

УДК 621.830.5

**ВИЗНАЧЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ І ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГНУЧКОГО ІНСТРУМЕНТУ  
ДЛЯ ОЧИЩЕННЯ ЗОВНІШНІХ ПОВЕРХОНЬ ТРУБОПРОВОДІВ**

**О. Ф. Саленко, А. Л. Струтинська**

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського  
вул. Першотравнева, 20, 39600, м. Кременчук, Україна. E-mail: salenko@ukr.net

Наведено оригінальне схемне рішення гнучкого інструменту для очищення зовнішньої поверхні трубогону у фонтанних системах. Визначено особливості робочого процесу обробки та характеристики її ефективності. Встановлені особливості коливальних режимів гнучкого інструменту як системи із розподіленими інерційними параметрами.

**Ключові слова:** трубогіни, очищення, струминний привод, гнучкий інструмент, робочий процес, ефективність, динаміка, розподілені параметри, форми коливань.

**DEFINITION OF POWER AND DINAMYCHESKY CHARACTERISTICS OF THE FLEXIBLE TOOL FOR  
CLEARING OF EXTERNAL SURFACES OF PIPELINES**

**A. F. Salenko, A. L. Strutinskaya**

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University  
vul. Pershotravneva, 20, 39600, Kremenchuk, Ukraine. E-mail: salenko@ukr.net

In the article the original schematic of flexible instrument is resulted for cleaning of external surface of pipelines of the sprinkler systems. The features of working process of treatment and description of its efficiency are certain. The features of the swaying modes of flexible instrument are set, as systems with the up-diffused parameters.

**Key words:** pipelines, cleanings, stream drivers, flexible instrument, working process, efficiency, dynamics, parameters, forms of vibrations, are up-diffused.

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ И ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГИБКОГО  
ИНСТРУМЕНТА ДЛЯ ОЧИСТКИ ВНЕШНИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТРУБОПРОВОДОВ**

**А. Ф. Саленко, А. Л. Струтинская**

Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского  
ул. Первомайская, 20, 39600, г. Кременчуг, Украина. E-mail: salenko@ukr.net

Приведено оригінальне схемне рішення гнучкого інструменту для очистки внешней поверхности трубопроводов фонтанных систем. Определены особенности рабочего процесса обработки и характеристики ее эффективности. Установлены особенности колебательных режимов гнучкого інструменту как системы с распределенными параметрами.

**Ключевые слова:** трубопроводы, очистки, струйный привод, гибкий инструмент, рабочий процесс, эффективность, динамика, распределены параметры, формы колебаний.

**АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ.** На даний час широко використовуються декоративні фонтанні системи. Вони включають розгалужену систему трубопроводів із вставленими на них соплами для формування струменів води. Експлуатація таких систем потребує періодичного очищення. Для механізації та автоматизації процесів очищення необхідні спеціальні пристрої із відповідним інструментом. Тому розробка та дослідження прогресивних інструментів для очищення трубопроводів фонтанних систем є актуальною науково-технічною проблемою [1].

Трубопроводи фонтанних систем знаходяться у важкодоступних місцях, мають складну конфігурацію, перехідні та фланцеві елементи. Тому поверхня, яка підлягає очищенню є складною, має різноманітні виступи. Трубопроводи фонтанних систем виготовляються, як правило, із корозійностійких сталей, що мають низку твердість. Забруднення на поверхні трубопроводів складаються із осаду твердих сольових сполук та можуть включати різні види забруднень. Тому для очищення трубопроводів фонтанних систем не застосовують інструменти розмірної обробки. Для очищення застосовуються інструменти декоративної обробки у вигляді щіток, а також гідро струменеві системи очищення. Складна

конфігурація оброблюваних поверхонь утруднює процес обробки. Виникає необхідність в складних просторових переміщеннях інструменту. Проблема в загальному вигляді полягає у створенні ефективного інструменту для очищення складних поверхонь трубопроводів від твердих сольових і інших забруднень.

