

УДК 620.193.16

Р.І. СІЛІН, А.І. ГОРДЕЄВ, Р.С. СІЛІН, Є.А. УРБАНЮК
Хмельницький національний університет**ОСНОВИ СТВОРЕННЯ ВІБРАЦІЙНОГО ОБЛАДНАННЯ З ПУЛЬСУЮЧИМ РОБОЧИМ ТІЛОМ НЕЗАЛЕЖНО ВІД ГАЛУЗІ ВИКОРИСТАННЯ.****ПОВІДОМЛЕННЯ 2. ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ПУЛЬСУЮЧОГО РОБОЧОГО ТІЛА ТА ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ**

Запропоновано спосіб та конструкції механізмів утворення пульсуючих струменів рідини. Запропоновано загальну схему будови вібраційного обладнання з пульсуючим робочим тілом. Визначено умови виникнення гідрокавітації. Отримано частотні залежності миттєвих тисків у насадку та максимальну силу удару струменя. Запропоновані конструкції вібраційних установок різного технологічного призначення відзначаються енергоощадністю та необхідною інтенсивністю технологічної дії.

Ключеві слова: вібраційне обладнання, гідропульсатор, гідрокавітація.

R.I. SILIN, A.I. GORDEEV, R.S. SILIN, E.A. URBANYUK
Khmelnytsky National University**BASICS OF CREATING OF VIBRATING EQUIPMENT WITH PULSATING WORKING BODY FLUID REGARDLESS OF SECTOR OF USING****MESSAGE 2. RESEACH OF CHARACTERISTICS OF PULSATING WORKING BODY AND IMPLEMENTATION ON PRACTICE**

Abstract – A method and structural mechanisms of pulsating jets of liquid. The general scheme of structure vibration equipment with pulsating working fluid. Conditions of hidrokavitatsiyi. As a result of experimental studies obtained the mean velocity of fluid flow in the nozzle hidropulsatora on various parameters regarding: frequency, amplitude, distance from the nozzle to cut the sensor. The amplitude and frequency dependence of instantaneous pressure in the nozzle and the maximum impact force jet on the surface of the sensor. From the analysis of the geometrical characteristics of the pulsating body found that gas-liquid flow generated from nozzle hidropulsatora more preserves the original speed and hydrodynamic force pressure than turbulent flow of liquid at a distance of one and the same nozzle through a smaller angle of unilateral expansion flow. Proposed construction vibration settings different technological purposes observed energy-efficiency and the intensity of technological action.

Keywords: vibrating equipment, hidropulsator, hidrocavitation.

Виклад основного матеріалу

Огляд технічної літератури [1] та аналітичні дослідження [2] дозволили встановити, що основними характеристиками пульсуючого робочого тіла є швидкість руху та тиск потоку, розміри газових пухирців. Дані характеристики залежать в свою чергу від конструктивних параметрів устаткування – діаметру пульсуючої камери та діаметру насадка, висоти пульсуючої камери; параметрів приводу – частоти та амплітуди коливань.

Запропоновано спосіб та конструкції механізмів утворення пульсуючих струменів рідини [3], в якому використовується зворотно – поступальний рух рідини через насадок із гострими крайками на вході та виході. При цьому на виході з насадка гідропульсатора отримуємо пульсуючий струмінь рідини з включеннями газових пухирців, що виділяються з рідини внаслідок гідрокавітаційних явищ.

Для реалізації, вище описаних технологій, використовуються конструкції гідропульсаторів, що зображені на рис. 1 та рис. 2. Пульсуючі струмені та газорідний потік утворюється в мембранному ГП (рис. 1), який працює так: при рухові мембрани 3 вниз в камері 1 створюється розрідження і рідина втягується в камеру через насадок 2. При ході мембрани вверх відбувається стискання рідини і вона під тиском виштовхується через насадок із камери.

При певних режимах протікання рідини через насадок утворюється кільцева ізольована порожнина, яка руйнується при досягненні певного тиску рідини в пульсуючій камері. При руйнації кільцевої ізольованої порожнини з рідини починає виділятися у вигляді газових пухирців повітря. Виникає можливість впливу на предмет оброблення локалізованої дії пульсуючого струменя з кавітаційними пухирцями, що узагальнює такий підхід для різних технологій.

Пульсуючі струмені робочого тіла у гідропульсаторі (рис. 2) виникають при зворотно-поступальному русі штока 3, з'єданого з поршнем 4, в якому є отвори певних розмірів. Для гасіння струменів рідини, які виникають при ході поршня вниз, застосовано гумовий відбійник 5. При певних режимах коливань в момент руху поршня вверх виникають кавітаційні пухирці в зоні розрядження між кришкою 2 та поршнем 4 з одночасним створенням струменів робочого тіла у отворах, насичених газовими пухирцями. Отже, в результаті на виході з насадка отримуємо пульсуюче робоче тіло, насичене пухирцями.

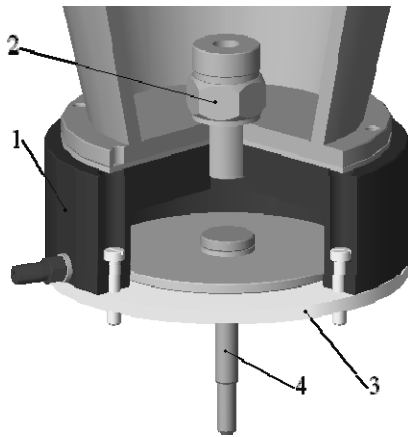


Рис. 1. Конструкція мембранного гідропульсатора: 1 – камера; 2 – насадок; 3 – мембрана; 4 – шток

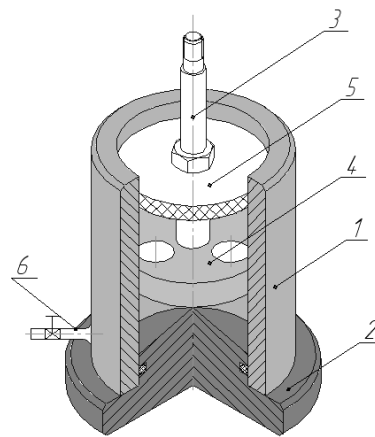


Рис. 2. Конструкція поршневого гідропульсатора: 1 – корпус; 2 – кришка; 3 – шток; 4 – поршень з отворами; 5 – гумовий відбійник струменів; 6 – кран

Виходячи з аналізу існуючих конструкцій технологічного обладнання, запропоновано загальну схему будови вібраційного обладнання з пульсуючим робочим тілом на основі гідропульсатора та виявлено основні взаємозв'язки конструктивних, технологічних параметрів пропонованого обладнання (рис. 3). Подальша побудова різних технологічних процесів із застосуванням газорідних потоків без підвищення енергоємності машин може бути досягнута за рахунок створення пульсуючого газорідного потоку з газу й повітря, розчиненого в самій рідині за рахунок явищ, зв'язаних із циклічним характером впливу на потік, наприклад, гідродинамічної кавітації, яка виникає при циклічному проходженні рідини крізь насадок з гострими крайками.

Попередні дослідження [2] зміни сили удару пульсуючого струменя по площині від параметрів роботи приводу дозволили виділити наступні режими роботи гідропульсатора: струминно-пульсуючий (від 6 Гц до 10 Гц), струминно-кавітаційний (від 10 Гц до 14 Гц), кавітаційний (від 14 Гц до 20 Гц). При струминному режимі робоче тіло рухається крізь насадок із зародками газових пухирців без розриву. Струминно-кавітаційний режим характеризується початком розриву робочого тіла на рівні пульсуючих кавітаційних пухирців. Кавітаційний режим характеризується значним розривом робочого тіла, зменшенням швидкості руху крізь насадок та виникненням великого деформованого пухирця (ВДП) [4].

