

ПРО МОЖЛИВІСТЬ ВИКОРИСТАННЯ ГНУЧКИХ СТРУМИННИХ ІНСТРУМЕНТІВ ДЛЯ ОЧИЩЕННЯ ВНУТРІШНІХ КРИВОЛІНІЙНИХ ПОВЕРХОНЬ

А. Л. Струтинська, В. В. Ткачук, В. А. Студинський

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
просп. Перемоги, 37, Солом'янський район, м. Київ, 03056, Україна.

В. Т. Щетинін, О. Ф. Саленко

Кременчуцький національний університет ім. Михайла Остроградського
вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, 39600, Україна. E-mail: salenko2006@ukr.net

Розглянуто питання гідроструменевого очищення внутрішньої поверхні магістральних трубопроводів в польових умовах. Таке очищення може стати дієвою альтернативою існуючим методам, заснованим на застосуванні скребкових очищувачів. На відміну від останніх, струминні пристрої не забезпечують механічного контакту з оброблюваною поверхнею, що обумовлює нерівномірність очищення, знижує її ефективність. Показано, що застосування механізмів формування струменя за допомогою гнучких струменевих пристроїв в порівнянні з поодинокими соплами веде до підвищення продуктивності, більш повного охоплення не тільки поверхонь магістрального трубопроводу, а й місць поворотів, запірної арматури та ін. При цьому відпадає необхідність застосування додаткових пристроїв, що змінюють структуру і склад струменя (зокрема, елементів для введення абразивних частинок). Наведено схемне і конструктивне рішення струминно-механічної системи, встановлені основні параметри характеристики течії рідини в гнучкому інструменті. Наведено результати модельних і натурних експериментів, встановлено закономірності видалення забруднення в залежності від умов натікання струменя рідини.

Ключові слова: Струминна обробка, гнучкий інструмент, очищення трубопроводів.

О ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ГИБКОГО СТРУЙНОГО ИНСТРУМЕНТА ДЛЯ ОЧИСТКИ ВНУТРЕННИХ КРИВОЛИНЕЙНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

А. Л. Струтинская, В. В. Ткачук, В. А. Студинский

Национальный технический университет Украины
«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»
просп. Победы, 37, Соломенский район, г. Киев, 03056, Украина.

В. Т. Щетинин, А. Ф. Саленко

Кременчугский национальный университет им. Михаила Остроградского
ул. Первомайская, 20, г. Кременчуг, 39600, Украина. E-mail: salenko2006@ukr.net

Рассматриваются вопросы гидроструйной очистки внутренней поверхности магистральных трубопроводов в полевых условиях. Такая очистка может стать действенной альтернативой существующим методам, основанным на применении скребковых очистителей. В отличие от последних, струйные устройства не обеспечивают механического контакта с обрабатываемой поверхностью, что обуславливает неравномерность очистки, снижают ее эффективность. Показано, что применение устройств формирования струи с помощью гибких струйных устройств по сравнению с единичными соплами ведет к повышению производительности, более полному охвату не только поверхностей магистрального трубопровода, но и мест поворотов, запорной арматуры и др. При этом отпадает необходимость применения дополнительных устройств, изменяющих структуру и состав струи (в частности, элементов для введения абразивных частиц). Приведено схемное и конструктивное решения струйно-механической системы, установлены основные параметры характеристики течения жидкости в гибком инструменте. Приведены результаты модельных и натурных экспериментов, установлены закономерности удаления загрязнения в зависимости от условий натекания струи жидкости.

Ключевые слова: Струйная обработка, гибкий инструмент, очистка трубопроводов.

АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ. Очищення магістральних трубопроводів, як ззовні, при відновленні, так і з середини, є складною задачею, пов'язаною як із необхідністю підіймати трубопровід на поверхню ґрунту, так і призупиняти транспортування продуктів, що веде до значних економічних втрат. Пошук нових методів очищення, засобів відновлення захисних покриттів та способів виконання зазначених робіт у польових мовах беззаперечно є важливою науково-практичною задачею, актуальність якої не викликає сумніву, а її розв'язок веде до значного підвищення ефективності експлуатації магістралі в цілому.