Створення ефективного інструменту для очищення трубопроводів фонтанних систем пов'язано із важливими науковими і практичними завданнями підвищення енергозбереження міського господарства. Механізація та автоматизація процесів очищення є важливим напрямом розвитку фонтанних систем. Розробка інструменту забезпечує підвищення екологічності фонтанів і прилеглої середовища.

У зв'язку із цим метою роботи є розробка ефективного гідроструменевого інструменту комбінованої дії із гнучкими механічними оброблювальними елементами.

**МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ.** Задачами досліджень є розробка схемного рішення інструменту, оцінка загальної енергетичної ефективності процесу обробки та визначення особливостей динамічних процесів руху гнучкого інструменту.

Слід зазначити, що в останніх дослідженнях і публікаціях [1, 2] наведено ряд схемних і конструктивних рішень інструменту для гідроструменевого очищення поверхонь. Їх недоліком є низька ефективність очищення. Процес очищення потребує значних витрат енергії. Очищення складних поверхонь потребує спеціальних механізмів для переміщення інструменту [3, 4]. Розробка гідроструменевих інструментів комбінованих із гнучкими оброблювальними елементами, яким присвячена дана стаття в літературних джерелах не виявлено.

Суттєвого підвищення ефективності очищення зовнішніх поверхонь трубопроводів можна досягти, застосувавши інструменти комбінованої дії, що поєднує гідроструменеву систему із набором гнучких елементів, які здійснюють механічну дію на забруднену поверхню.

Особливості процесу обробки комбінованим інструментом. Для очищення складних поверхонь застосовуються інструменти комбінованої дії. Вони є гідроструменевою системою, встановленою на поворотному шпинделі 1 (рис. 1).

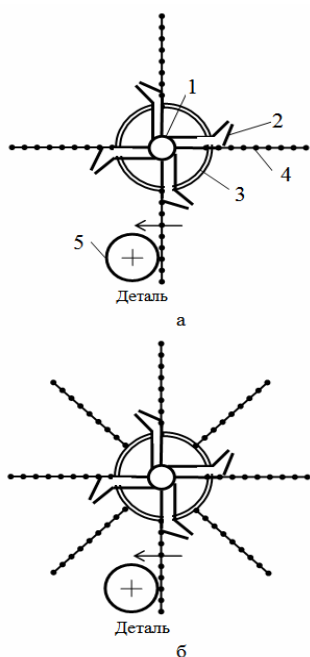


Рисунок 1 – Схема інструменту комбінованої дії для очищення складних поверхонь: а – інструмент із чотирма гнучкими елементами; б – інструмент, що об'єднує гідроструменеву та механічну обробку

Інструмент обертається за рахунок реактивної дії струменів робочого середовища (води, миючих розчинів), які витікають із соплових пристроїв 2, встановлених в обертовому барабані 3.

Обробка поверхонь 5 здійснюється гнучким інструментом у вигляді масивних гнучких ниток 4 встановлених по периферії барабана 2.

Перспективним є комбінована дія струменів робочого середовища та механічні дії гнучкого інструменту як це реалізовано в пристрої (рис. 1,б).

Продуктивність обробки визначається енергією яка витрачається на взаємодію окремого гнучкого інструменту із оброблюваною поверхнею 5. Характерною оброблюваною поверхнею є циліндрична поверхня (труба), з якою взаємодіє гнучкий інструмент. Взаємодія гнучкого інструменту з трубою має три характерні фази (рис. 2).