Запропоновані технологічні можливості застосування гідропульсатора у різних технологіях та конструкціях машин, згідно з різновидом режимів його роботи, показано на рис. 4.

Для отримання необхідного режиму роботи бажано визначити умови виникнення гідрокавітації.

Аналіз умов виникнення гідрокавітації у гідропульсаторі

Відомо, що в технічних рідинах є розчинене повітря чи газ. Кількість розчинених газів у рідині визначаються законом Генрі-Дальтона [5]:

$$U_g = \lambda U_p \frac{P_2}{P_1}, \quad (1)$$

де U_g і U_p – об'єм розчиненого газу й об'єм рідини;

P_1 і P_2 – початковий і кінцевий тиски, під яким знаходиться рідина;

λ – коефіцієнт розчинності газу в рідині.

Значення коефіцієнта λ для різних газів у рідинах коливається в широких межах від 2 % до 11 %.

Розчинені гази будуть виділятися з рідини при зниженні тиску за умови:

$$\frac{P_2}{P_a} \leq \frac{\lambda_1}{\lambda(P_a, T)}, \quad (2)$$

де P_a – атмосферний тиск; T – температура; $\lambda = \frac{U_g}{U_p}$.

Питаннями виділення газу з рідкої фази займалися багато дослідників. Розглянуто термодинамічні умови переходу газу з розчиненого стану в нерозчинений. Роль різних факторів динамічного впливу на процес виділення газу з рідкої фази опрацьовано у праці [6].

Багатьма дослідженнями [7, 8] встановлено, що на виникнення гідрокавітації впливають наступні фактори: опір рідини напругам, що розтягують; вміст розчиненого газу в рідині і так званих ядер кавітації – домішок, тобто газових пухирців від $0,1 \times 10^{-6}$ м до 10×10^{-6} м; час проходження рідини через зону зниження тиску; фізичні властивості рідини (тиск насичених пар, в'язкість, поверхневий натяг рідини).

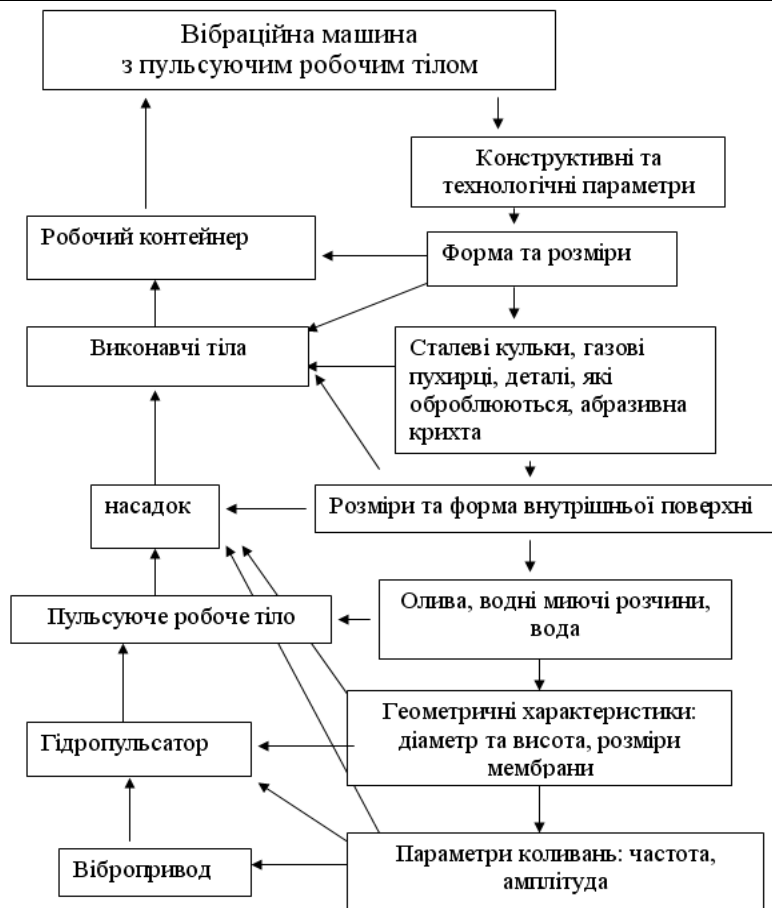


Рис. 3. Блок-схема взаємозв'язку елементів та вузлів вібраційної машини на основі ГП з технологічними параметрами

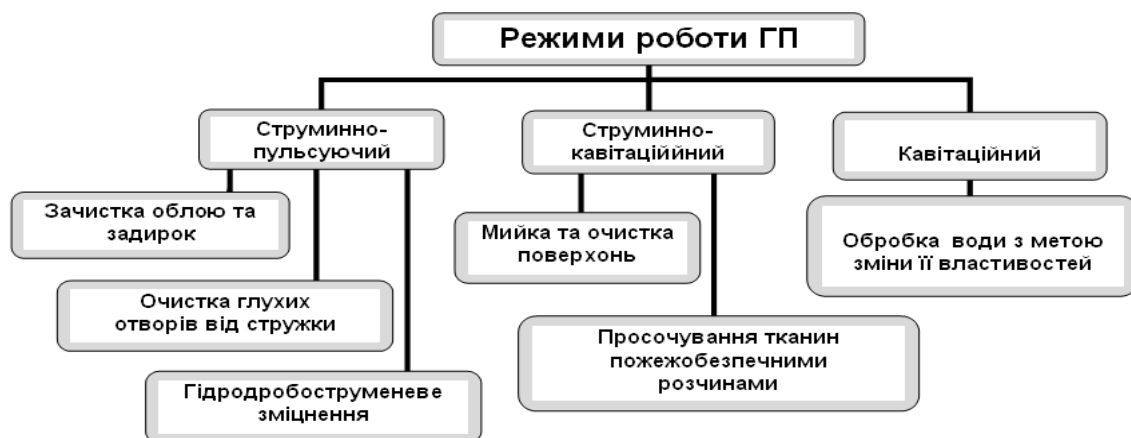


Рис. 4. Схема запропонованих технологічних процесів залежно від режимів роботи гідропульсатора

Відповідно до сучасних представлень розрив рідини під впливом напруг, що розтягують, відбувається не тільки на рівні молекулярних сил, а і на зародках твердої або газової фази. Результати досліджень [8] засвідчують, що на виникнення й розвиток кавітації істотно впливає швидкість потоку навіть при тій самій кількості повітря в рідині. Це також пов'язують із наявністю в рідині ядер кавітації від домішок. Для того щоб із них утворились пухирці до розмірів, видимих простим оком, потрібен певний час. В роботі [5] автором зроблена спроба класифікувати різні види кавітації. Запропоновано чіткий поділ газової й парової кавітації, виявлено умови існування так званої хибної кавітації. В основу класифікації цих понять покладено аналіз рівняння одиничного пухирця [5]. Простежимо визначення цих понять.

Хибною, або псевдокавітацією називають рівноважну зміну розмірів пухирця без істотного впливу дифузії газу в порожнину.

Газова кавітація – це повільний ріст пухирців, що супроводжується дифузією газу в порожнину.

Парова кавітація – це процеси, зумовлені різким зростанням і сплескуванням каверни внаслідок втрати стійкості рівноваги зародкового пухирця. Зародкові пухирці при падінні тиску змінюють розміри: спочатку відбувається хибна, потім газова кавітація. Хибна кавітація не викликає кавітаційної ерозії.