Так, досвід експлуатації трубопроводів доводить, що з плином часу їх пропускна здатність різко знижується. Однією з основних причин подібного роду процесів є утворення потужних внутрішньотрубних

відкладень, що складаються з будівельного сміття, металевої окалини, що утворюється під час проведення ремонтних робіт, продуктів корозії і т.д. Осідаючи на внутрішній поверхні трубопроводів, ці відкладення здатні повністю перекивати прохідний перетин. Цим процесам особливо сприяють часті зупинки, що провокують прискорене випадання механічних домішок з транспортуючих речовин.

Доцільність застосування струминних засобів для видалення старої ізоляції та очищення зовнішньої поверхні труби доведено авторами [1–2]. Однак, найбільш складним є очищення внутрішньої порожнини трубопроводу. Нині для здійснення таких операцій використовують переважно механічні очищувачі, зокрема, очищувальні поршні різного конструктивного виконання [3]. Поршні виконують

у вигляді скребків (типу СКР) механічного очищення а також магнітного (типу СКРЗ). Оскільки товщина шару забруднення, яке може бути видалене за один прохід, є обмеженою, для трубопроводів із значними відкладеннями бруду передбачається послідовне очищення поверхонь кількома робочими органами із поступовим збільшенням діаметру скребків.

Застосування підходів струминного очищення внутрішньої порожнини трубопроводу може бути трансформоване у задачу визначення умов взаємодії струмені рідини із криволінійною поверхнею, яка має розв'язок в роботах [4–5]. Однак в роботі [6] зазначається, що криволінійні поверхні по-різному сприймають струминний вплив, внаслідок чого необхідно залучення додаткових механічних пристроїв орієнтування та спрямування струменя.

Мета роботи – обґрунтування доцільності застосування гнучких струминних інструментів для очищення криволінійних поверхонь.

МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ. Ряд задач обробки криволінійних поверхонь розв'язується із застосуванням струминно-механічної обробки. При цьому використовуються соплові системи, які формують високонапірні струмені рідини, що взаємодіють із оброблюваною поверхнею та механічні пристрої із гнучкими робочими елементами. Робочі елементи інтенсифікують процес обробки, оскільки, як було показано в роботі [7], інтенсифікаційні дії можуть бути досить дієвими для підвищення ефективності обробки. Для реалізації ефективного процесу обробки необхідно вибрати раціональні режими обробки, розробити спеціальний інструмент. Роботи в цьому напрямку є актуальними.

Проблема в загальному вигляді полягає у створенні ефективного інструменту для очищення складних поверхонь.

Забруднення на поверхні складаються із осаду твердих солевих сполук та можуть включати різні види забруднень. Тому для очищення поверхонь не застосовують інструменти розмірної обробки. Для очищення застосовуються інструменти декоративної обробки у вигляді щіток, а також гідроструменеві системи очищення. Складна конфігурація оброблюваних поверхонь ускладнює процес обробки. Виникає необхідність в складних просторових переміщеннях інструменту.

Струминно-механічні обробляючі системи ефективно використовуються в операціях очищення поверхонь, підготовки їх для подальшої гальванічної або декоративної обробки, або обробки перед нанесенням клею або фарби. Створення ефективного інструменту пов'язано із важливими науковими і практичними завданнями машинобудування. Механізація та автоматизація процесів очищення є важливим науково-технічним напрямком. Розробка інструменту забезпечує підвищення екологічності прилеглої середовища.

В останніх дослідженнях і публікаціях [7, 8] наведено ряд схемних і конструктивних рішень інструменту для гідроструминного очищення поверхонь [9]. Їх недоліком є низька ефективність очищення. Процес очищення потребує значних затрат енергії [9]. Очищення складних поверхонь потребує спеціальних механізмів для переміщення інструменту. Розробка струминних комбінованих інструментів з 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, що здійснюють механічну дію на забруднену поверхню. Для обробки складних поверхонь застосовуються інструменти комбінованої дії.

