

$$S_{1,2} = \frac{P_1 + P_2}{2 \cosh h} \pm \sqrt{\left(\frac{P_1 + P_2}{2 \cosh h}\right)^2 - P_1 P_2} . \quad (34)$$

Якщо за вихідні прийняти напруження  $P_M$  по площинках максимального відхилення,  $S = \frac{P_M}{\cos r}$ ,

$$R = P_M \cdot \operatorname{tg} \eta$$

$$S_{1,2} = \frac{P_M}{\cos r} \pm P_M \cdot \operatorname{tg} \rho = S(1 \pm \sin r) . \quad (35)$$

### Висновки

Наведені у статті результати досліджень розширюють положення теорії напруженого стану, сформульовані переважно для ортогональних напрямів, на більш загальний клас неортогональних спряжених площинок, які представляють особливий інтерес для механіки ґрунтів і сипких середовищ, оскільки можуть бути використані для формулювання деформаційної моделі сипкого середовища. Достовірність результатів обумовлюється використанням добре апробованого математичного апарату теорії напруженого стану та співпадінням результатів, одержаних для загального випадку спряжених площинок з відомими співвідношеннями для головних площинок і площинок граничної рівноваги сипкого середовища.

### Література

1. Малинин Н. Н. Прикладная теория пластичности и ползучести / Малинин Н. Н. – М. : Машиностроение, 1975. – 400 с.
2. Боткин А. И. О прочности сыпких и хрупких материалов / А. И. Боткин // Известия научно-исследовательского института гидротехники. – 1940. – Т. 26. – С. 205–236.
3. Ковтун В. В. Экспериментальное исследование прочности песков в условиях плоской деформации / В. В. Ковтун // Труды Союзморниипроекта. Вып. 17. – М. : Транспорт, 1967. – С. 95–98.
4. Соколовский В. В. Статика сыпучей среды / Соколовский В. В. – М. : Наука, 1960. – 243 с.
5. Соколовский В. В. Теория пластичности / Соколовский В. В. – М. : Высшая школа, 1969. – 608 с.
6. Шихиев Ф. М. Кинематическая теория давления ґрунтов на причальные сооружения и другие типы жестких и гибких ограждений: дис. ... доктора техн. наук : 05.22.18 / Фуад Мувсумович Шихиев. – Одесса : ОИИМФ, 1964. – 471 с.
7. Голушкевич С. С. Статика предельных состояний ґрунтовых масс / Голушкевич С. С. – М. : Гос. изд. теор. лит., 1957. – 288 с.

Надійшла 2.12.2009 р.

УДК 620. 193. 16

А.І. ГОРДЕЄВ

Хмельницький національний університет

## РОЗВИТОК НАУКОВИХ ОСНОВ ПРОЕКТУВАННЯ ВІБРАЦІЙНОГО ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ЗМІНИ ВЛАСТИВОСТЕЙ ВОДИ ТА ЇЇ ЗНЕЗАРАЖУВАННЯ

*Наведено аналіз використання вібраційних коливань та кавітації у рідині. Запропоновано технологію та вібраційне обладнання для зміни властивостей води та її знезаражування. Запропоновано наукові основи загальної методики проектування вібраційного обладнання на основі гідропульсатора.*

*The analysis of use of vibrating fluctuations and catching in a liquid is given. It is offered technology and vibrating equipment for change of properties of water and anthemion. It is offered scientific bases of a general technique of designing of the vibrating equipment on a basis vibrating.*

Ключові слова: коливання рідини, кавітація, проектування вібраційних машин.

Використання вібраційних коливань у технологіях обумовлюється потребами підвищення інтенсивності, поліпшення якісних показників, а в деяких випадках і можливістю реалізації технологічних процесів. Унікальні можливості вібраційного поля дозволяють успішно здійснювати не тільки оздоблювальну – зачисну та зміцнювальну операції, але і такі операції, як сепарація, перемішування, вібротранспортування за важких експлуатаційних умов, гомогенізація, фільтрування, сушіння, насичення середовища певними речовинами, руйнування поверхонь та ряд інших процесів. Це обумовлює ефективність застосування вібраційних технологічних машин в багатьох галузях промислового виробництва.

Розвиток вібраційних конвеєрних машин веде початок із хвильових та вібраційних конвеєрів, які виконують суто транспортні функції. Фундаментальні роботи І.І. Блехмана, І.Ф. Гончаревича, Г.Ю.

Джанелідзе, В.О. Повідайла, В.М. Потураєва, Р.І. Сіліна, А.О. Співаковського, В.Н. Франчука, К.В. Фролова, А.Г. Червоненко та інших вчених обґрунтовують теоретичні основи процесу вібраційного переміщення та конструктивні схеми вібраційних транспортних машин. Разом із переміщенням супутня обробка продукції вже здійснюється у вібраційних транспортно-технологічних машинах.

У багатьох галузях промисловості усе більш широке застосування знаходять вібраційні технологічні процеси, розроблені під керівництвом Р.Ф. Ганієва, Н.І.Кобаско, у яких використовуються багатофазні рідинні середовища. Це можуть бути розплави металів, скла і полімерів, суспензії твердих часток і газових пухирців у рідині, мілко дисперсні суспензії крапель у газоподібному чи рідкому середовищі і т.п. При здійсненні процесів, пов'язаних з необхідністю рівномірного розподілу різних фаз у рідкій основі (одержання композитів і піноматеріалів) або їхньої сепарації з рідини (дегазація і флотаційне збагачення), істотного значення набуває можливість прогнозування реакції таких систем на різного роду зовнішні періодичні впливи. Як показали раніше виконані дослідження динамічних явищ у багатофазних рідинних середовищах, що піддані керованим вібраційним впливам [1, 2], багато з них можуть бути успішно використані як для інтенсифікації зазначених процесів, так і при розробці і реалізації принципово нових технологічних прийомів, а саме зміни властивостей та знезаражування водних потоків [3-11].