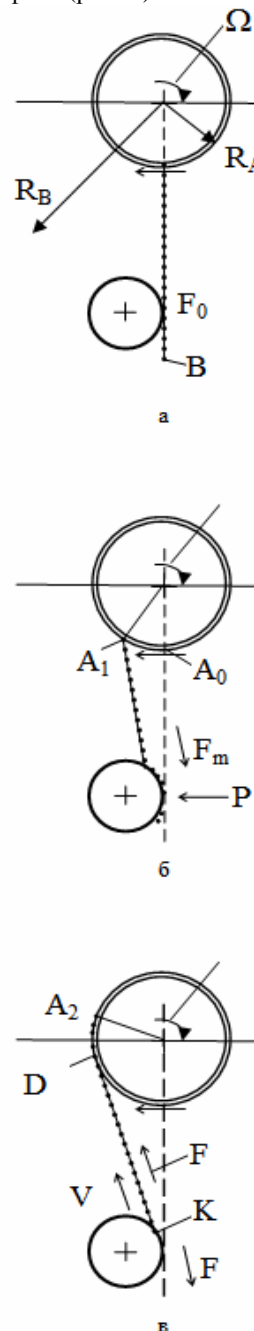


Рисунок 2 – Характерні фази взаємодії гнучкого інструменту з криволінійною поверхнею

Перша фаза взаємодії (рис. 2,а) характеризується торканням інструменту до криволінійної поверхні. При цьому сила взаємодії інструмента з поверхнею є нульовою ( $F=0$ ).

Друга фаза взаємодії інструмента з поверхнею (рис. 2,б) характеризується приляганням інструменту до оброблюваної поверхні з виникненням сил нормальної взаємодії  $P$ . При невеликих зміщеннях точки

закріплення інструменту з положення  $A_0$  до  $A_1$  натяг в інструменті є незначним, а відповідно сила дотичної взаємодії інструменту і оброблюваної поверхні  $F_m$  є малою. На даній фазі взаємодії формується геометричний контакт інструмента і оброблюваної поверхні, але процес обробки є малоінтенсивним.

Основний процес обробки має місце на третій фазі взаємодії. (рис. 2,в). На даній фазі забезпечено щільне прилягання інструменту до поверхні внаслідок дії динамічного контактного навантаження з боку інструменту на деталь. Поворот барабана призводить до натягу гнучкого інструменту. Сила дотичної взаємодії інструменту і деталі  $F$ , значно переважає відцентрові сили. Тому викривлення інструменту між точками  $D$  і  $K$  є незначними. Швидкість відносного переміщення інструменту і оброблюваної поверхні  $V$  буде близькою до окружної швидкості периферії барабана. По завершенню фази обробки гнучкий інструмент виходить з контакту з оброблюваною поверхнею в точці  $K$  і рухається під дією сил інерції набуваючи положення близького до радіального.

Енергетичні аспекти обробки поверхонь гнучким інструментом. Для оцінки енергетичної ефективності процесу обробки виконано наближений аналіз енергетичного балансу системи.

Механічна енергія окремої нитки гнучкого інструменту на першій фазі взаємодії (рис. 2,а) відповідає кінетичній енергії при обертовому русі гнучкого інструменту і складає

$$E_0 = \frac{1}{2} \int_{R_A}^{R_B} \rho (\Omega r)^2 dr, \quad (1)$$

де  $R_A, R_B$  – радіус барабана та радіус кінцевої частини інструменту відповідно;  $\Omega$  – кутова швидкість обертання барабана;  $\rho$  – погонна маса гнучкого інструменту;  $r$  – поточне значення радіуса гнучкого інструменту.

Виконавши інтегрування в залежності (1) знайдемо кінетичну енергію інструменту на початку його взаємодії з оброблюваною поверхнею

$$E_0 = \frac{\rho}{6} \Omega^2 (R_B^3 - R_A^3). \quad (2)$$

Кінетична енергія гнучкого інструменту в кінці третьої фази взаємодії (рис. 2,в) визначена у вигляді

$$E_k = \frac{1}{2} m V^2, \quad (3)$$

де  $m$  – загальна маса гнучкого інструменту;

$V$  – окружна швидкість периферії барабана, що співпадає із швидкістю руху кожної з точок гнучкого інструменту.