Розроблені спеціальні пристрої для обробки поверхонь [7]. Вони включають обертову систему формування високонапірних струменів. Дана система подана в комплексі із рухомим гнучким інструментом, який здійснює механічну обробку деталей. В якості гнучкого інструменту використано шарнірно-з'єднані між собою трубчасті елементи, які утворюють ланцюги, що взаємодіють з оброблюваною поверхнею. Трубчасті елементи мають на своїй поверхні ріжучі крайки, які забезпечують процес обробки. До ланцюгів трубчастих елементів підводиться робоча рідина, яка витікає із отворів у шарнірних з'єднаннях забезпечуючи необхідні умови механічної обробки. Ланцюги гнучкого інструменту розташовані у радіальному напрямку відносно осі обертання інструменту. Взаємодіючи з криволінійною оброблюваною поверхнею вони деформуються і окремі трубчасті елементи ковзають по оброблюваній поверхні.

Один із варіантів пристрою для струменево-механічної обробки являє собою гідроструменеву систему, встановлену на поворотному трубчастому шпинделі 1 (рис. 1). Шпиндель має струминну систему безконтактного підводу робочої рідини. Вона складається із нерухомого сопла 2, в якому формується потік рідини, що попадає в отвір шпинделя 1. Інструмент обертається за рахунок реактивної дії струменів робочого середовища (води, миючих розчинів), які витікають із соплових пристроїв 3, встановлених в обертовому барабані 4.

Обробка деталей 5 здійснюється гнучким інструментом у вигляді масивних гнучких ниток 6, встановлених по периферії барабана 4. Особливістю інструменту є комбінована дія струменів робочого середовища та механічної дії гнучкого інструменту. В процесі досліджень вирішена проблема підводу робочої рідини до обертового шпинделя. При наявності ущільнення є можливість герметичного підводу робочої рідини до обертового шпинделя (рис. 2, а).

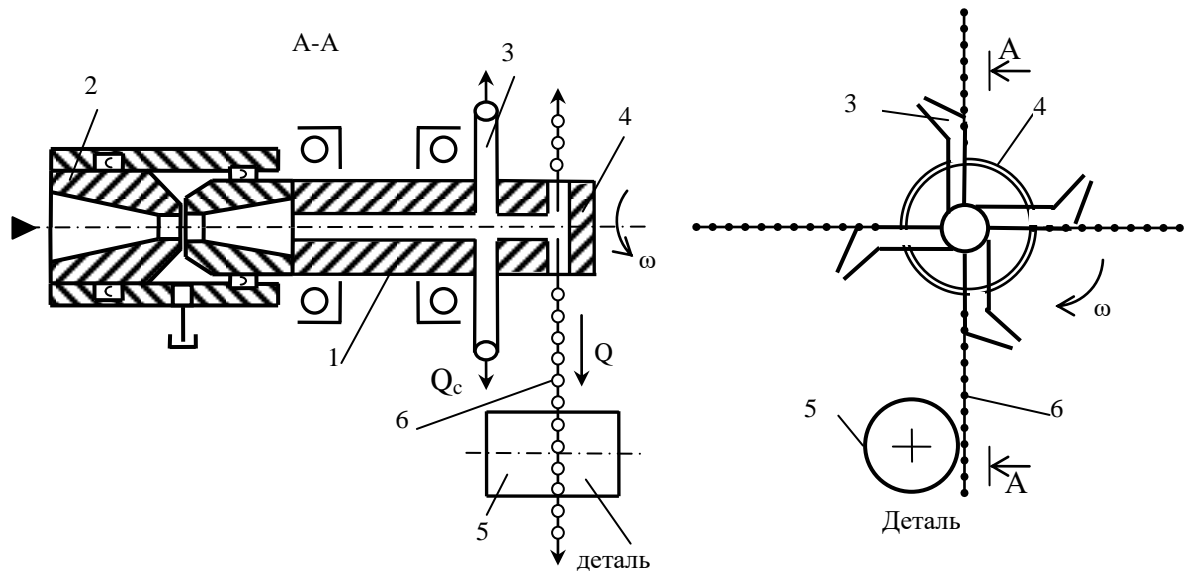


Рисунок 1 – Схема інструменту комбінованої дії для струминно-механічної обробки поверхонь