Відомі наукові роботи, в яких розглядаються наведені вище технологічні машини стосуються, здебільшого, вузькоспеціалізованого різновиду обладнання. На даний час є фундаментальні праці, які присвячені теоретичним основам вібраційного руху сипкого або рідинного середовища, розрахунку вібраційних приводів, але відсутні основи проектування та практичного розрахунку вібраційних технологічних машин, де рідина є об'єктом обробки.

Дана наукова робота містить розвиток наукових основ та дослідження тенденцій розвитку конструкцій технологічного вібраційного обладнання як спеціалізованого, так і прохідного типу, в якому рідина виступає у ролі середовища-об'єкта, який піддається керованим вібраційним впливам.

На даний час накопичено чисельний експериментальний матеріал про фізико-хімічні властивості чистої води та водних систем, надійно встановлені деякі деталі будови та властивостей води, однак багато питань поки що залишається без відповіді. Власне структура та властивості чистої води визначають комплекс специфічних її властивостей як розчинника і цим відрізняють від неводних розчинників.

Відомо, що структуру звичайної води як фізичного тіла утворюють в основному не окремі її молекули, але асоціації молекул (мікрокластери), тобто багатоядерні комплексні сполучення, основу молекулярної структури яких становить об'ємний каркас-комірка з атомів безпосередньо зв'язаних між собою.

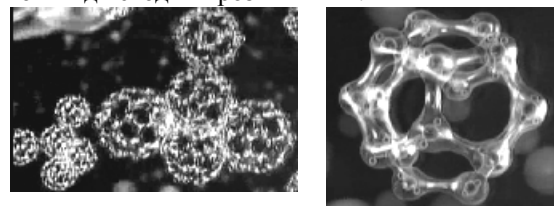


Рис. 1. Моделі кластерних структур води

Цими атомами найчастіше є перехідні метали, потім неперехідні, а також такі неметали як вуглець, бор, кремній, сірка, азот, фосфор. Деякі з цих елементів присутні у воді найчастіше у формі хімічних сполук. Саме ці атоми й виконують функцію центрів утворення вказаних комірок і, крім того, їх сполуки є шкідливими для живого організму. Молекули води та деякі інші складові її частинки мають по два електричних різнойменних рівних за величиною точкових заряди, які знаходяться на деякій відстані один від одного, тобто вони є диполями води. Вищевказані атоми та диполі є основною причиною утворення мікрокластерної структури води. Молекули питної води зазнають в організмі структурно-орієнтаційну впорядкованість, тобто перетворення її в так звану живу воду, на що витрачається близько 70 % енергії її засвоєння організмом. Близькою до живої води за структурою є тала вода.

Відомий спосіб одержання питної води, близької за структурою до талої, який включає кип'ятіння води протягом 1-2 хвилин, різке охолодження до температури 20-30°C, заморожування, нагрівання до танення та утворення бурульки, яка містить майже всі домішки та яку видаляють з води. Цей спосіб дозволяє очистити воду від шкідливих та отруйних речовин, стерти записані в пам'ять води патологічні фактори екзогенного походження, на 3-7 % знизити вміст дейтерію та утворити структуру води, близьку до живої. Проте спосіб є малопродуктивним.

Значно продуктивнішим є відомий спосіб одержання очищеної біологічно активної питної води шляхом впливу на потік води магнітним полем, силові лінії якого перетинають потік, з наступною фільтрацією та розширенням потоку при співвідношенні основи поздовжнього перерізу, що розширений до його довжини 1,618 [12]. Магнітне поле викликає поворот диполів, які у звичайній воді розташовані хаотично, відповідно до магнітних силових ліній, тобто переорієнтовує диполі. Це призводить до зміцнення зв'язків між молекулами та часткового їх розриву, часткового стирання з пам'яті води патологічних факторів, утворення деякої структурно-орієнтаційної впорядкованості. В результаті чого змінюється структура води, іншими словами, відбувається її реструктуризація. І чим сильніше магнітне поле, тим більшу реструктуризацію воно викликає. Розширення потоку та, як наслідок, його гальмування і турбулізація спричиняють подальшу реструктуризацію води, яка тим ефективніша, чим більша довжина цього розширення. Співвідношення основи поздовжнього перерізу розширення до його довжини 1,618 сприяє формуванню впорядкованої мікроструктури води та заряджає її позитивною енергетикою.

Оброблена таким чином вода значно легше піддається впливу цілеспрямованої реструктуризації, наприклад, шляхом її пропускання через шар мінералів з льодоподібною молекулярною структурою, що

наближує структуру питної води до структури талої.

Однак в описаному способі здійснюється одноразовий вплив на воду магнітним полем та одноразовий вплив розширення потоку, що обумовлює переорієнтацію диполів в одному напрямку, тобто без їх розхитування. Наслідком цього є недостатній ступінь розриву та послаблення зв'язків між молекулами. Ангармонізм коливальних рівнів викликає фото-дисоціацію молекул води на радикали  $\text{OH}$  і  $\text{H}$  з виділенням коливальної енергії. Крім цього, різко збільшується швидкість реакції коливально збуджених молекул води з радикалами  $\text{H}$  з виділенням складових –  $\text{OH}$ ,  $\text{H}_2$  і коливальної енергії. Ці процеси насичують рідину елементами  $\text{OH}$ ,  $\text{O}^-$ ,  $\text{O}^+$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{H}_2$  і коливальною енергією. З іншого боку зростають електричні нестационарні сили взаємодії між сусідніми диполями, які посилюють їх коливання як цілісного об'єкту і збільшують вірогідність руйнування рідкокристалічної структури рідини.

Для підвищення ефективності цих впливів необхідно збільшити напруженість магнітного поля або довжину розширення. Проте це збільшення має обмеження, оскільки пов'язане з технічним ускладненням, а також непередбачуваністю результату його впливу на воду. Крім того, одноразовість вказаних впливів обумовлює високий ступінь зворотності реструктуризації, що, у свою чергу, призводить до часткового повернення води до попередньої структури, та як наслідок, до низького ступеня її кінцевої реструктуризації.

