деталі з певним часом покриваються забрудненням на основі змащувальних матеріалів, в які попадають пил, волокна тканин, що призводить до заїдання підшипникових вузлів ковзання, а далі це веде до погіршення роботи обладнання із зниженням якості виробу.

Відомий пристрій для миття деталей, що містить ванну для миючої рідини, діафрагму, трубку сопло, сітку для розміщення деталей, електромагнітний привод [А.с. 880519 ССРСР, МКИ³ В08В 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. - 3 с.]. Основною вадою 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.

Найбільш близьким за технічною суттю є пристрій для миття дрібних деталей [А.с. 1130422 ССРСР, МКИ³ В08В 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. - 3 с.], що містить ванну для миючого розчину, дно якої має можливість коливатися, касету з деталями, яка встановлюється у ванну. До вад відомого пристрою належить те, що при втягуванні рідини у камеру пульсації, завдяки великій швидкості проходження рідини крізь отвори, виникають газові пухирці, що значно зменшують об'єм рідини у камері пульсації, який потім буде виштовхуватися крізь насадок. Це призводить до зменшення швидкості струменю рідини.

В основу корисної моделі поставлено задачу вдосконалення вібраційної машини для очистки забруднень потоком твердих часток та миття деталей при ремонті обладнання з метою прискорення процесу очищення виробу шляхом створення пульсуючого потоку рідини з твердими частками та зміни її конструкції і введення додаткового елемента (гідралічного зворотного клапана), що дає можливість зменшення швидкості рідини у насадку в момент втягування її у камеру пульсації та зниження можливості виникнення газових пухирців і дозволяє здійснити підвищення частоти коливань приводу, а це у свою чергу веде до підвищення швидкості струменю з насадка та продуктивності машини.

Поставлена задача вирішується тим, що вібраційна машина для очистки забруднень потоком твердих часток та миття деталей при ремонті обладнання містить дві ванни, закріплені на корпусі з кришкою, яка має можливість рухатися по напрямних на роликах. У ванну очистки встановлено: сітчастий контейнер, у якому розміщено сопло над сіткою з твердими частками і вісь сопла співвісна з віссю насадка, корпус з мембраною та дисками, який створює камеру пульсації миючої рідини. Мембрани за допомогою штоків з'єднані з вібраційними приводами. На дні ванни очищення розміщено насадок та зворотний клапан. У ванні для миття на дні встановлено насадок, з'єднаний з камерою пульсації.

Для досягнення максимальної продуктивності процесу очищення виробу конструктивні параметри камери пульсації і насадка та режим роботи вібраційного приводу вибирають за умови:

$$f = \frac{D_n^2}{2D_k^2 \cdot A} \sqrt{\frac{P}{\gamma}},$$

де f - частота коливань мембрани, Гц;

D_n - діаметр насадка, D_k - діаметр мембрани камери пульсації,

$(D_n^2 / D_k^2 = 12-14)$;

P - тиск у рідини, $P = 0,12 - 0,15$ МПа;

A - амплітуда коливань мембрани камери пульсації, $A = (2 + 3) \cdot 10^{-3}$ м;

γ - питома вага рідини, $\gamma = 1000$ Н/м³.

Конструкція вібраційної машини для очистки забруднень потоком твердих часток та миття деталей при ремонті обладнання пояснюється креслениками, на яких зображено: на Фіг.1 - головний вигляд вібраційної машини; на Фіг.2 - проекція вигляду вібраційної машини; з перерізом за А-А.

Вібраційна машина для очистки забруднень потоком твердих часток та миття деталей при ремонті обладнання (Фіг.1, Фіг.2) містить основу 1, на якій встановлено вібропривод 2, на стійках 3 розміщено дві ванни 4 - для очищення у потоці рідини та полістироловими кульками, 5 - для миття пульсуючим потоком миючої рідини; на дні ванн 4 та 5 закріплено корпус камери пульсації 6 за допомогою насадка 7 (діаметром D_n) та нижня частина корпусу 6 (діаметром D_k) закрита мембраною з дисками 8, яка закріплена до штока 9 віброприводу 2, а порожнина

UA 132837 U

камери пульсації 6 з'єднано мембранним клапаном 10 та забірною трубкою 11 з порожниною ванни 4, у яку встановлено контейнер 12 з боковими сітками 13 та сіткою 14, яка розташована над соплом 7, у коробі 12 розміщено сопло 15, ванни 4 та 5 закриті кришкою 16, яка має можливість рухатися по напрямних 17 на роликах 18, які встановлені на осях 19, на криці 16 за допомогою кутників 20 встановлено мотор-редуктор 21, який за допомогою муфти 22 з'єднано із затискачем 23 для деталі 24, у коробі 12 засипано тверді частки (полістиролові кульки) 25, а у ванни 4 та 5 залита миюча рідина 26, яку після спрацювання можна злити крізь кран 27.