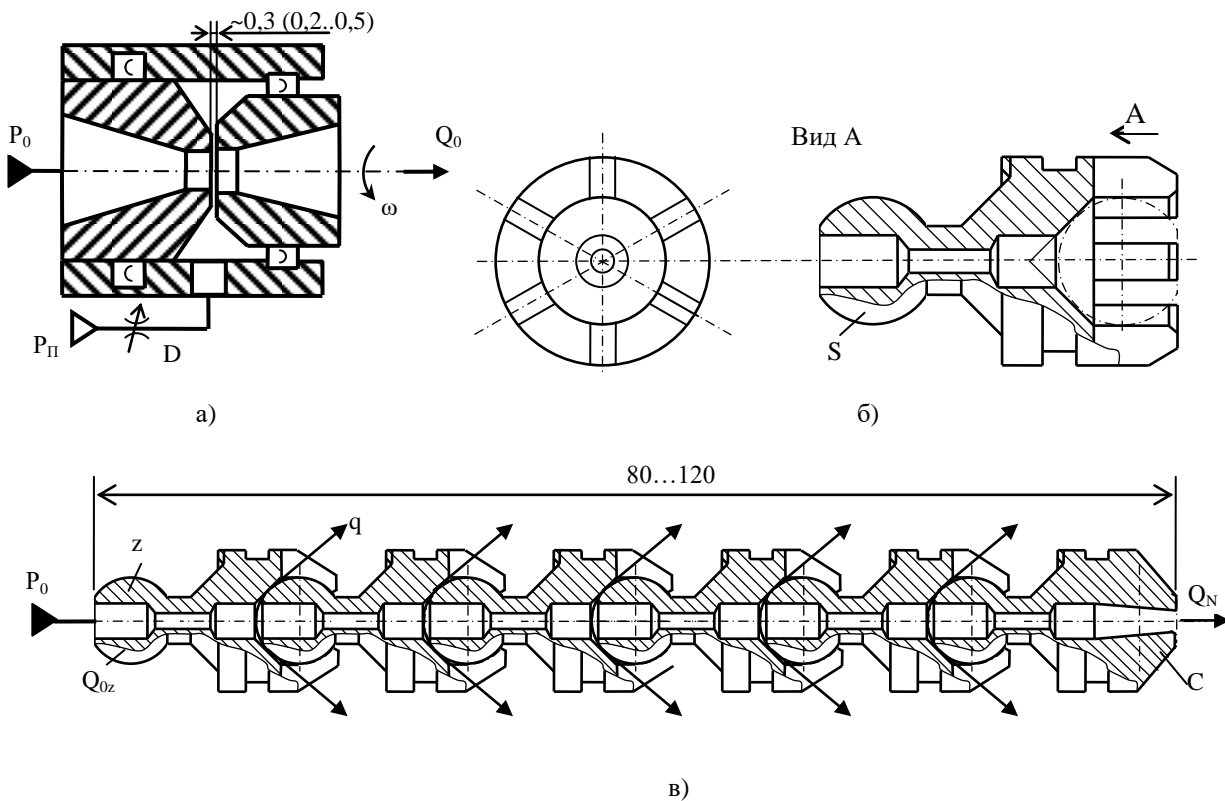


Рисунок 2 – Конструктивна реалізація окремих вузлів інструменту комбінованої дії:

а – конструктивне рішення підводу робочої рідини до обертового шпинделя;

б – окремий трубчатий елемент гнучкого ланцюга; в – з'єднання трубчатих елементів у гнучкий ланцюг

Між торцями сопел наявний зазор 0,2..0,5 мм, який виключає механічний контакт сопел при поверті.

При з'єднанні порожнини між зрізами сопел із атмосферою підвід рідини виконує функцію ежектора і формує на виході рідинно-повітряну суміш. Кількість повітря, яке вводиться в потік рідини регулюється дроселем D.

Конструктивна реалізація шарнірно-з'єднаних обробляючих елементів може бути різноманітною. Розроблено ряд варіантів інструменту. Обробляю-

чий елемент працює в агресивному середовищі і взаємодіє із поверхнею покритого шаром бруду із солей, що має високу твердість. Для забезпечення стійкості інструменту необхідно реалізувати поверхню із мінімальними показниками зносу.

Рациональним є виконання інструменту у вигляді набору елементів з'єднаних сферичними шарнірами. (рис. 2, б). Шарніри утворені сферами S, які входять в отвори сусіднього трубчатого елемента. Сферичні шарніри забезпечують відносно поперечно-кутове переміщення трубчатих елементів. Обертання еле-

ментів відносно осі забезпечує повне використання властивостей ріжучих поверхонь (по периферії трубчастого елемента).