На даний час для знезаражування стоків використовується рідкий хлор, озон й ультрафіолет. Як правило, для цього необхідні проміжні контактні резервуари великої місткості, щоб забезпечити тривалість контакту не менше ніж 0,5 години.

Знезаражуюча дія кавітації заснована на ефектах, які виникають у турбулентних потоках рідини. Так при гідродинамічних коливаннях рідини виникають і зникають кавітаційні пухирці, при цьому стимулюються фазові переходи, підвищуються локальні температури й тиск. Крім того, у моменти утворення й зникнення кавітаційних пухирців у газонаповненій порожнині створюються умови для появи електричних зарядів, електричних і магнітних полів. У такий спосіб рідина, оброблювана кавітацією, піддається термобаричній й електромагнітній дії.

Особливість кавітаційного методу полягає в тому, що високий ступінь знезаражування води від яєць і личинок паразитів досягається за рахунок їхнього механічного розриву ударними хвилями. Для руйнування бактерій і вірусів термобаричний вплив посилюється локальною електромагнітною дією, коли наведені електричні потенціали пробивають їхні мембрани й оболонки.

Багато методів очищення, насамперед пов'язані з хімічними та біологічними методами очистки. Хімічні методи використовують хлорування в якості фундаментальної реакції. Хлорування забезпечує обеззаражування. Але хлориди, розкладаючись в воді, створюють хімічні радикали, які впливають на здоров'я людини.

Механічні та фізичні способи очистки води вільні від цих недоліків, тому механічні способи очистки води є дуже перспективними. На даний час розроблено ряд нових вібраційних машин та обладнання на основі гідропульсатора (ГП). В них вода піддається багаторазовому зворотно-поступальному проходженню (циклічній гідрокавітації) через кавітаційний пристрій (гідропульсатор) [13-16].

Встановлено аналітично умови виникнення гідрокавітації в циліндричному насадку [11] та умови зриву кільцевої порожнини у насадку:  $P_2 \leq 0,38P_1$ , де  $P_1$  і  $P_2$  – початковий і кінцевий тиски, під яким знаходиться рідина у насадку. Розроблено методологію загального синтезу вібраційного обладнання, яка показана на рис. 2.

Визначивши продуктивність обладнання та розміри гідропульсатора, частоту коливань та амплітуду коливань приводу, бажано аналітично обґрунтувати розміри робочої ємкості з точки зору створення в неї також резонансних коливань стовпа рідини, що призводить до зменшення енерговитрат.

Задача руху рідини в ємкості, яка коливається у вертикальному напрямку, призводить, як правило, до рівнянь типу:

$$\frac{d^2 q_k}{dt^2} + w_k^2 \Phi(t) q_k = 0, \quad (1)$$

де  $\Phi(t)$  – функція, яка характеризує рух ємкості.

$q_k(t)$  – коефіцієнти розкладення вільної поверхні  $Z(x, y, t)$  у ряд по фундаментальних функціях рівняння:

$$y(x, y) - I \iint_{S_0} H(x, y, 0, z, h, 0) y(z, h) dy dh = 0,$$

де  $H$  – функція Гріна задачі Неймана для області зайнятою рідиною;  $S_0$  – площа вільної незбуреної поверхні;  $W_k$  – частоти власних коливань рідини, пов'язані з фундаментальними числами рівняння (1) залежністю:

$$I_k = \frac{W_k^2}{g},$$

де  $g$  – прискорення сили тяжіння.

У випадку гармонічного руху рідини у ємкості функція  $\Phi(t)$  приймає вигляд  $\Phi(t) = 1 - 2m \cos q t$

і рівняння (1) приймає вигляд рівняння Мат'є:

$$\frac{d^2 q_k}{dt^2} + w_k^2 (1 - 2m \cos q) q_k = 0, \quad (k = 1, 2, \dots) \quad (2)$$