Відповідно автором [5] визначені тиски, при яких виникають газова й парова кавітація:

$$P_{\text{кав.г}} = P_n + P_2 - \frac{2\sigma}{R_0} \sqrt{\frac{P_2}{P_0 - P_n + 2\sigma/R_0}};$$

$$P_{\text{кав.л}} = P_n - \frac{2}{3\sqrt{3}} \sqrt{\frac{2\sigma/R_0}{P_0 - P_n + 2\sigma/R_0}}, \quad (3)$$

де $P_{\text{кав.г}}$, $P_{\text{кав.л}}$ – тиск газової й парової кавітації відповідно;
 P_n – тиск насичених парів;
 P_2 – тиск газу, що насичує рідину;
 σ – коефіцієнт поверхневого натягу;
 R_0 – вихідний радіус пухирця;
 P_0 – вихідний зовнішній тиск.

Ці вирази доводять, що тиск парової кавітації $P_{\text{кав.л}}$ завжди нижчий від тиску P_n насиченого пару рідини, у той час як тиск газової кавітації $P_{\text{кав.г}}$ перевищує P_n настільки, наскільки вищий тиск газу, що насичує рідину, P_2 і більше розміри зародкових пухирців.

Розміри пухирця збільшуються в міру зменшення тиску. Після досягнення певного критичного розміру для подальшого росту пухирця не потрібно зниження тиску, пухирець спонтанно зростає [5,7].

Теоретичні дослідження про ріст розмірів газового пухирця пояснюють це явище в такий спосіб: однобічною дифузією газу з рідини в коливний пухирець. При стиску відбувається дифузія газу з пухирця в рідину, при розтяганні напрям дифузії зворотній. Оскільки у тому і іншому випадку дифузія відбувається через різну поверхню, велику у випадку дифузії у пухирець, об'єм повітря, що дифундує в пухирець, більше об'єму, який виходить із пухирця, що приводить до росту пухирця. Результат наближеного рішення нелінійного рівняння дифузії для нерезонансних пухирців показує, що закон росту радіуса пухирця з часом має вигляд:

$$R^2(t) = R_0^2 + \frac{4}{3} \left[\frac{D\beta_\infty}{\rho_g} \left(\frac{P'_0}{P_0} \right)^2 \right] t, \quad (4)$$

де R_0 – початковий радіус пухирця;
 D – коефіцієнт дифузії; ρ_g – щільність газу;
 β_∞ – концентрація газу в рідині на далекій відстані від пухирця;
 P'_0 – амплітуда звукового тиску;
 P_0 – гідростатичний тиск у рідині.

Характеристикою процесу однобічної дифузії є час T , за який радіус пухирця подвоюється:

$$T = \frac{9 R_0 \rho_g}{4 \beta_\infty D} \left(\frac{P_0}{P'_0} \right)^2. \quad (5)$$

З цього співвідношення випливає важливий висновок про те, що пухирці малого розміру ростуть досить швидко, у той же час подвоєння радіуса великих пухирців вимагає значного часу.

Таким чином, однобічна дифузія призводить до того, що при зміні тиску розподіл пухирців за розмірами швидко змінюється в області малих розмірів і залишається майже стабільним в області великих розмірів, причому функція розподілу міняється так, що збільшується число пухирців великих розмірів. Це, природно, знижує міцність рідини на розрив. З метою одержання газорідинного потоку безпосередньо з рідини необхідно використовувати гідродинамічну кавітацію в області газової кавітації.

Для створення такого процесу необхідно дотримуватись наступних умов: час проходження рідини через зону розрідження повинен бути значним; проходження через зону зниження тиску того самого обсягу рідини з метою поступового росту газових пухирців із зародків повинно бути кількарізовим. Для здійснення процесу виділення газової фази з рідини запропоновано використовувати явище виникнення кільцевої ізольованої порожнини з її руйнуванням при витіканні через отвір, що має певну довжину. Порожнина заповнюється газами повітря й парами рідини. В момент досягнення достатнього перепаду тисків відбувається зрив кільцевої порожнини.

Таким чином, струмінь і стінки отвору утворюють кільцеву порожнину, ізольовану від протитиску. Ця порожнина стикається на порівняно великій ділянці зі струменем, але середовище, включене в ній, не бере участь у русі і тому її не можна віднести до струменя. Такий механізм виникнення кільцевої ізольованої порожнини базується на експериментальних даних А.Д. Альтшуля. Для утворення газорідинної суміші необхідно, щоб відбувався зрив кільцевої порожнини. Умова зриву кільцевої порожнини подається автором [6] у вигляді:

$$\left(\frac{P_2}{P_1} \right)_{\text{зр}} \leq 2\psi \varphi_{\text{л}} \frac{f_c}{f_{\Delta F}} + \frac{P_{\text{min}}}{P} (1 + 2\psi \varphi_{\text{л}} \frac{f_c}{f_{\Delta F}}), \quad (6)$$

де ψ – коефіцієнт зменшення швидкості на периферії струменя біля стінок отвору;

f_c – площа живого перетину струменя в стиснутому перетині;
 $f_{\Delta F}$ – площа живого перетину струменя в місці досягнення границею кільцевої ізольованої порожнини стінок отвору;
 φ – коефіцієнт швидкості;
 μ – коефіцієнт витрати.

Тому що P_{\min} – звичайно, мале в порівнянні з тиском на вході, то їм можна знехтувати, і тоді критерій запишеться у вигляді:

$$\left(\frac{P_2}{P_1}\right)_{зр} \leq 2\psi\varphi\mu \frac{f_c}{f_{\Delta F}} \quad (7)$$

Для циліндричного отвору: $\frac{f_c}{f_{\Delta F}} = \mathcal{E} = 0,64$. Для циліндричного отвору прийmemo коефіцієнт $\psi = 0,6$

[6] і при $Re > 100000$ проведемо розрахунок значення критерію руйнування кільцевої ізольованої порожнини для діаметра $d = 0,01$ м. $\mu = \varphi\mathcal{E} = 0,97 \cdot 0,64 = 0,62$.

Тоді:
$$\left(\frac{P_2}{P_1}\right)_{зр} = 2 \cdot 0,5 \cdot 0,98 \cdot 0,62 \cdot 0,64 = 0,38.$$

Виходячи з розрахунків переконуємось, що зрив кільцевої порожнини наступить за умови:

$$P_{2зриву} = 0,38P_1.$$

З наведених розрахунків випливає висновок: для того щоб відбувалося виділення газу в струмінь рідини з ізольованої порожнини, необхідне дотримання умови: $P_{2зриву} \leq 0,38P_1$.

Для здійснення пульсації потоку й одночасного виділення газових пухирців у рідину запропонована вібраційна схема зворотно-поступального руху рідини через насадок [9]. Тому газ, який утворюється в кільцевих порожнинах, що з'являються поперемінно то на початку, то в кінці насадка, попадає в рідину у вигляді пухирців. Виникає двофазний газорідинний потік.

Дослідження залежності миттєвого гідродинамічного тиску пульсуючого робочого тіла від різних конструктивних параметрів та режимів роботи приводу

Величина миттєвого гідродинамічного тиску газорідинного потоку є одним з визначальних факторів різних технологічних процесів. На величину миттєвого гідродинамічного тиску, що утворюється на виході з насадка гідропульсатора впливає багато факторів. Це перш за все конструктивні параметри гідропульсатора: діаметр та довжина камери пульсації; діаметр насадка та параметри приводу – амплітуда та частота пульсації.

Для визначення впливу цих факторів на величину миттєвого гідродинамічного тиску були проведені дослідження на устаткуванні [10]. Результати наведені в вигляді графіків (рис. 5, 6, 7).