Інструмент у вигляді шарнірно з'єднаних оброблювальних елементів зазнає інтенсивних ударних навантажень. Тому оброблюючі елементи повинні мати високу ударну в'язкість (бути пластичними). Для м'якого інструменту реалізація окремих ріжучих крапок буде неефективною. Рациональним є

виконання поверхні у вигляді сфери (еліпсоїда обертання) з насічкою N (рис. 3, а). Насічка у вигляді канавок на сферичній поверхні забезпечує високу стійкість інструменту. Трубчастий елемент має сферичний хвостовик S для з'єднання з іншими елементами.

Складені рівняння течії рідини в послідовно з'єднаних трубчастих елементах (рис. 4).

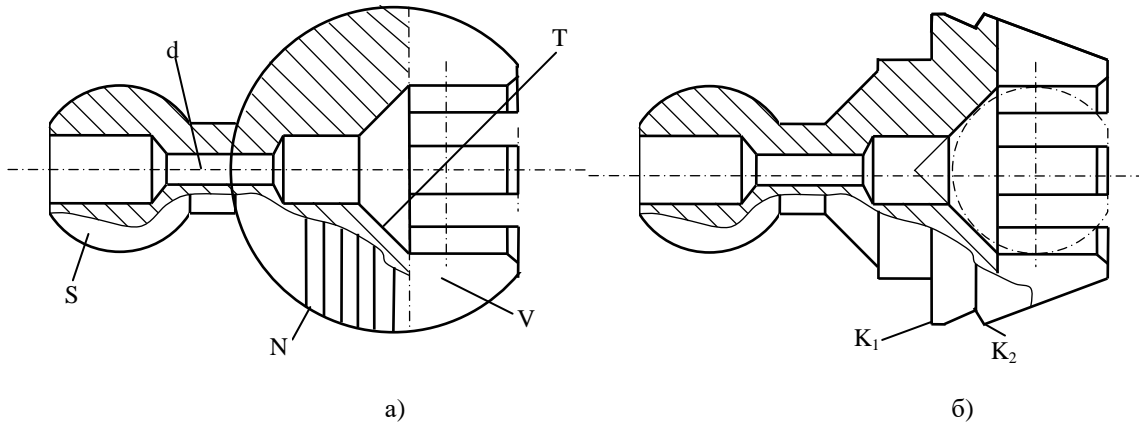


Рисунок 3 – Трубчастий елемент, що має сферу з насічкою у вигляді канавок (а) та елемент із канавками у вигляді циліндричних і конічних проточок (б)