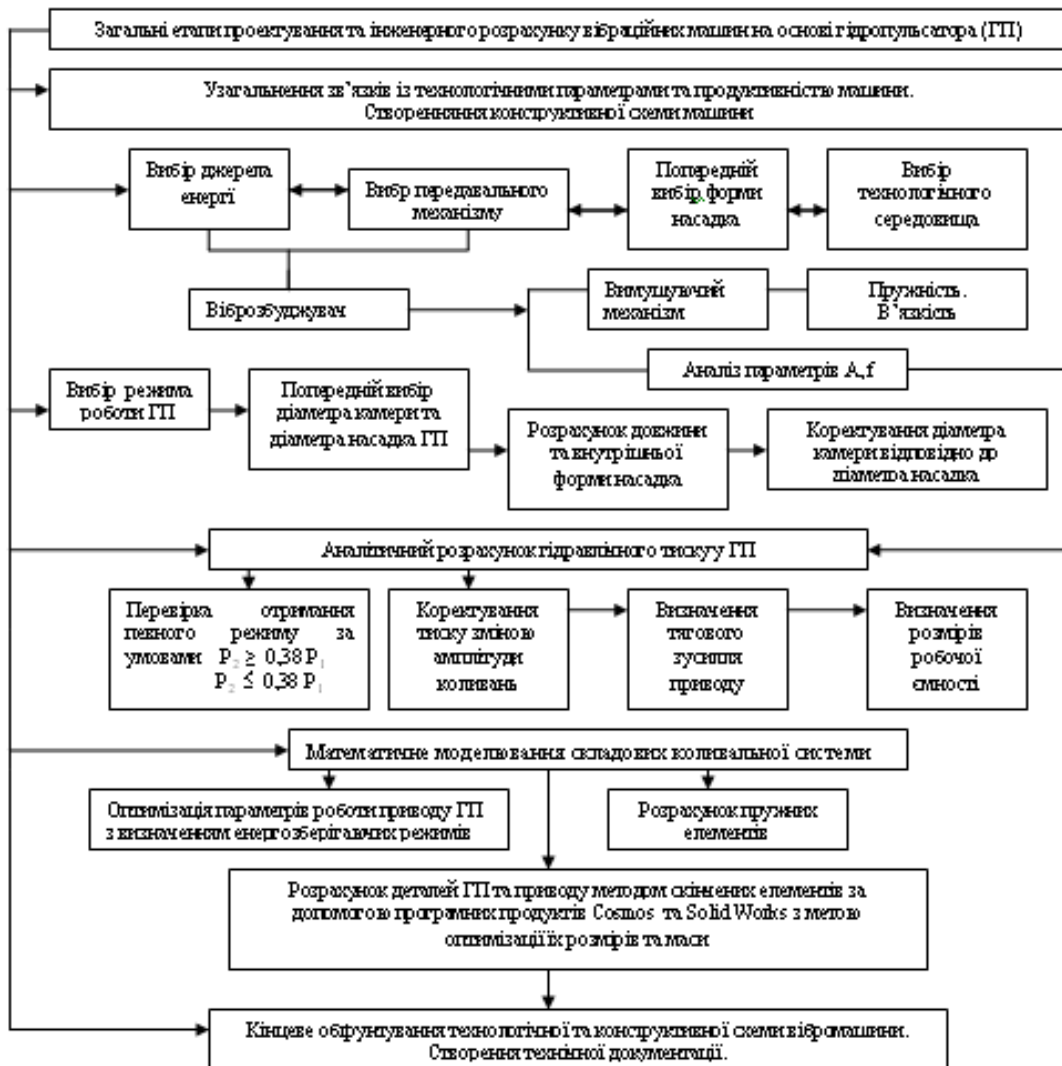


Рис. 2. Етапи проектування та інженерного розрахунку вібруючих машин на основі ГП

Згідно з рівнянням (2) в межах областей нестійкості коливання рідини зростають за експоненціальним законом. Між тим досвід показує встановлені коливання кінцевої амплітуди.

Розглянемо задачу з урахуванням в'язкості. Лінійні рівняння в'язкої рідини будуть давати асимптотичні затухаючі рішення усюди, за виключенням областей нестійкості. Але точне рішення отримати дуже складно. Рух рідини в цьому випадку не є потенційним і відповідно методи теорії малих амплітуд не можливо застосовувати.

Якісну сторону явища можливо встановити, якщо враховувати в'язкість опосередкованим шляхом. Для цього достатньо додати в рівняння (2) складові типу:

$$2e \frac{dq}{dt},$$

де  $e$  – коефіцієнт затухання, який різний для різних форм коливань.

Приблизно оцінити порядок коефіцієнта затухання можна за формулою для випадку хвиль у глибокій воді:

$$e = \frac{8p^2 n}{l^2}, \quad (3)$$

де  $n$  – коефіцієнт кінематичної в'язкості;  $l$  – довжина хвилі.

Відповідно  $e \approx \frac{n}{l^2}$ , де  $l$  – один з характеристичних розмірів ємності.

З урахуванням коефіцієнта затухання рівняння (2) отримує вигляд:

$$\frac{d^2 q_k}{dt^2} + 2e_k \frac{dq_k}{dt} + w_k^2 (1 - 2m \cos q t) q_k = 0. \quad (4)$$

Властивості рівняння (4) добре вивчені. Області нестійкості з урахуванням затухання декілько звужуються, а при малих  $m$  збурення коливань зовсім стає неможливим. Для області, яка лежить в межах  $q = 2w$ , мінімальне значення  $m_{\min}$ , при якому ще можливе збурення коливань, визначається величиною порядку  $e/w$ .

$$m_{\min} \approx \sqrt{\frac{e}{w}}. \quad (5)$$

Враховуючи, що  $w \cdot l \approx V$  – характеристична швидкість, отримаємо

$$m_{\min} \approx N_{\text{Re}}^{\frac{1}{k}},$$

де  $N_{\text{Re}} = \frac{V \cdot l}{\nu}$  – число Рейнольдса;  $k = 1, 2, \dots$

Для прикладу розглянемо коливання прямокутної ємкості розмірами  $a = b = h = 1$  м заповненою водою. Для такої ємкості маємо:

$$k = p \sqrt{\frac{p^2}{a^2} + \frac{q^2}{b^2}}, \quad (p, q = 1, 2, \dots). \quad (6)$$

При  $p = q = 1$  для води при  $\nu = 0,1 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$  маємо  $k = 0,00044 \text{ м}^{-1}$ ,  $w = 6,6 \text{ с}^{-1}$ . Коефіцієнт затухання  $e \approx 1,97 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$ . Для збудження головного резонансу ( $q = 2w$ ) достатньо щоб  $m \geq 0,596 \cdot 10^{-4}$ . В перерахунку на амплітуди коливань ємкості це дає  $A \geq 0,0067 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ . Для другого резонансу ( $q = w$ ) необхідно  $m \geq 0,772 \cdot 10^{-2}$ , що дає амплітуду коливань  $A \geq 0,0035 \text{ м}$ .

Оскільки для ємкості кінцевих розмірів спектр власних частот має границі знизу, а коефіцієнт затухання згідно з (3) зростає із зменшенням довжини хвилі, слідує передбачати, що при завданих  $m$  неможливе збурення хвиль, довжина яких менше деякого значення. Дано оцінку цієї довжини, враховуючи, що  $w^2 \approx \frac{p \cdot g}{l}$ , використавши (3) та (5) знайдемо:

$$m_{\min} \approx \sqrt[k]{\frac{8 \cdot p^{\frac{3}{2}} \cdot \nu}{l^{\frac{3}{2}} \cdot g^{\frac{1}{2}}}}, \quad (k = 3, 2, \dots). \quad (7)$$

Звідси граничне значення хвилі

$$l_{\min} \approx 4p \cdot \sqrt[k]{\frac{\nu^2}{g \cdot m^{2k}}}, \quad (k = 1, 2, \dots). \quad (8)$$

Якщо, наприклад,  $m = 0,01$  то динамічне прискорення складає  $0,05g$ . Тоді для води  $l_{\min} \approx 0,0126 \text{ м}$ . Тобто хвилі меншої довжини збурити неможливо.