З наведених експериментальних даних можна зробити такі висновки. Зі збільшенням діаметра насадка при певних параметрах коливань зростає величина миттєвого гідродинамічного тиску, який діє на поверхню, що очищується (рис. 5). З'ясовано, що залежність миттєвого тиску від частоти має екстремальний резонансний характер. Максимальні значення залежно від інших сталих параметрів коливань досягаються при частотах від 8 Гц до 16 Гц.

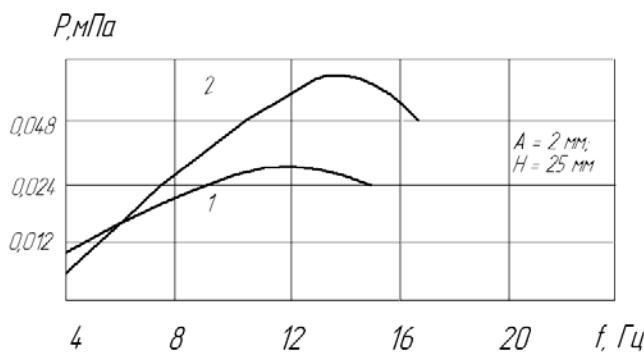


Рис. 5. Залежність максимального миттєвого тиску рідини від діаметра насадка: 1 – $d_n = 6,3$ мм; 2 – $d_n = 10$ мм

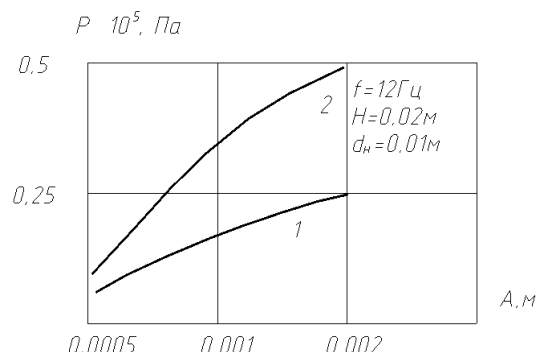


Рис. 6. Залежність максимальної сили тиску від амплітуди пульсації: 1 – $A = 1$ мм; 2 – $A = 2$ мм

Це пояснюється тим, що за цими частотами починають проявлятися демпфіруючі властивості газорідинної суміші в пульсуючій камері, що призводить до того, що в пульсуючу камеру при ході мембрани вниз починає затягуватись менший об'єм суміші, відповідно і менший об'єм суміші виштовхується при ході мембрани вверх.

Газова складова суміші виступає в ролі демпфера. Для отримання максимальних значень тиску необхідно працювати на частотах від 8 Гц до 16 Гц при відповідних діаметрах насадків. Амплітуда

пульсацій (рис. 6) має великий вплив на миттєвий тиск, але збільшення амплітуди призводить до зростання інерційних сил та динамічних навантажень на елементи конструкції.

Газорідинний потік з насадка виходить у середовище рідини, що призводить до його взаємодії з оточуючими шарами рідини. Внаслідок цього енергія потоку частково розсіюється у оточуючій рідині і це призводить до гальмування потоку, що зменшує величину миттєвого гідродинамічного тиску. Були проведені дослідження, у яких змінювалась відстань між насадком та датчиком. Результати наведено на рис. 7.

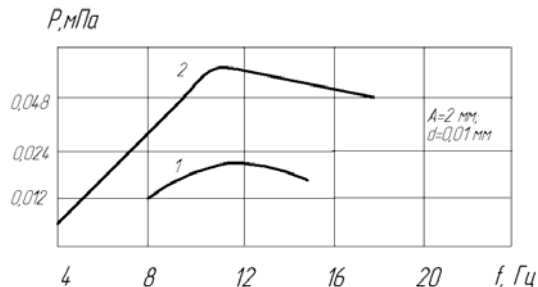


Рис. 7. Залежність максимального миттєвого тиску від відстані між насадком та датчиком: 1 – $L = 90$ мм; 2 – $L = 20$ мм

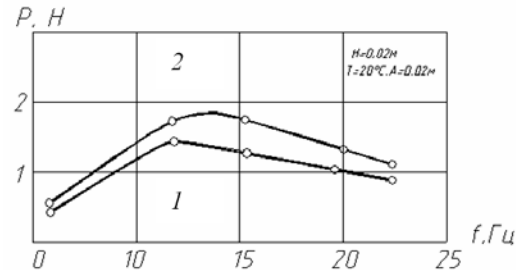


Рис. 8. Залежність максимальної сили удару по перетинах струменю:
1 – по краю насадка; 2 – по центру насадка

Як бачимо з результатів досліджень, відстань між насадком та поверхнею значно впливає на величину миттєвого тиску. Отже, якщо дозволяє конструкція деталей, що обробляються, відстань між насадком та деталлю повинна бути в межах від 20 мм до 50 мм, що забезпечить мінімальні втрати енергії потоку на подолання сил опору з боку оточуючої рідини.

Були проведені виміри сили удару [9] в різних точках перетину газорідинного потоку на початковій ділянці (відстань від зрізу насадка до датчика 20 мм). Використовувався тензометричний датчик.

Були вибрані дві точки по перетину: по вісі потоку, де насичення пухирцями низьке, та на межі потоку, де найбільше насичення пухирцями. З графіка рис. 8 видно, що сила удару в центрі потоку є більшою, ніж на межі потоку, хоча на початковій ділянці потоку швидкості практично рівні. Пояснюється це тим, що потік має різне насичення пухирцями по перетинах. Отже, отриманий потік має специфічну структуру: в середині струменя рідина з мілкими пухирцями і створює значну силу удару, а по краях потік, оточений газорідинною сумішшю з великим насиченням пухирцями, продукує зменшену силу удару, завдяки здатності пухирців демпфіруванню.

Дослідження характеристик струменя пульсуючого робочого тіла, отриманого у гідропульсаторі

Газорідинний турбулентний струмінь, що виходить з насадка в простір тої ж рідини поступово розширюється в масі оточуючої рідини. Розширення струменя пояснюється дією сил внутрішнього тертя, що виникають на межі струменя та оточуючої рідини. Утворені при цьому вихори та зв'язане з ними інтенсивне поперечне перемішування часток (турбулентне перемішування) призводить до того, що периферійні шари струменю пригальмовують, а шари оточуючої рідини прискорюють свій рух [10, 11]. В результаті обміну імпульсів між струменем та оточуючою рідиною швидкість його зменшується, а маса потоку та його ширина збільшуються (оскільки до руху в осьовому напрямку залучаються додаткові маси рідини).

Швидкість руху струменю на відстані l від насадка буде дорівнювати:

$$V = \frac{V_0}{1 + \frac{2l}{d_n} \operatorname{tg} \alpha}, \quad (7)$$

де α – кут одностороннього розширення струменя.

Сила гідродинамічного тиску розраховується за формулою Бернуллі:

$$P = 0,95 \frac{\gamma}{g} S V^2 \sin \beta, \quad (8)$$

де γ – питома вага рідини;

g – прискорення вільного падіння;

S – площа перетину струменя;

V – швидкість струменя біля насадка;

β – кут нахилу площини перешкоди до лінії дії струменя.

Тоді сила гідродинамічного тиску на відстані l від насадка залежно від кута α , буде дорівнювати:

$$P = 0,95 \frac{\gamma}{g} S \left(\frac{V_0}{1 + \frac{2l}{d_n} \operatorname{tg} \alpha} \right)^2 \sin \beta \quad (9)$$

Величина кута α залежить від форми насадка та виду струменя. Альтшуль дає значення кута $\alpha = 12^\circ 40'$ для круглого насадка. Для турбулентного газорідного струменя, що утворюється в установці [11] в технічній літературі відсутні значення кута α . Таким чином для знаходження кута α потрібно провести додаткові дослідження.