Працює устаткування наступним чином: у ванни 4, 5 заливають миючу рідину 26 та засипають у контейнер 12 тверді частки (полістиролові кульки) 25, деталь 24, яка підлягає очищенню, закріплюють у затискачі 23 та встановлюють кришку 16 у напрямні 17. Включається мотор-редуктор 21, який обертає деталь 24 та вібропривод 2, що призводить до коливання мембрани з дисками 8 і у насадку 7 виникає пульсуючий струмінь рідини, який проходить крізь сітку 14 та захватє тверді частки (полістиролові кульки) 25, вдаряє ними по забрудненню та зриває його, не порушуючи поверхню деталі. При русі мембрани з дисками 8 униз миюча рідина 26 проходить крізь отвір у насадку 7 та забірну трубку 11 і відкритий клапан 10 із меншим зусиллям тяги приводу та витратою енергії вібраційного приводу. При русі мембрани з дисками 8 уверх здійснюється протікання миючої рідини 26 крізь насадок 7, а клапан 10 закривається. Деталь 24 обертається, а кришці 16 вручну надається поздовжньо-поступальний рух і очистка деталі 24 проводиться зі всіх сторін на необхідній довжині. Після очищення кришка 16 піднімається та деталь 24 перевстановлюється і проводиться очищення з іншої сторони деталі 24. Після підняття кришки 16 очищена деталь 24 знімається та встановлюється у затискач 23 у ванні 5 для миття, а забруднена деталь 24 встановлюється у затискач 23 у ванні 4 для очистки. Кришка 16 встановлюється у напрямні 17 та включається мотор-редуктор 21 та вібропривід 2. У ванні 4 проводиться очистка деталі 24, а у ванні 5 проводиться миття деталі 24 після її очищення. Після проведення миття у ванні 5 деталі 24 та очищення деталі 24 у ванні 4 мотор-редуктор 21 та вібропривід 2 виключаються та проводиться виїмка деталі 24 з ванни 4, а на її місце встановлюється деталь 24 з ванни 5 після очищення. При спрацюванні миючої рідини 26 (забрудненню) її зливають крізь кран 21.

Досліди динаміки роботи машини і процесу миття та очищення [Гордєєв А.І. Дослідження процесу взаємодії пульсуючого газорідного потоку з технологічними забрудненнями / А.І. Гордєєв // Вісник ТУП. Серія технічних наук. - 1997. - №1. - С.55-60], проведені на експериментальному зразку вібраційної машини, показали працездатність запропонованої машини та високу якість очищення та миття.

Таким чином, корисна модель, що заявляється, дозволяє підвищити продуктивність процесу очистки і миття та знизити енерговитрати обладнання.

ФОРМУЛА КОРИСНОЇ МОДЕЛІ

Вібраційна машина для очистки забруднень потоком твердих часток та миття деталей при ремонті обладнання, що містить дві ванни з кришкою, два корпуси камер пульсації, дві мембрани з дисками, що за допомогою штока з'єднані з вібраційним приводом, яка відрізняється тим, що у ванну очищення, яка з'єднана з камерою пульсації мембранним клапаном, встановлено сітчастий контейнер, у якому розміщено сопло над сіткою з твердими частками і вісь сопла, співвісна з віссю насадку, у ванні для миття на дні встановлено насадок, з'єднаний з камерою пульсації, а кришка встановлена на роликах у напрямних, а конструктивні параметри і режими роботи вібраційного приводу вибирають за умови:

$$f = \frac{D_n^2}{2D_k^2 \cdot A} \sqrt{\frac{P}{\gamma}},$$

де f - частота коливань мембрани, Гц;