Виходячи з умови рівності об'ємів рідини, яка перегікає крізь насадок з гідропульсатора до ємкості, можна записати рівняння з якого отримаємо амплітуду коливань рідини у ємкості.

$$\frac{p \cdot d^2}{4} 2A_e = \frac{p \cdot D^2}{4} 2A_z, \quad \text{звідки маємо } A_e = A_z \frac{D^2}{d^2}. \quad \text{При діаметрі камери гідропульсатора } 0,12$$

м, та амплітуді коливань  $= 0,003 \text{ м}$ , прийнявши мінімальну амплітуду коливань рідини у ємкості  $0,0126 \text{ м}$ , отримаємо максимальний діаметр ємкості:

$$d_{\max} = \sqrt{\frac{A_z \cdot D^2}{A_e}} = \sqrt{\frac{0,003 \cdot 0,12^2}{0,0126}} = 0,0585 \text{ м}. \quad (8)$$

При таких співвідношеннях параметрів ( $A_z, A_e, D$ ), резонансні хвилі в стовпі, який коливається, можливо збуджувати при розмірах ємкості які менші за  $d_{\max}$ . На рис. 4 показана фотографія стовпа рідини, який коливається в робочій ємкості діаметром  $0,055 \text{ м}$ . Стоячі хвилі дають можливість в резонансних точках коливатися невеликим пухирцям повітря, що також додатково впливає на зміну властивостей води.

Досліди по зміні властивостей та знезаражуванню, проведені на експериментальній установці, показали збільшення рН від 6,4 (для контрольної води) до рН 6,9 (обробленою кавітаційним способом) та до рН 7,2 (при одночасному впливі кавітації та магнітного поля). Дослідження зміни складу та властивостей

води показали зниження вмісту кальцію та магнію на 22%, підвищення окислювальної здатності води на 70%, зменшення у 2,2 рази біологічної потреби кисню, а знезаражування води показало на зразках зниження кількості колоній від 63 шт. до 3 шт [3].

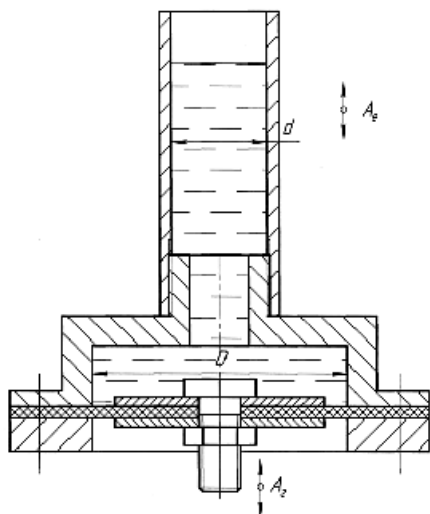


Рис. 3. Схема гідропульсатора з робочою ємкістю:  $d$  – діаметр ємкості;  $D$  – діаметр камери гідропульсатора;  $A_e$  – амплітуда коливань мембрани гідропульсатора;  $A_e$  – амплітуда коливань рідини у ємкості

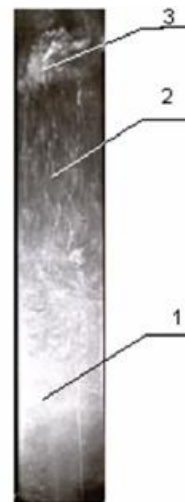


Рис. 4. Фотографія стовпа рідини, який коливається в робочій ємкості: 1 – рідина на виході з насадки; 2 – пухирці повітря, які коливаються з рідиною; 3 – збурена поверхня рідини ( $A_e = 3$  мм,  $A_e = 13$  мм;  $D = 120$  мм;  $d = 55$  мм)

Подальшим етапом даної роботи було встановлення основних взаємозв'язків між конструктивними характеристиками та параметрами режимів роботи приводу обладнання та розробку вібраційного обладнання прохідного типу (рис. 5, рис. 6) для здійснення технології кавітаційної обробки значних по об'ємах водних потоків з метою зміни їх властивостей та знезаражування.

Вібраційне обладнання для очищення й знезаражування стічних вод працює в такий спосіб: у прийомну ємкість 1 заливають рідину, в якій можуть перебувати включення твердих фракцій відходів тваринницького виробництва, яка, проходячи через ґратчастий фільтр, звільняється від каменів і деревних включень, стікає в першу робочу ємкість 3 для обробки. При заповненні першої робочої ємкості 3 через отвори 13 в трубах рідина попадає в нижню частину труби через отвори 12 і заповнює її до певного рівня, після чого включається перший вібраційний струминний гідрокавітатор 6, відбувається перший ступінь очищення й знезаражування. Оброблена рідина відстоюється й перекачується насосом 8 у другу ємкість 3, а мулові осадки відкачуються насосом 9 на просушку. Далі відбувається заповнення першої робочої ємкості 3 рідиною і її обробкою. При заповненні другої ємкості 3 включається другий вібраційний струминний гідрокавітатор 6. Після включення вібраційного приводу 16 й обертання ексцентричного вала 15, при ході поршня 11 униз, рідина виштовхується через отвори 12 нагору у вигляді затоплених струменів, при ході поршня 11 нагору створюється розрядження, і напрямком струменя рідини міняється вниз, одночасно через дросель 17 і трубку 18 втягується порція повітря, регульована дроселем 17, що дробиться на дрібні пухирці. При певних співвідношеннях розмірів поршня 11 й отворів 12, а також режимів коливального процесу виникає гідрокавітація. При коливаннях поршня 11, оброблена рідина перемішується струменями з неопрацьованою рідиною, що надходить через отвори в трубі 12. Після відстоювання оброблена рідина відкачується із другої ємкості 3 за допомогою насоса 8, а мулові осадки відкачуються насосом 9 на просушку.