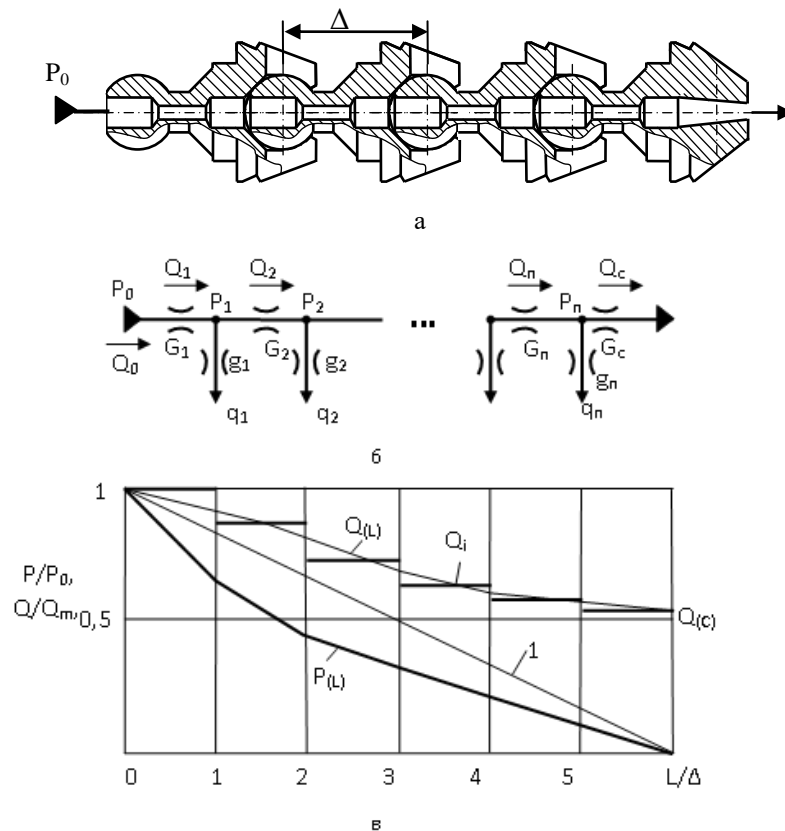


Рисунок 4 – Трубчасті елементи з'єднані в ланцюг (а), еквівалентна гідравлічна схема системи трубчастих елементів, у яких протікає робоча рідина (б) та гідравлічні параметри гнучкого трубопроводу (в)

Для турбулентного руху рідини в каналах трубчастих елементів рівняння втрати тиску на i -тому елементі має вигляд

$$P_{i-1} - P_i = \frac{1}{G_i^2} Q_i^2, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

де $p_i - p_{i-1}$ – перепад тиску на i -тому трубчастому елементі; G_i – гідравлічна провідність i -го елемента; Q_i – витрата рідини в отворі i -го елемента.

Витрати рідини через зазори в спряженнях трубчастих елементів описуються рівняннями

$$q_i = g_i \sqrt{p_i}, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (2)$$

де q_i – витіки рідини через зазор між сферою і отвором i -го елемента; g_i – гідравлічна провідність зазору.

Для кожного спряження між елементами має місце баланс витрат рідини

$$Q_i = Q_{i-1} - q_i \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

Наведені рівняння доповнюються рівняннями витрати тиску на вихідному насадку

$$p_n = \frac{Q_c^2}{G_c^2}, \quad (4)$$

де G_c – гідравлічна провідність насадки.

Рівняння (3) і (4) утворюють замкнену систему, яка визначає характеристики течії в ланцюгу трубчастих елементів. Після підстановки значень параметрів із (1), (2) в формулу (3) знайдена нелінійна система рівнянь, яка визначає розподіл тиску та значення витрати по довжині ланцюга.

В процесі зміни форми ланцюга змінюються гідравлічні параметри трубопроводу, зокрема гідравлічні провідності трубчастих елементів та зазорів між трубчастими елементами. Точне врахування зміни гідравлічних параметрів утруднено відсутністю даних про фактичну форму ланцюга. Тому виконано спрощений розрахунок течії рідини на основі припущення про лінійність осереднених гідравлічних характеристик елементів та з'єднань.

В якості першого наближення прийнято, що гідравлічні провідності всіх трубчастих елементів однакові $G_i = G$, також однакові провідності з'єднань, тобто $g_i = g$, а характеристика насадка лінійна. При цьому, наведена вище нелінійна система рівнянь приведена до лінійного виду

$$\begin{cases} p_{i-1} - p_i = \frac{Q_i}{G} \\ Q_i = Q_{i-1} - q_i \\ q_i = g p_i \\ p_n = \frac{Q_c}{G_c} \end{cases} \quad i = 1, 2, \dots \quad (5)$$

Спростимо систему рівнянь (5) шляхом об'єднання другого і третього рядків. Одержимо

$$\begin{cases} p_{i-1} - p_i = \frac{Q_i}{G} \\ Q_i = Q_{i-1} - g p_i \\ p_n = \frac{Q_c}{G_c} \end{cases} \quad i = 1, 2, \dots \quad (6)$$

Система рівнянь (6) розв'язана ітераційним методом для ланцюгів складених із різного числа трубчастих елементів. На рис. 3 в наведено результати розрахунків витрат і тиску по довжині ланцюга для 5-ти послідовно з'єднаних трубчастих елементів.

Витрати по довжині ланцюга змінюються по нелінійному ступінчастому закону. Середня витрата по довжині може бути описана плавною залежністю $Q(L)$. Витрата на виході ланцюга Q_c складає 20..50% від витрати на вході. Тиск по довжині ланцюга змінюється згідно ламаної залежності $P(L)$.

Обробка здійснюється сферичною частиною N оброблюваного елемента. На поверхні сфери виконані канавки, які забезпечують ріжучі крайки інструменту.