Для знаходження цього кута були проведені досліди на експериментальній установці з прозорими стінками. Проводилось фотографування прозорого каналу з витримкою 1/30 с при спеціальному освітленні. При цьому газова фаза газорідного струменя виглядала як світлі крапки на темному фоні. Чисельні вимірювання кута одностороннього розширення струменя дали такі результати:

$$\alpha = 6^\circ; \operatorname{tg} \alpha = 0,105. \quad (10)$$

Отримане значення кута $\alpha = 6^\circ$ значно менше за значення, наведені в роботах [12].

Проведено розрахунок швидкості руху газорідного струменя від відстані між насадком та поверхнею за залежністю (7). Швидкість руху струменя суміші при $\alpha = 6^\circ$ значно вища за швидкість руху струменя при $\alpha = 12,67^\circ$. Із залежності (9) виходить, що газорідне робоче тіло в міру віддалення від зрізу насадка зберігає більшу силу гідродинамічного тиску та переносить більшу частину своєї енергії при взаємодії з оточуючими шарами рідини, ніж простий турбулентний потік. Це явище можна пояснити так. Під час проходження робочого тіла через насадок з гострими крайками на вході, створюється потік газорідної суміші, причому найбільша кількість газових пухирців спостерігається на периферії потоку. Отже, середина потоку, яка несе максимум енергії, оточена "кожухом" газових пухирців. При цьому розсіювання енергії потоку при взаємодії з оточуючими шарами йде повільніше, тобто газорідний потік, має меншу дисипацію енергії вздовж своєї осі, ніж затоплений турбулентний потік без пухирців. Тому бажано отримувати саме таку структуру робочого тіла при очистці пульсуючими газорідними струменями.

Практична реалізація

Створено нову конструкцію вібраційної машини для об'ємного струмино-абразивного оброблення задирок на дрібних прецизійних деталях (контактори релейної апаратури) без їх механічного деформування [13]. Це досягається тим, що абразивні гранули (від 1 мм до 1,5 мм) та деталі засипаються у циліндричну ємкість, у якій верхня та нижня кришка мають сітки, а пульсуючий струмінь робочого тіла рухається зворотно-поступально через ємкість. Пульсуюче робоче тіло захоплює та коливає абразив і деталі, але з різними швидкостями, що забезпечує відносну швидкість оброблення. При такому русі робочого тіла знижуються ударне навантаження та механічне деформування дрібних деталей. Запропонована конструкція вібраційної машини показана на рис. 9.

На плиті 1 встановлено камеру формування пульсації робочого тіла 2 із насадком, мембрана 3, яка має можливість коливатися за допомогою штока 4 від віброприводу 5, що встановлений на основі 6. У камеру формування пульсації робочого тіла 2 загвинчено циліндричну ємкість 7, у якій верхня та нижня кришка, виконана із сіткою 8. На зовнішню поверхню камери 2 нагвинчено циліндричну ємкість 9, що утворює ванну для рідини 10 та закрита кришкою 11.

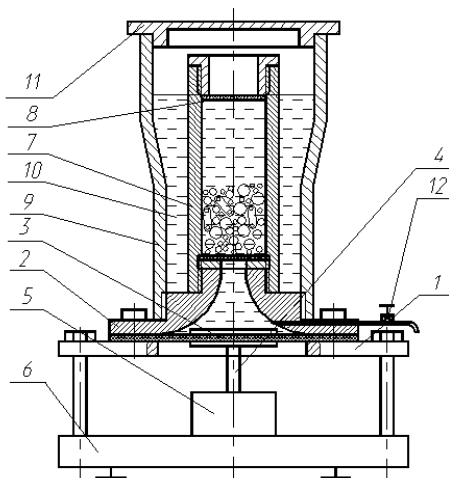


Рис. 9. Вібраційна машина для об'ємної струмино-абразивного оброблення задирок : 1 – плита; 2 – камера; 3 – мембрана; 4 – шток; 5 – вібропривод; 6 – основа; 7 – ємкість; 8 – сітка; 9 – циліндрична ємкість; 10 – рідина; 11 – кришка; 12 – кран

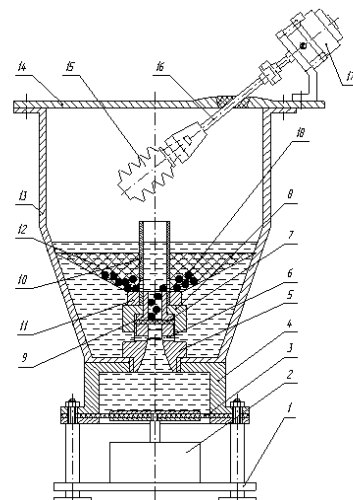


Рис. 10. Вібраційна машина для гідробрустоустрічного зміцнення інструментів та деталей машин: 1 – рама; 2 – вібропривод; 3 – мембрана; 4 – камера; 5 – насадок; 6 – отвори; 7 – сітка; 8 – гайка; 9 – сопло; 10 – трубка; 11 – кільце; 12 – розподільна сітка; 13 – ванна; 14 – кришка; 15 – оброблюваний виріб; 16 – шпindel; 17 – двигун-редуктор; 18 – кульки

Для зливу рідини та продуктів зносу абразивних гранул на дні камери формування пульсуючого робочого тіла встановлено кран 12. За рахунок різних швидкостей відносного руху абразиву та деталей проходить зняття задирок без деформації деталей. Режим роботи приводу: амплітуда $A = 3$ мм, частота коливання f від 12 Гц до 14 Гц. Працездатність обладнання для об'ємного вібраційного струминно-абразивного оброблення задирок показали проведені експериментальні дослідження.

На основі вищесказаного та у зв'язку з переходом виробництва на серійний та дрібносерійний тип виникає потреба в проектуванні ефективного обладнання із зниженими енерговитратами і низькою металоємністю. Тому пропонується обладнання для гідродробоструминного зміцнення деталей та інструментів в основу конструкції якого покладено вібраційний гідропульсатор для отримання пульсуючого струменя рідини з високим динамічним напором без циркуляції крізь насосну станцію [14,15].

Завдяки пульсуючому струменю рідини кульки подаються порціями, що зменшує втрати енергії удару в результаті уникнення взаємодії кульок між собою. Продуктивність оброблення значно підвищується.

Запропоновано конструкцію вібраційної машини для підвищення стійкості складного різального інструменту (фрез: черв'ячних, шліцьових) методом заокруглення різальної кромки та зміцненням поверхневого шару задньої поверхні інструмента.

Конструкцію (рис. 10) виконано з рами 1, на якій закріплено вібратор 2, з'єднаний з мембраною 3. Камера 4 утворює з мембраною 3 гідропульсатор з насадком 5, в якому є отвори 6 для засмоктування рідини. На насадок 5 встановлена сітка 7 за допомогою гайки 8, та сопло 9, на якому розташована трубка 10 з отворами. На трубці 10 встановлено кільце 11 із розділювальною сіткою 12. На корпусі 4, за допомогою насадка 5, закріплена ванна 13 і закрита кришкою 14. Оброблюваний виріб 15 встановлений у шпindel 16, який зв'язаний з двигуном-редуктором 17, що закріплений на кришці 14. Кульки 18 знаходяться на розподільній сітці 12.