Загальні параметри гнучкого інструменту визначаються формулами

$$m = \rho (R_B - R_A), \quad V = \Omega R_A. \quad (4)$$

Підставивши параметри (4) у формулу (3), одержимо значення кінетичної енергії інструменту в кінці третьої фази його взаємодії з оброблюваною поверхнею у вигляді

$$E_k = \frac{1}{2} \rho (R_B - R_A) R_A^2 \Omega^2. \quad (5)$$

Різниця кінетичних енергій (2) і (5) визначає роботу сил різання при взаємодії гнучкого інструменту з оброблюваною поверхнею. Остаточна

$$A = E_0 - E_k = \frac{\rho \Omega^2}{6} [R_B^3 - 3R_B R_A^2 + 2R_A^3]. \quad (6)$$

Робота сил різання є енергетичною характеристикою процесу обробки.

Вираз в дужках формули (6) залежить від кубу геометричних розмірів гнучкого інструменту. Тому для підвищення енергетичних характеристик процесу обробки доцільно збільшувати розміри інструменту. Підвищення частоти обертання барабана є менш ефективним засобом підвищення ефективності тому, що ефективність залежить від квадрату частоти обертання.

Робота сил різання дає оцінку середньої сили різання у вигляді

$$F = \frac{E_P}{S}, \quad (7)$$

де  $S$  – довжина гнучкого інструменту яка контактує із оброблюваною поверхнею. Можна прийняти

$$S = (R_B - R_A) - DK, \quad (8)$$

де геометричний параметр  $DK$  визначено згідно рис. 2,в.

Формули (7) і (8) дають середню оцінку сили різання, яка діє по дотичній до оброблюваної поверхні.

*Динамічні процеси руху гнучкого інструменту.* Гнучкий інструмент є слабо демпфованою динамічною системою. При його обертанні виникають інтенсивні коливання (рис. 3).

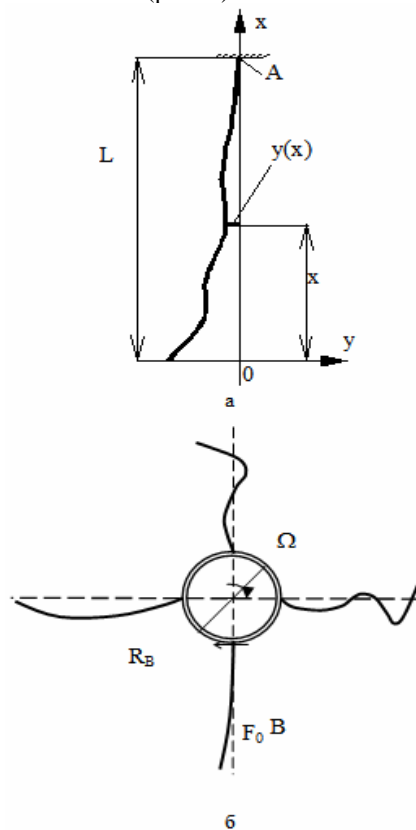


Рисунок 3 – Розрахункова схема власних поперечних коливань гнучкого інструменту як масивної нитки, підвішеної за один кінець (а) та перші основні форми коливань інструменту (б)

У процесі досліджень здійснено аналіз власних коливальних процесів інструменту, що виникають при обертанні барабана. Динамічні процеси в інструменті відповідають коливанням масивної нитки довжиною  $L$ , підвішеної за один кінець в точці А.

Гнучкий інструмент як масивна нитка знаходиться в полі дії відцентрових сил інерції. На елементарну ділянку інструменту довжиною  $dL$  діє відцентрова сила

$$dF_l = \rho \cdot \Omega^2 r dL,$$

де  $r$  - радіус розташування елемента  $dL$  інструменту відносно вісі,  $\Omega$  - кутова швидкість обертання. Елементарна відцентрова сила визначена через прискорення поворотного руху

$$a(r) = \Omega^2 r.$$

Звичайно радіус барабана перевищує довжину інструменту. Тому в першому наближенні можна прийняти поле відцентрових прискорень, які діють на нитку постійним, тобто вважати

$$a(r) \approx \Omega^2 R_c = const,$$

де  $R_c$  - деяке середнє значення радіусу гнучкого інструменту.