Для з'єднання оброблюваного елемента з іншими служить отвір T , в який входить сферичний хвостовик сусіднього оброблюваного елемента. Для фіксації сфери хвостовика служать виступи V , які завальцьовуються утримуючи сферу. Трубчастий елемент має отвір d співвісний із віссю симетрії оброблюваного елемента.

Форма канавок може бути різною. Доцільно виконувати канавки у вигляді циліндричних або конічних проточок на поверхні сфери (рис. 3, б). Проточки формують ріжучі крайки $K1, K2$ на поверхні трубчастого елемента.

При з'єднанні трубчастих елементів формується гнучкий трубопровід, по якому протікає робоча рідина (рис. 2в). Підвід рідини до ланцюга трубчастих елементів здійснюється через сферичне з'єднання Z . На кінці ланцюга трубчастих елементів встановлено насадок C , який формує струмінь рідини.

При течії рідини в трубчастих елементах спостерігається явище гідравлічного опору та втрати рідини в зазорах сферичних з'єднань трубчастих елементів. Виконано розрахунок течії рідини в гнучкому ланцюзі. Для цього складена еквівалентна гідравлічна схема трубопроводу, що враховує витіки рідини в зазорах з'єднань трубчастих елементів (рис. 4).

При значному числі трубчастих елементів зміна тиску по довжині ланцюга набуває плавного вигляду. При зменшенні зазорів у сферичних з'єднаннях зміна тиску по довжині ланцюга асимптотично наближається до прямої 1.

Дія пропонованого інструменту подібна дії механічного йоржа, вплив дротів якого подібний впливу струменя на оброблювану поверхню. При цьому з публікацій [9] відомо, що пляма очищення зростає із плином часу при нерухомому струмені за експоненціальним законом. Тоді, скориставшись рівнянням $R(t) = f(t) = m p^n d^c h^k t^e$, де p – тиск рідини, МПа; d – діаметр отвору, мм; h – товщина забруднення, що вилучається, мм; t – плинний час, с; m – коефіцієнт, що враховує властивості забруднення та його зчеплення з поверхнею; n, c, k, e – емпіричні коефіцієнти, можемо отримати площу очищення залежно від часу, впродовж якого струмінь залишається нерухомим.

Оскільки струменів N , то загальна площа очищення становитиме

$$S = \pi N R(t)^2 \quad (7)$$

Зважаючи на те, що гнучкий інструмент здійснює кругові радіальні переміщення та переміщення уздовж тіла труби, рівняння (7) дозволяє встановити швидкість поздовжньої подачі для труби певного

діаметра D . Довжина очищення труби $l = \frac{NR(t)^2}{D}$,

виконується за час t . Отже, швидкість поздовжньої подачі становить

$$v_s = \frac{NR(t)^2}{Dt}. \quad (8)$$

На рис. 5 приведена порівняльна діаграма зміни швидкості руху пристрою із гнучким інструментом, який використовується для очищення трубопроводів діаметрів від 350 мм до 800 мм. При цьому порівнювалися інструменти з різною кількістю робочих сопел (від 40 до 100) виділені відповідно сукупністю точок на одній абсцисі.

З приведеної діаграми стає очевидним, що збільшення діаметра трубопроводу різко зменшує задану швидкість робочої подачі, яка змінюється у зворотній пропорційності.

Істотний вплив має також вид і консистентність забруднення трубопроводу, оскільки у цьому випадку змінюється радіус очищеної плями за час взаємодії.

Тож потребують подальшого дослідження робочі процеси поведінки забруднень різних типів залежно від умов натікання рідини, а також дії потоків, положення яких змінюється у часі.

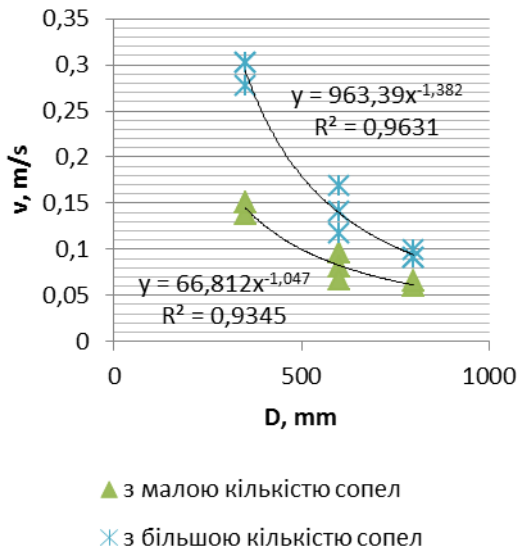


Рисунок 5 – Зміна прогнозованої швидкості робочої подачі залежно від діаметру очищуваного трубопроводу