Вібраційна машина працює наступним чином: на розподільну сітку 12 засипаються кульки 18. В ванну 13 заливається робоча рідина. У шпindel 16 встановлюється оброблюваний виріб 15. Вмикання вібратора 2 спричиняє зворотно-поступальний рух мембрани 3. При ході мембрани 3 вниз рідина засмоктується крізь сітку 7 та отвори 6 у камеру 4. Кульки 18 потрапляють у сопло 9. При ході мембрани уверх виникає надлишковий тиск рідини, що утворює струмінь, завдяки якому кульки виштовхуються крізь трубку 10 на виріб 15. При подальшій роботі вібратора 2 цикл повторюється і таким чином здійснюється поверхневе зміцнення виробу 15. Завдяки періодичності викиду порцій кульок зменшується розсіювання енергії при співударі кульок між собою. Завдяки повільному обертанню шпинделя відбувається обробка всієї поверхні виробу.

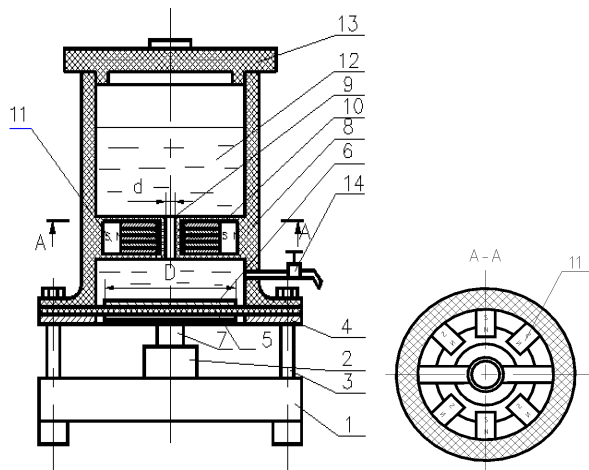


Рис. 11. Вібраційна машина для кавітаційно-магнітної обробки води: 1 – корпус; 2 – вібропривод; 3 – стійки; 4 – плита; 5 – мембрана; 6 – диск; 7 – шток; 8 – сміксть; 9 – отвір; 10 – загострені сегменти; 11 – магніти; 12 – вода; 13 – кришка; 14 – кран

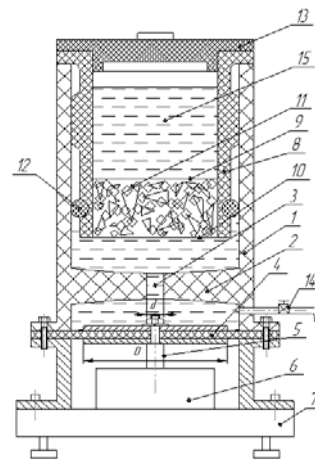


Рис. 12. Вібраційне обладнання для біологічної активації води:

1 – корпус; 2 – перегородка; 3 – отвір; 4 – мембрана; 5 – шток; 6 – вібропривод; 7 – плита; 8 – сміксть; 9 – верхня сітка; 10 – нижня сітка; 11 – активуючі елементи; 12 – гумове кільце; 13 – кришка; 14 – кран; 15 – вода

У результаті проведених досліджень впливу магнітного поля на властивості води [38] запропоновано ряд нових конструкцій вібраційних машин для очищення та знезараження води на основі гідропульсатора з одночасним магнітним впливом [17– 19]. Запропоновано конструкцію вібраційної машини для кавітаційно-магнітної обробки води [17], що складається з блоку постійних магнітів із загостреним сегментним осердям, які охоплюють немагнітний канал через який багаторазово перетікає рідина у режимі гідрокавітації. Досягається сумарний вплив кавітаційного та магнітного впливу на рідину. Конструкція вібраційної машини для оброблення води показана на рис. 11.

Працює вібраційна машина наступним чином: вода 12 заливається у ванну 8 після чого ванна 8 закривається кришкою 13. Вмикається вібропривод 2. Завдяки коливанням гумової мембрани 5 із дисками 6

рідина 12 отримує багатократний зворотно-поступальний рух через отвір 9. При проходженні рідини через отвір 9 завдяки певному співвідношенню діаметра диска D до діаметра d отвору ($D/d = 12$), підібраним відповідно до резонансу системи амплітуди та частоти коливань віброприводу, у отворі періодично утворюється кавітаційні порожнини завдяки гідрокавітації.

На рис. 11 (переріз А-А) показано розташування та полюсність постійних магнітів 11. Блок постійних магнітів 11 створює неоднорідний магнітний потік з великим градієнтом напруженості. Ці два фактори енергетично впливають на структуру води, змінюючи її властивості. Після певного терміну багатократної обробки вода зливається через кран 14.

Досліди, проведені на експериментально-промисловій моделі установки, показали зменшення вмісту кальцію та магнію на 22%, підвищення окислювальної здатності води на 70%, зменшення у 2,2 рази біологічної потреби кисню. Запропонована конструкція вібраційної машини для кавітаційно-магнітної обробки води дає можливість прискорено та багатократно обробляти невеликі об'єми води з незначними енерговитратами [20].

Запропоновано нову конструкцію вібраційної машини для одержання біологічно активної води [21] (рис. 12), що використовується в медицині та рослинництві.

Відомий пристрій для біологічної активації води, що містить ємкість, наповнену водою, і активуючі елементи із природного активного мінералу кременю. Ємкість з водою та активуючими елементами встановлено у скляну ємкість. Вода під дією гравітаційних сил поступово перетікає у скляну ємкість. При контактуванні з кремнієм відбувається активація води (подрібнення на мономолекули). Основною вадою даного пристрою є довготривалість процесу активації води (2–3 доби). Працює запропоноване обладнання наступним чином: вода 15 заливається у ємкість 8, проходить крізь щілини між активуючими елементами 12 які утворюються їх розмірам (до 10 мм), протікає крізь отвір 3 та заповнює ємкість між перегородкою 2 та рухомою мембраною 4. При зворотно-поступальному русі вібропривода 6 коливання через шток 5 передаються рухомій мембрані 4. В отворі 3 починає багаторазово циркулювати рідина 15, створюючи струмінь рідини який протікає також багаторазово крізь активуючі елементи 11.

При проходженні рідини через отвір 3, завдяки певному співвідношенню діаметра рухомої мембрани D до діаметра d отвору ($D/d = 12$), розрахованим відповідно амплітуди та частоти коливань віброприводу в отворі 3 періодично утворюються кавітаційні порожнини, тобто виникає гідрокавітація, яка також енергетично впливає на структуру води. Експериментальні дослідження [22] з підвищення біологічної активності води, проведені на вібраційній машині за 30 хвилин, показали зміну її основних параметрів, тобто: зменшення поверхневого натягу та збільшення рН від 7 рН до 8,2 рН, що засвідчує збільшення біологічної активності води.

Створені експериментально-промислові моделі вібраційних машин для миття, просочування, гідродробозміцнення, зняття задилок та облою, зміни властивостей води та її знезараження відзначаються енергоощадністю та необхідною інтенсивністю технологічної дії. Оцінку рівня енергоощадності розробленої техніки виконано за [23–25] та наведено у таблиці 1.

Таблиця 1

Порівняння основних характеристик розробленої техніки з існуючою

№	Аналог	Амплітуда коливань	Частота коливань	Потужність	Час оброблення
	Спроектована вібраційна машина				
1	Ультразвукові установки для зняття задилок УЗВД-6, УЗВД-8	0,2 мм	22 кГц	8–10 кВт	1,5–4 хв.
	Вібраційні машини струмінно-пульсуючі для зняття задилок	2 мм	12 Гц	400 Вт	6 хв.
2	Установки для гідродробозміцнення з постійною подачею робочих тіл	-	-	0,9–1,6 кВт	5–6 хв.
	Вібраційні машини струмінно-пульсуючі з періодичною подачею робочих тіл	2 мм	15 Гц	400 Вт	2–5 хв.
3	Обладнання для зміни властивостей води та її знезараження	10 мм	0,3–1 Гц	5–12 кВт	60 хв.
	Вібраційні машини для зміни властивостей води та її знезараження	3 мм	14–16 Гц	300 Вт	30 хв.