Поперечні переміщення точок масивної гнучкої нитки (інструменту) в динаміці описуються диференціальним рівнянням в частинних похідних, яке має вигляд [5]:

$$\frac{1}{\Omega^2 R_c} \cdot \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = \frac{\partial y}{\partial x} + \rho \frac{\partial^2 y}{\partial x^2}, \quad (9)$$

де  $y$  - переміщення інструменту в точці з координатою  $x$ ;  $\Omega^2 R_c$  - середнє відцентрове прискорення яке діє на інструмент;  $t$  - час;  $\rho$  - маса одиниці довжини інструменту.

Частинний розв'язок рівняння (9) знаходиться у вигляді:

$$y = \varphi(x) \cdot e^{j\omega t}, \quad (10)$$

де  $\varphi(x)$  - деяка невідома функція координати  $x$ ;

$\omega$  - постійна величина (частота);

$j = \sqrt{-1}$  - уявна одиниця.

Для знаходження функції  $\varphi(x)$  підставимо (10) у (9) і одержимо звичайне нелінійне диференціальне рівняння другого порядку:

$$\frac{d^2 \varphi}{dx^2} + \frac{1}{x} \cdot \frac{d\varphi}{dx} + \frac{\omega^2}{\Omega^2 R_c} \cdot \frac{\varphi}{x} = 0. \quad (11)$$

Це диференціальне рівняння шляхом перетворень приводиться до рівняння Бесселя і, відповідно, має розв'язок у вигляді лінійної комбінації функцій Бесселя. Остаточний розв'язок рівняння (11) має вигляд:

$$\varphi(x) = c_1 \cdot J_0 \left( 2\omega \sqrt{\frac{x}{g}} \right) + c_2 \cdot Y_0 \left( 2\omega \sqrt{\frac{x}{g}} \right), \quad (12)$$

де  $c_1$  та  $c_2$  - довільні константи інтегрування;  $J_0$  та  $Y_0$  - функції Бесселя першого і другого роду нульового порядку.

Враховуючи, що розв'язок (12) повинен мати кінечне значення при  $x = 0$ , одержимо значення константи  $c_2 = 0$ . При цьому переміщення кожної точки інструменту буде визначено нескінченною сумою розв'язків виду:

$$y_\omega = c_1 \cdot e^{j\omega t} \cdot J_0 \left( 2\omega \sqrt{\frac{x}{\Omega^2 R_c}} \right), \quad (4)$$

де  $\omega$  - частота коливань яка залежить від параметрів задачі.

В точці закріплення  $x = L$  маємо  $y = 0$ . Тому величина  $2\omega \sqrt{\frac{L}{\Omega^2 R_c}} = \alpha_p$  повинна бути коренем функції Бесселя першого роду нульового порядку, тобто коренем рівняння

$$J_0(\alpha) = 0. \quad (14)$$

Функція Бесселя має нескінченне число коренів. Відповідно маємо нескінченний ряд частот  $\omega$ .

Нехай  $\alpha_p$  - один із коренів рівняння  $J_0(\alpha) = 0$ . Тоді частота  $\omega$  дорівнює:

$$\omega_r = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\Omega^2 R_c}{L}} \alpha_p. \quad (15)$$

Оскільки коренів нескінченна кількість, то дана залежність визначає нескінченне число частот і відповідно форм коливань інструменту.

Перші (основні) форми коливань інструменту наведені на рис. 4. Вони нормовані відносно загальної довжини інструменту.

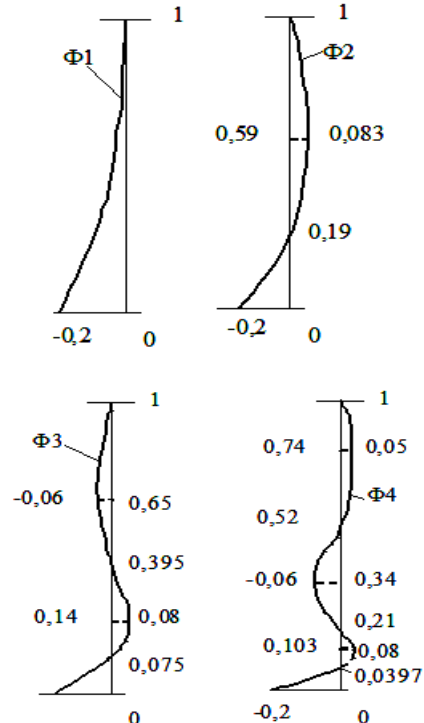


Рисунок 4 – Перші форми коливань гнучкого інструменту

Перша форма ( $\Phi_1$ ) характеризується плавним викривленням осі інструменту, яке нагадує прогин балки. Друга форма ( $\Phi_2$ ) включає вузлову точку, розташовану на відстані 0,19 довжини інструменту