Біогаз, що накопичується під кришками 4, надходить по системі збору газу 5 у казан 7 і служить для розігріву оброблюваної рідини (узимку) або відбирається для інших цілей наприклад, для розігріву кормових сумішей (улітку).

Наведемо методику проектування основних розмірів елементів гідрокавітатора та параметрів роботи ексцентрикового вібраційного приводу кавітаційної установки для обробки води (рис. 8). Задамо годинний об'єм обробки води –  $V_2$  м<sup>3</sup>/год.

Вибираємо конструкцію насадка з гострими крайками на вході та на виході.

Розрахуємо орієнтовний внутрішній діаметр поршня гідрокавітатора, задавшись кутовою швидкістю  $\omega = 90$  с<sup>-1</sup>, при  $A = 2$  мм та  $y = 0,033$ .

$$D = \sqrt[3]{\frac{V_2}{450 \cdot y \cdot \omega}} = \sqrt[3]{\frac{2,6}{450 \cdot 0,033 \cdot 80}} = 0,13 \text{ м.}$$

Знайдемо діаметр насадка  $d_n = \frac{D}{12} = \frac{0,13}{12} = 0,0108 \text{ м.}$

Тоді довжина насадка  $L_n = 5 \cdot 0,0108 = 0,054 \text{ м.}$

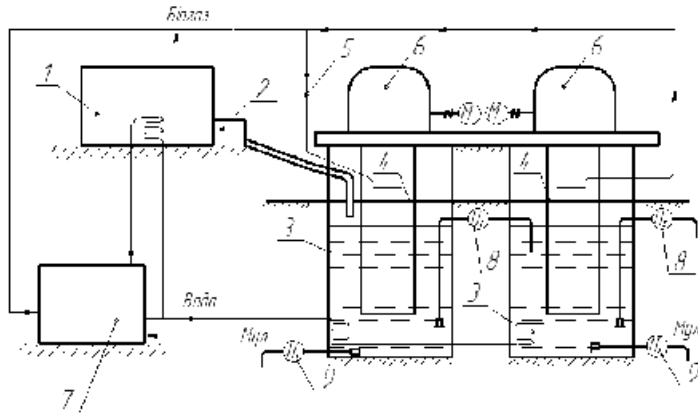


Рис. 7. Конструктивна схема вібраційного пристрою для очищення й знезараження стічних вод: 1 – ємкість для збору рідкої й твердої фракції відходів тваринницького виробництва; 2 – фільтр; 3 – ємкість; 4 – кришки; 5 – система для збору біогазу; 6 – вібраційні струминні гідрокавітатори; 7 – водяний казан і система обігріву; 8 – насос; 9 – насос для відкачки мулу

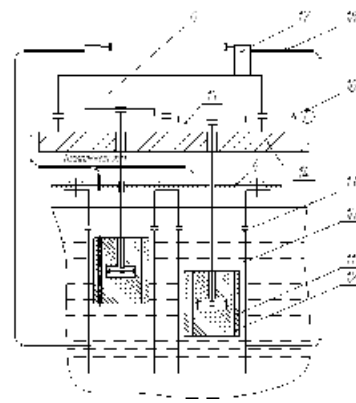


Рис. 8. Конструктивна схема вібраційного струминного гідрокавітатора: 10 – труба; 11 – поршень; 12 – отвір; 13 – отвір; 14 – кришка; 14 – плита; 15 – ексцентриковий вібраційний привод; 16 – електродвигун; 17 – повітряні дроселі; 18 – трубка

Для визначення максимального значення тиску у гідрокавітаторі підбираємо декілька значень розмірів діаметра поршня гідрокавітатора, близьких до розрахункового, та вводимо їх значення в оригінальну програму розрахунку на ЕОМ, при певних амплітудах (від 1 мм до 3 мм) із зміною частоти коливання від 8 Гц до 25 Гц.

У результаті розрахунку отримуємо залежності тиску від частоти при різних амплітудах. Задавшись амплітудою 2 мм, з розрахунків приймаємо  $P_{max} = 0,18$  МПа при частоті  $f = 16$  Гц, або при кутовій частоті  $\omega = 2\pi f = 2 \cdot 3,14 \cdot 16 = 100,5$  с<sup>-1</sup>.

Перерахуємо розміри поршня гідрокавітатора при отриманих значеннях.

$$D = \sqrt[3]{\frac{2,6}{450 \cdot 0,033 \cdot 100,5}} = 0,12 \text{ м.}$$

Уточнимо діаметр насадка та його довжину

$$d_n = \frac{D}{12} = \frac{0,12}{12} = 0,01 \text{ м.}, L_n = 5 \cdot 0,01 = 0,05 \text{ м.}$$

Визначимо розміри ємкості  $d_{max} = \sqrt{\frac{A_e \cdot D^2}{A_e}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 120^2}{12,6}} = 48$  мм, де  $A_e = l_{min} = 12,6$  мм.

Висота ємкості  $H = d_{max} (8 - 12) = 384 - 576$  мм. Приймаємо 600 мм.

Визначимо зусилля на штокові  $F_{дин} = \frac{p \cdot D^2}{4} P_{max} = \frac{3,14 \cdot 0,12^2}{4} 0,18 \cdot 10^6 = 2034$  Н.

Приймаємо масу рухомих частин  $m = 4$  кг, тоді:  $F_{ин} = m \cdot A \cdot f^2 = 4 \cdot 0,002 \cdot 16^2 = 20,1$  Н.

Тоді сумарна сила, що діє на ексцентрик, дорівнює:  $F_{max} = 2034 + 20,1 = 2054,1$  Н.

Розрахуємо мінімальні розміри кінця валу під ексцентриком за формулою:

$$M_{заг} = F_{max} \cdot l,$$

де  $l$  – величина ексцентриситету, приймаємо  $l = A = 0,002$  м.  $M_{заг} = 2054,1 \cdot 0,002 = 4,1$  Н · м.