Висновки

1. Запропоновано спосіб та конструкції механізмів утворення пульсуючих струменів рідини.
2. Дослідження режимів роботи вібраційних гідропульсаторів показало нелінійний характер частотної характеристики максимального тиску завдяки виникненню гідрокавітації. Визначено умови зриву

кавітаційної порожнини у насадку гідропульсатора.

3. У результаті експериментальних досліджень отримано залежності середньої швидкості потоку рідини у насадку гідропульсатора від різних параметрів приводу: частоти, амплітуди, відстані від зрізу насадка до датчика. Отримано амплітудні і частотні залежності миттєвих тисків у насадку та максимальну силу удару струменя по поверхні датчика.

4. З аналізу геометричних характеристик пульсуючого тіла встановлено, що газорідний потік, отриманий з насадка гідропульсатора, більше зберігає вихідну швидкість та гідродинамічну силу тиску, ніж турбулентний потік рідини при певній відстані одного і того ж насадка завдяки меншому куту одностороннього розширення потоку.

5. Запропоновані конструкції вібраційних установок різного технологічного призначення відзначаються енергоощадністю та необхідною інтенсивністю технологічної дії.

Література

1. Ганиев Р. Ф. Динамика частиц при воздействии вибраций / Р. Ф. Ганиев, Л. Е. Украинский. – К. : Наукова думка, 1975. – 138 с.
2. Силин Р. И. Исследование гидропульсаторов и использование их в устройствах для обработки поверхностей деталей / Р. И. Силин, А. И. Гордеев // Автоматизация производственных процессов в машиностроении и приборостроении. – 1990. – Вып. 29. – С. 54– 59.
3. Силин Р. И. Применение гидропульсатора как модуля при проектировании вибрационных машин / Р. И. Силин, А. И. Гордеев // МЕХАНИКА Z. 59. Modulowe technologie i konstrukcie w budowej maszyn : materialy 3. Międzynarodowej konferencji „Naukowo-Technicznej-MTK 2002”. – Rzeszow, 2002. – С. 29– 33.
4. Маргулис М. А. Звукохимические реакции и сонолюминесценция / М. А. Маргулис. – М. : Химия, 1986. – 288 с.
5. Арзуманов Э. С. Кавитация в местных гидравлических сопротивлениях / Э. С. Арзуманов. – М. : Энергия, 1978. – 304 с. : ил.
6. Корнфельд М. Упругость и прочность жидкости / М. Корнфельд. – М. : ГИТТЛ, 1951. – 107 с.
7. Эпштейн Л. А. Возникновение и развитие кавитации / Л. А. Эпштейн // Труды ЦАГИ. – 1959. – № 655. – С. 41– 118.
8. Зарембо Л. К. Введение в нелинейную акустику / Л. К. Зарембо, В. А. Красильников. – М. : Наука, 1966. – 519 с.
9. Аналіз динамічних процесів у вібраційних гідропульсаторах / Р. І. Сілін, А. І. Гордєєв, Ю. В. Савицький, В. В. Третько // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2000. – № 3. – С. 44– 46.
10. Теория турбулентных струй / под ред. Г. Н. Абрамовича. – М. : Машиностроение, 1984. – 742 с.
11. Гордеев А. И. Экспериментальное исследование геометрических и динамических характеристик затопленных газожидкостных струй в устройстве для мойки / А. И. Гордеев, Н. А. Сивченко, М. А. Фетисов; М-во образования Укр. ССР. – К., 1987. – 10 с. – Деп. в УкрНИИТИ 09.01.87, № 314, Ук-87.
12. Чугаев Р. Р. Гидравлика : учебник для вузов / Р. Р. Чугаев. – Л. : Энергоиздат, 1982. – 627 с. : ил.
13. Пат. на корисну модель 21279 Україна, МПК В 24 В 5/00. Устаткування для вібраційної струминно-абразивної обробки дрібних деталей / Р. І. Сілін, А. І. Гордєєв, В. В. Третько, Є. А. Урбанюк (Україна); заявник і патентовласник Хмельницький нац. ун-т. – № 200608711; заявл. 03.08.2006; опубл. 15.03.2007, Бюл. № 3. – 3 с.
14. Сілін Р. І. Вібраційна установка для дробоструменевого зміцнення інструменту / Р. І. Сілін, А. І. Гордєєв, О. Б. Лаврентьев // Вибрации в технике и технологиях. – 2002. – № 4 (25). – С. 43– 45.
15. Пат. на корисну модель 336441 Україна, МПК В 24 В 5/00. Пристрій для гідродробоструменевого зміцнення фасонного інструменту / Р. І. Сілін, А. І. Гордєєв, О. А. Гордєєв (Україна); заявник і патентовласник Хмельницький нац. ун-т. – № 200808743; заявл. 16.05.2007; опубл. 27.10.2008, Бюл. № 20. – 3 с.
16. Сілін Р. І. Вібраційне обладнання для кавітаційно-магнітної обробки води / Р. І. Сілін, А. І. Гордєєв // Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні. – Львів, 2009. – № 43. – С. 33– 43.
17. Пат. на корисну модель 37257 Україна, МПК С 02 F 1/48. Пристрій для кавітаційно-магнітної обробки води / Р. І. Сілін, А. І. Гордєєв, Б. А. Баран, Є. А. Урбанюк (Україна); заявник і патентовласник Хмельницький нац. ун-т. – № 200806742; заявл. 16.05.2008; опубл. 25.11.2008, Бюл. № 22. – 4 с.
18. Пристрій для кавітаційно-магнітної обробки води / А. І. Гордєєв, Б. А. Баран, А. К. Бережнюк, І. І. Сорока // Перспективные разработки науки и техники – 2007 : матер. междуна. науч. конф. – Днепропетровск : Наука и образование, 2007. – Т. 14 : Технические науки. – С. 52– 54.
19. Сілін Р. І. Пристрій для кавітаційно-магнітної обробки води з електромагнітним приводом / Р. І. Сілін, А. І. Гордєєв, Є. А. Урбанюк // Nastoleni moderni vedi – 2008 : materialy IV mezinarodni vedecko-prakticka konference. – Praha : Publishing House «Education and Science», 2008. – Dil 9 : Technicke vedy. – С. 12– 15.
20. Сілін Р. І. Технологія гідрокавітаційно-магнітної обробки води та вібраційне обладнання / Р. І.

Сілін, А. І. Гордєєв, Б. А. Баран // Вісник ХНУ. Технічні науки. – 2008. – № 3 (112). – С. 68–74.

21. Пат. на корисну модель 54071 Україна, МПК С 02 F 1/30. Вібраційний пристрій для біологічної активації води / Р. І. Сілін, А. І. Гордєєв, Р. С. Сілін, О. А. Гордєєв (Україна); заявник і патентовласник Хмельницький нац. ун-т. – № 201005159; заявл. 28.04.2010; опубл. 25.10.2010, Бюл. № 20. – 4 с.

22. Сілін Р. І. Технологія та вібраційне обладнання для біологічної активації води / Р. І. Сілін, А. І. Гордєєв // Современные достижения в науке и образовании : сб. тр. III междунар. науч. – техн. конф., (Тель-Авив, Израиль). – Хмельницький : ХНУ, 2009. – С.114–117.