D_n - діаметр насадку, D_k - діаметр мембрани камери пульсації,

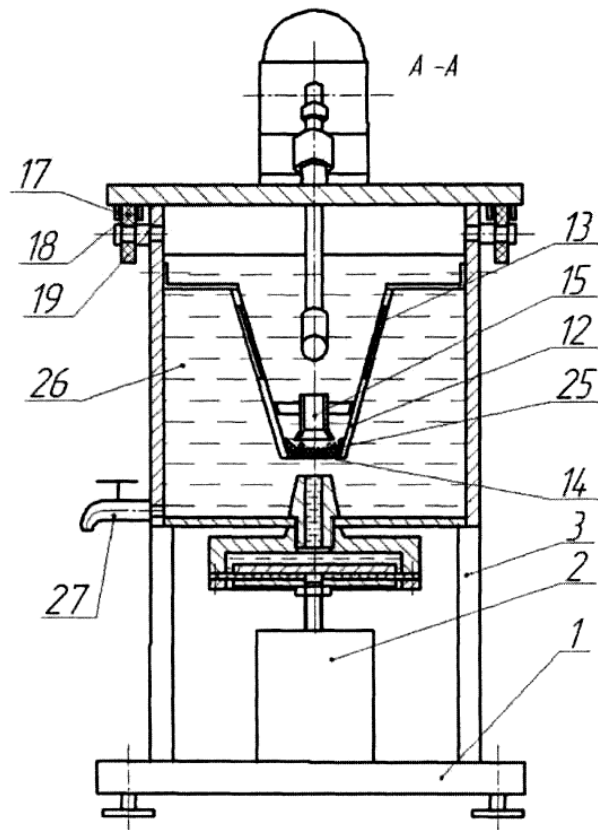
($D_n^2 / D_k^2 = 12-14$);

P - тиск у рідини, $P = 0,12-0,15$ МПа;

A - амплітуда коливань мембрани камери пульсації, $A = (2+3) \cdot 10^{-3}$ м;

γ - питома вага рідини, $\gamma = 1000$ Н/м³.

UA 132837 U



Комп'ютерна верстка А. Крулевський

Міністерство економічного розвитку і торгівлі України, вул. М. Грушевського, 12/2, м. Київ, 01008, Україна

ДП "Український інститут інтелектуальної власності", вул. Глазунова, 1, м. Київ – 42, 01601

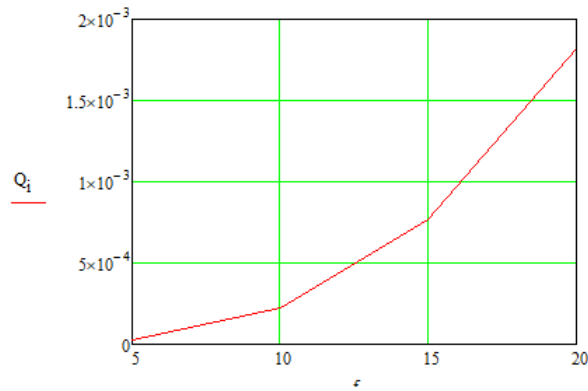
Приклад результатів розрахунків продуктивності процесу очистки твердими частинками у програмному продукті MathCad

$k_0 := 1$ $m := 0.00033$ $k_c := 0.9$ $\varepsilon := 0.5$ $D_k := 120$ $d_H := 10$ $H := 30$ $D_c := 10$
 $f_i :=$ $A := 2$ $\alpha := 12$ $\mu := 0.6$ $t := 1$ $i := 0.3$

5
10
15
20

$$Q_i := \frac{k_0 \cdot m \cdot \left[\frac{0.645 \cdot \frac{k_c \cdot \varepsilon \cdot D_k^2 \cdot A \cdot f}{d_H^2}}{1 + \left(\frac{2 \cdot H}{D_c} \cdot \tan\left(\frac{\alpha \cdot \pi}{180}\right)\right)} \right]^3}{4 \cdot 10^6 \cdot \mu \cdot H} \cdot t$$

$\tan\left(\frac{\alpha \cdot \pi}{180}\right) = 0.213$
 $Q_i = \begin{pmatrix} 2.84084 \times 10^{-5} \\ 0.00023 \\ 0.00077 \\ 0.00182 \end{pmatrix}$



$k_0 := 1$ $m := 0.00033$ $k_c := 0.9$ $\varepsilon := 0.5$ $D_k := 120$ $d_H := 10$ $H := 30$ $D_c := 10$
 $f_i :=$ $A := 2$ $\alpha := 12$ $\mu := 2$ $t := 1$ $i := 0.3$

5
10
15
20

$$Q_i := \frac{k_0 \cdot m \cdot \left[\frac{0.645 \cdot \frac{k_c \cdot \varepsilon \cdot D_k^2 \cdot A \cdot f}{d_H^2}}{1 + \left(\frac{2 \cdot H}{D_c} \cdot \tan\left(\frac{\alpha \cdot \pi}{180}\right)\right)} \right]^3}{4 \cdot 10^6 \cdot \mu \cdot H} \cdot t$$

$\tan\left(\frac{\alpha \cdot \pi}{180}\right) = 0.213$
 $Q_i = \begin{pmatrix} 8.52253 \times 10^{-6} \\ 6.81802 \times 10^{-5} \\ 0.00023 \\ 0.00055 \end{pmatrix}$