Тоді діаметр валу під ексцентриком:  $d = \sqrt[3]{\frac{M_{заг}}{0,1 \cdot [s_{32}]}} = \sqrt[3]{\frac{4,1}{0,1 \cdot 45 \cdot 10^6}} = 0,02$  м, де  $[s_{32}] = 45$  МПа.

Приймаємо діаметр валу  $d = 0,025$  м.

З урахуванням мінімальної товщини стінки кулачка та ексцентриситету 2 мм приймаємо зовнішній діаметр кулачка 35 мм.

Визначаємо конструктивно довжину втулки повзуна  $l = 0,04$  м, діаметр повзуна  $d = 0,02$  м, приймаємо кут прикладення сили, яка зсовує  $l = 10^0$ . Перевіряємо умови заклинювання повзуна

$$tg l \geq \frac{1}{m(1 + \frac{2x - m \cdot d}{l})} = \frac{1}{0,16(1 + \frac{2 \cdot 0,02 - 0,16 \cdot 0,02}{0,04})} = 3,2 \cdot \quad tg l = 0,182.$$

$tg l = 0,182 < 3,2$  – заклинювання не відбудеться. Перевіримо пару втулка – повзун на стійкість проти зношування:

$$P = \frac{P_{max}}{d \cdot l} = \frac{1,8 \cdot 10^{-6}}{0,02 \cdot 0,02} = 0,0045 < [P] = 1 \text{ МПа.}$$

Розраховуємо потужність електродвигуна за формулою:

$$N = \frac{M_{заг} \cdot n}{9750} = \frac{4,1 \cdot 960}{9750} = 0,4 \text{ кВт.}$$

Вибираємо електродвигун, з урахуванням витрат на тертя у шатуні та підшипниках, А02– 12– 6, потужністю  $N = 0,6$  кВт, ККД = 0,7.

Розраховуємо ефективну потужність

$$N_{ef} = 0,6 \cdot 0,7 = 0,42 \text{ кВт.}$$

Розрахунок потужності електродвигуна показав, що необхідна ефективна потужність достатня для здійснення коливань приводу.

Кавітаційний вплив на рідке середовище, за рахунок вище вказаних ефектів, дозволяє досягнути суттєвої інтенсифікації хімічних перетворень у водних потоках. Таким чином, експериментальні дослідження показали доцільність використання гідродинамічної кавітації у вібраційному обладнанні [3, 6, 10, 11].

Показана можливість інтенсифікації очистки стоячих вод у невеликих водоймах без хімічних сполук та прискорення процесів окислення та бродіння та обґрунтовано конструктивну схему вібраційного обладнання.

Запропоновані наукові підходи дозволили створити узагальнену методологію для розрахунку раціональних конструктивних і технологічних параметрів вібраційних машин для впливу на властивості води та її знезаражування.

Отримані результати можуть бути враховані при розробці технологій та конструкцій обладнання очистки стічних вод промислових, комунальних підприємств, тваринницьких комплексів та гальванотехніки.

## Література

1. Ганиев Р.Ф. Исследование движения мелкодисперсных включений в колеблющемся сосуде с жидкостью, содержащей сжимаемую сферу / Р.Ф. Ганиев, В.В. Кулик, П.А. Малышев, А.С // Прикл. мех. – – 1979. – № 7. – С. 112-116.
2. Ганиев Р. Ф. Про явища локалізації і поступального переміщення газових пухирців у коливальній рідині / Р.Ф. Ганиев, Г.Н. Пучка // ДАН УССР. – 1978. – № 6. – С. 509-511.
3. Сілін Р.І. Кавітаційна обробка та її вплив на склад води / Р.І. Сілін, А.І. Гордєєв, В.В. Третько, І.І. Сорока // Вісник ТУП. – 2002. – № 3. – С. 253-257.
4. Сілін Р.І. Вібраційне обладнання для зміни властивостей води / Р.І. Сілін, А.І. Гордєєв // Тези доп. 7-го міжнар. симп. укр. інж. – мех. у Львові. – Львів: КІНПАТРИ ЛДТ, 2005. – С. 92.
5. Гордєєв А.І. Пристрій для кавітаційно-магнітної обробки води / А.І. Гордєєв, Б.А. Баран, А.К. Бережнюк, І.І. Сорока // Materiali III miedzynarodowej naukowo-practicznej konferencji «WIADOMOSCI NAUKOWEJ MYSLI – 2007» 01-15 listoda 2007 roku. Tym 12 Techniczne nauki. – Przemysl: Nauka I studia. – 2007. – С. 26-28.
6. Сілін Р.І. Вібраційне обладнання для гідрокавітаційного впливу на склад та властивості води / Р.І. Сілін, А.І. Гордєєв // 36. пр. I міжн. н-т. конференції «Повышение качества, надежности и долговечности технических систем и технологических процессов» Хургада (Єгипет). – Хмельницький: ХНУ. 2007. – С. 33-35.
7. Дослідження кавітаційно-магнітного впливу на структуру води / Р.І. Сілін, А.І. Гордєєв, Б.А. Баран, Є.А. Урбанюк // Materialy IV mezinarodni vedecko – prakticka konference «Tfektivni nastroje modernich– 2008». Dil 17: Technicke vedy. – Praha: Publishing House «Education and Science». – 2008. – С. 28– 32.
8. Сілін Р.І. Кавітаційно-магнітна обробка води та вібраційне обладнання на основі гідропульсатора / Р.І. Сілін, А.І. Гордєєв // 36. пр. II міжн. н-т. конференції «Современные достижения в науке и образовании». Нетания (Израиль). – Хмельницький: ХНУ. – 2008. – С. 46– 49.
9. Сілін Р.І. Пристрій для кавітаційно-магнітної обробки води з електромагнітним приводом / Р.І. Сілін, А.І. Гордєєв, Є.А. Урбанюк // Materialy IV mezinarodni vedecko – prakticka konference «Nastoleni moderni vedy – 2008». Dil 9: Technicke vedy. – Praha: Publishing House «Education and Science». – 2008. – С. 12-15.
10. Сілін Р.І. Технологія та вібраційне обладнання для біологічної активації води / Р.І. Сілін, А.І. Гордєєв // 36. пр. III міжн. н-т. конференції «Современные достижения в науке и образовании». Тель-Авив (Израиль). – Хмельницький: ХНУ. – 2009. – С. 114-117.
11. Сілін Р.І. Науково-технічні основи розроблення вібромашин для впливу на властивості води / Р.І. Сілін, А.І. Гордєєв // Вібрації в техніці та технологіях. – 2009. – № 4 (56). – С. 141 – 148.
12. Патент Росии № 2014287, МПК<sup>6</sup> C02F 1/48. Оборудование и способ магнитной обработки воды / Стронкин С.П., Петров А.Я. (Россия). – Заяв. 29.04.92; опубл. 19.05.94, Бюл. № 8. – 3 с.
13. Пат. на винахід 48400 України, МПК C02F1/46. Пристрій для очистки стічної води / Р.І. Сілін, А.І. Гордєєв, В.О. Павлик (Україна); Технологічний ун-т Поділля. – u2001064234; заяв. 19.06.2001; опубл. 15.08.2002, Бюл. № 8. – 3 с.