23. Петросов В. В. Гидродробеструйное упрочнение деталей машин и инструмента / В. В. Петросов. – М. : Машиностроение, 1977. – 166 с.

24. Карпачова С. М. Основы теории и расчета пульсационных аппаратов и пульсаторов / С. М. Карпачова, Л. С. Рагинский, В. М. Муратов. – М. : Атомиздат, 1981. – 224 с.

25. Келлер О. К. Ультразвуковая очистка / О. К. Келлер, Г. С. Кратыш, Г. Д. Лубяницкий. – Л. : Машиностроение, 1977. – 184 с. : ил.

References

- Ganiev R.F., Ukrainskij L.E.: *Dynamica chastic pri vozdejstvii vibracij*, Kiiiv, Naukova Dumka, 1975, 138 p.
- Silin R. I., Gordeev A.I.: *Issledovanie gidropulsatorov I ispolzovanie ix v ustrojstvax dlja obrabotki poverxnostej detalej. Avtomatisacija proizvodstvennyx processov v machinostroenii i priborstroenii*, Lvov, 1990, Vol. 29. – pp. 54-59.
- Silin R. I., Gordeev A.I.: *Primenenie gidropulsatora kak modulya pri proektirovanii vibracionnyx machin*. MECHANIKA Z. 59. *Modulowe technologie i konstrukcie w budowej maszyn: materialy 3, Miedzynarodowej konferencji "Naukowo-Technicznej-MTK 2002"*, Rzeszow, 2002, pp. 29-33.
- Margulis M.A. : *Zvukohimicheskie reakcii i sonoluminiscentiya*. Moscow, Chimiya, 1986, 288 p.
- Arzumanov E. S.: *Kavitacija v mestnyx hydravlicheskich soprotivlenijax*. Moscow, Energiya, 1978, 304 p.
- Kornfeld M.: *Uprugost I prochnost gidkosti*. Moscow, GITTL, 1951, 107 p.
- Epstein L.A.: *Voznikovenie i razvitie kavitacii*. Trudy CAGI, 1959, № 655, pp. 41–118.
- Zarembo L.K.: *Vvedenie v nelinejnuyu acusticu*. Moscow, Nauka, 1966, 519 p.
- Silin R.I., Gordeev A.I. Savitskij YU.V., Tretko V.V.: *Analiz dinamichnyx procesiv u vibracijnyx hidropulsatorah. Vymiriualna ta obchysliualna technica v tehnologichnyx procetsax*. 2000, № 3, pp. 44–46.
- Abramovich G.N.: *Theoriy turbulentnyx procesov ed*. Moscow, Mashinostroenie, 1984, 742 p.
- Gordeev A.I., Syvchenko N.A., Fetisov M.A.: *Eksperimentalnoe issledovanie geometricheskix i dinamicheskix charakteristic zatoplenyx gazozhidkostnyx struj v ustrojstve dlja mojki. M-in obrazovanij Ukr. SSR, K., 1987. – 10 p. – Dep. in UkrNIINTI 09.01.87, № 314, Uk-87*
- Chugaev R.R. *Gidravlika: Uchebnik dlj vuzov*, L., Energoatomizdat, 1982, 627 p.
- Pat. na korysnu model 21279 Ukraina, MPC B 24 B 5/00. *Ustatkuvannya dlja vibracijnoi strumunno-abrasivnoi obrobky dribnyx detalei*. R.I. Silin, A.I. Gordeev, V.V. Tretko, E.A. Urbaniuk (Ukraina); zaiavni i patentovlasnik Chmelnutzkyi nac. universitet. – № 200608711, zaiav. 08/03/2006, opubl., 15.03.2007, Biul., № 3, 3 p.
- Silin R.I., Gordeev A.I., Lavrentiev O.B.: *Vibraciina ustanovka dlja drobostrumenevogo zmitsnennia instrumenta. Vibracii v technice i technologiiax*, 2000, № 4 (25), pp. 43-45.
- Pat. na korysnu model 336441 Ukraina, MPC B 24 B 5/00. *Prustrii dlja gidrodrobostumenevogo zmitsnennia fasonnogo instrumenta*. R.I. Silin, A.I. Gordeev, O.A Gordeev (Ukraina); zaiavni i patentovlasnik Chmelnutzkyi nac. universitet. – № 200808743, zaiav. 16/05/2007, opubl. 27.10.2008, Biul., № 20, 3 p.
- Silin R. I., Gordeev A.I.: *Vibratsiine obladnannia dlja cavitaciino-magnitnoi obrobku vody. Avtomatisacija vurobnuchux procesiv u machinobuduvanni i priladobuduvani*, Lvov, 2009, № . 43, pp. 33-43.
- Pat. na korysnu model 37257 Ukraina, MPC C 02 F 1/48. *Prustrii dlja cavitaciino-magnitnoi obrobku vody*.
- R.I. Silin, A.I. Gordeev, B.A. Baran, E.A. Urbaniuk (Ukraina); zaiavni i patentovlasnik Chmelnutzkyi nac. universitet. № 200806742, zaiav. 05/16/2008 opubl. 25.11.2008, Biul., № 22, 4 p.
- Gordeev A.I., Baran B.A., Berezniuk A.K., Soroka I.I.: *Prustrii dlja cavitaciino-magnitnoi obrobku vody. Perspektivnye razrabotki nauki I texniki -2007: Materialy' Mezhdunarodnoj nauchno-texnicheskoj konferencii*, Nauka i obrazovanie, Vol. 14, Dnepropetrovsk, pp.52-54.
- Silin R.I., Gordeev A.I., Urbaniuk E.A.: *Prustrii dlja cavitaciino-magnitnoi obrobku vody z elektromagnitnym pryvodom. Nastoleni moderni vedi – 2008 : materialy IV mezinarodni vedecko-prakticka konferencie. – Praha : Publishing House «Education and Science», 2008. – Dil 9 : Technicke vedy, pp. 12–15.*
- Silin R.I., Gordeev A.I., Baran B.A.: *Technologija hidrokavitaciino-magnitnoi obrobku vody ta vibraciine obladnannia*. Visnyk XNU, *Texnichni nauki*, 2008, № 3 (112), p. 68–74.
- Pat. na korysnu model 54071 Ukraina, MPC C 02 F 1/30. R.I. Silin, A.I. Gordeev, R.S. Silin, O.A Gordeev (Ukraina); zaiavni i patentovlasnik Chmelnutzkyi nac. universitet. – № 201005159; zaiav. 28.04.2010; opubl., 25.10.2010, Biul. № 20, 4 p.
- Silin R.I., Gordeev A.I.: *Technologija ta vibraciine obladnannia dlja biologichnoi aktyvacii vody. Sovremennye dostizheniia v nauke I obrazovanii. Materialy' III Mezhdunarodnoj nauchno-texnicheskoj konferencii (Tel-Aviv, Izrail)*, Xmelnitkii, XNU, 2009, pp.114–117.
- Petrosov V.V.: *Hydrodrobestruinoe uprochnenie detalei machine i instrumenta*. Moscow, Mashinostroenie, 1977, 166 p.
- Karpachova S.M., Raginskii L.S., Muratov V.M.: *Osnovy teoriii i raschota pulsatsionnyx aparatov i pulsatorovio*. Moscow, Atomizdat, 1981, 224 p.
- Keller O.K., Kraty'sh G.S., Lubyanskii G.D.: *Ultrazvukovaia ochistka*. Leningrad, Mashinostroenie, 1977, 184 p.

Рецензія/Peer review : 16.3.2013 p.

Надрукована/Printed :8.4.2013 p.

Статтю представляє: д.т.н., проф. Сілін Р.І.