від його нижнього краю. Третя форма Ф3 має дві, а четверта Ф4 – три вузлові точки. Із підвищенням номера форми інтенсифікуються рухи перетинів інструменту в околі його нижнього краю. Фактично коливання по всіх високочастотних формах зосереджуються в безпосередній близькості від нижнього краю інструменту.

**ВИСНОВКИ.** 1. Для ефективного процесу очищення трубопроводів фонтанних систем доцільно застосувати комбінований гідроструменевий інструмент, що має обертовий барабан із розташованому на ньому сопловими пристроями та гнучкі оброблювальні елементи, встановлені по периферії барабану.

2. Ефективність обробки залежить від геометричних розмірів інструменту та кутової швидкості обертання. При цьому ефективність пропорційна квадрату кутової швидкості та кубу максимального розміру інструменту. Тому для підвищення ефективності необхідно, в першу чергу, збільшувати розмір інструменту.

3. Із результатів математичного моделювання випливає, що в гнучкому інструменті наявні інтенсивні власні коливання. Найбільш інтенсивними вони є на кінцях гнучкого інструменту. Частоти власних коливань інструменту кратні кореням функції Бесселя 1-го роду нульового порядку.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Бондаренко М.Й., Саленко О.Ф., Петко І.В., Приходько В.І. Гідроструменеве очищення поверхні твердого тіла. // Вісник Житомирського інженерно-технологічного інституту: Технічні науки. – Житомир: ЖІТІ, 2001. – С. 79–91.
2. Поздняков П.Б., Саленко О.Ф. Ефективність струминних роторних пристроїв, використовуваних для очищення поверхні твердих тіл // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. – 2004. – Вип. 6. – С. 88–92.

3. Поздняков П.Б. Підвищення якості гідро струминного очищення при використанні комбінованого інструменту // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету ім. М. Остроградського. – 2007. – Вип. 5. – С. 108–117.

4. Поздняков П.Б. Інструмент інтегральної дії для виконання струминно-абразивного очищення // Збірник наукових праць КНТУ. – Краматорськ, 2007. – С. 93–98.

5. Анго А. Математика для электро- и радиоинженеров. – М.: Наука, 1965. – С. 778.

#### REFERENCE

1. Bondarenko M.I., Salenko O.F., Petko I.V., Prihodjko V.I. Hydrojet clearing of a surface of a solid // Bulletin Zhitomir of engineering-tehnologiyic institute: Engineering science. – Zhitomir: ZETI, 2001. – P.79–91 [in Ukrainian].
2. Pozdnjakov P.B., Salenko O.F. Efficiently jet rotors the devices used for clarification of a surface of solids // Bulletin of the Kremenchug state polytechnical university/ – 2004. – Release 6. – P. 88-92 [in Ukrainian].
3. Pozdnjakov P.B. Improvement of quality of hydrojet clarification at use of the combined tool // Bulletin of the Kremenchug state polytechnical university of M. Ostrogradsky. – 2007. – Release 5. – P. 108–117 [in Ukrainian].
4. Pozdnjakov P.B. The tool of integrated action for performance of strujno-abrasive clarification // Collection of proceedings KNTU. – Kramatorsk, 2007. – P. 93-98 [in Ukrainian].
5. Ango A. Mathematics for electro- and radioengineers. – M: Science, 1965. – P. 778 [in Russian].

Стаття надійшла 11.01.2011.

Рекомендована до друку  
д.т.н, проф. Драгобецьким В.В.