14. Пат. на корисну модель 10347 України, МПК В01F5/00. Устаткування для обробки води / Р.І. Сілін, А.І. Гордєєв, В.В. Третько, І.І. Сорока (Україна); Хмельницький нац. ун-т. – u 200503620; заяв. 18.04.2005; опубл. 15.11.2005, Бюл. № 11. – 3 с.

15. Пат. на корисну модель 25775 України, МПК В01F 5/00. Квітаційний пристрій для обробки води / Р.І. Сілін, А.І. Гордєєв, О.А. Гордєєв, В.В. Третько, Є.А. Урбанюк (Україна); Хмельницький нац. ун-т. – u200702555; заяв. 12.03.2006; опубл. 27.08.2007, Бюл. № 13. – 3 с.

16. Пат. на корисну модель 25811 України, МПК В01F 5/00. Вібраційний квітатор для зміни властивостей води / Р.І. Сілін, А.І. Гордєєв, О.А. Гордєєв, В.В. Третько, Є.А. Урбанюк (Україна); Хмельницький нац. ун-т. – u200703370; заяв. 28.03.2007; опубл. 27.08.2007, Бюл. № 13. – 3 с.

Надійшла 7.12.2009 р.

УДК 621.757; 681.52

В.Н. КОРЕНЬКОВ, В.А. ПАСЕЧНИК, А.А. СУБИН

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»

## АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ СИНТЕЗ МНОЖЕСТВА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИ ЦЕЛЕСООБРАЗНЫХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ СБОРКИ ИЗДЕЛИЙ МАШИНОСТРОЕНИЯ

*Рассматриваются задачи определения структуры изделия (состава и количества сборочных единиц), формирования множества технически реализуемых и технологически обоснованных последовательностей общей и узловой сборки, а также определения направлений монтажа деталей и отдельных частей изделия.*

*Tasks of determination of structure of products (composition and quantity of assembly units), forming of multitude of the technically realized and technologically grounded assembly sequences, and determinations of directions of editing of parts and assembly units are considered.*

Ключевые слова: изделия машиностроения.

В современных условиях спрос на рынке товаров быстро изменяется, что в свою очередь, вынуждает производителя быстро перенастраивать производство на выпуск новой высококачественной продукции. При таких обстоятельствах традиционные методы проектирования технологических процессов сборки (ТПС), которым свойственны сильно выраженные эвристичность и частный характер, становятся непригодными. Необходимость оперирования разнообразной по форме нечисловой информацией декларативного, нормативного и эмпирического происхождения, а также многовариантность и широкий диапазон возможных решений не дают возможности анализа полного множества альтернатив. В такой ситуации при проектировании нет гарантии, что полученный результат лучше или, по крайней мере, не хуже другого возможного результата. Как следствие – неоправданные затраты времени и материальных средств при технологической подготовке производства. Выходом из сложившегося положения является автоматизированное решение ряда технологических задач, не требующих от человека творческого подхода. При проектировании ТПС к таким задачам следует отнести, в первую очередь, синтез и анализ последовательностей сборки (ПС) изделий.

**Основные положения.** Автоматизация проектирования ТПС предполагает наличие соответствующих математических моделей, разработка которых требует определения свойств конструкций изделий, влияющих на последовательность их сборки. Так как ПС является последовательностью образования соединений, то в качестве основных свойств, присущих любой конструкции, возможно принять наличие физического контакта и кинематическую замкнутость групп элементов.

Любое сборочное изделие (СИ) является множеством соединенных между собой деталей. Поскольку минимальное количество элементов такого множества равно двум, то исходя из упомянутых выше свойств, допустимо существование только двух типов соединений (рис. 1).

Элементарное соединение образуют две детали, между которыми существует физический контакт (свойство С) и, по крайней мере, одна траектория взаимных перемещений  $t \in T_{ij}$ . А соединение обеспечивающее нераспадаемость (СОН) – две детали, кинематическая замкнутость которых обеспечивается лишь за счет сил трения (резьбовые, прессы, пластические или упругих деформаций (защелочные, шпильковые, соединения посредством стопорных колец...), сил межатомных связей (сварные) и др.

Сочетаясь в различных комбинациях, минимальные структурные единицы изделия образуют более сложные структурные элементы. Исходя из свойства кинематической замкнутости, такого рода элементы также возможно разделить только на две группы – кинематически незамкнутые (комплекты) и кинематически замкнутые – элементарные сборочные единицы (СЕ). Под элементарной СЕ понимается группа не менее трех деталей, содержащая только одно СОН, целостность которой не нарушается во время манипулирования либо выполнения технологических операций.

Исходной информацией для формализованного выявления структурных элементов, а также синтеза последовательностей их сборки является характеристика относительного расположения деталей в СИ, в