Слід також зазначити, що приведений інструмент може працювати не тільки від зовнішнього джерела живлення. Уявімо жорстко встановлений у трубопроводі поршень, який безпосередньо розділяє трубу на дві порожнини. Тоді тиск із однієї порожнини при вільному стіканні рідини із іншої може викликати рух рідини у струминній системі і очищення поверхонь відбуватиметься в трубопроводі без його розвантаження.

Таким чином, доведена доцільність використання для очищення внутрішньої порожнини магістра-

льного трубопроводу спеціальних гнучких інструментів інтегральної дії.

При цьому для очищення може застосовуватися як рідина від зовнішнього джерела живлення, так і робочий продукт трубопроводу. Останній варіант є перспективним, оскільки потребує лише часткового перекриття трубопроводу.

ВИСНОВКИ.

1. Для забезпечення ефективної струминно-механічної обробки доцільно застосувати інструмент комбінованої дії, що має шпindel, на якому розташовані ланцюги трубчатих елементів, до яких підводиться робоча рідина.

2. Витрата і тиск рідини по довжині ланцюга трубчатих елементів описуються падаючими залежностями. При цьому витрата в кінцевому насадку ланцюга набагато менша витрати на вході і складає 20..50% витрати живлення.

3. Як напрямок подальших досліджень рекомендується дослідити робочий процес обробки із врахуванням інтегральної дії потоків рідини.

ЛІТЕРАТУРА

1. Промышленные трубопроводы и оборудование. Ф. М. Мустафин, Л. И. Быков, А. Г. Гумеров, Г. Г. Васильев, А. Д. Прохоров. Москва: Недра, 2004. 326 с.
2. Очистные поршни для трубопроводов *Информационная брошюра. ЦТД «Диаскан»*, 2010. 27 с.
3. Поздняков П. Б., Саленко А. Ф., Струтинский В. Б. Гидроструйные технологии при ремонте магистральных трубопроводов. *Оборудование и инструмент*, 2004. № 12, С. 34–38.
4. Саленко А. Ф., Поздняков П. Б. Імітаційна модель гідроструминного відшарування еластичного захисного покриття з поверхні твердого тіла. *Промислова гідраліка і пневматика: Прикладна гідромеханіка гідро-машини і гідропневмоагрегати*, Вінниця: ВДАУ, 2006. № 2(12), С. 49–54.
5. Саленко О. Ф., Струтинський В. Б., Загірняк М. В. Ефективне гідрорізнання. Кременчук, в-во КДПУ, 2005. 488 с.
6. 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, ЖТІ, 2001. С. 79–91.
7. В. А. Бреннер, А. Б. Жабин, А. Е. Пушкарев, М. М. Щеголевский. Гидроструйные технологии в промышленности. Москва, Изд-во АГН, 2000. 343 с.
8. Поздняков П. Б., Саленко О. Ф. Ефективність струминних роторних пристроїв, використовуваних для очищення поверхні твердих тіл. *Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету*, Кременчук. Вип. № 6, 2004. С. 88–92.
9. Поздняков П. Б. Інструмент інтегральної дії для виконання струминно-абразивного очищення *Збірник наукових праць КНТУ*, Краматорськ. 2007. С. 93–98.

ABOUT THE POSSIBILITY OF THE USE OF FLEXIBLE INJECTION TOOL FOR CLEANING INTERNAL CURVED LINE SURFACES

A. Strutinskaya, V. Tkachuk, V. Studynsky

National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute named after Igor Sikorsky"
prosp. Peremohy, 37, Solomensky District, Kyiv, 03056, Ukraine.

V. Schetynin, O. Salenko

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskiy National University

vul. Pershotravneva, 20, Kremenchuk, 39600, Ukraine. E-mail: salenko2006@ukr.net

Purpose. The issues of improving the efficiency of processing internal cavities of pipelines using hydrojet methods are considered. The existing methods of cleaning are given, conclusions are drawn on the advisability of contactless cleaning. **Methodology.** To solve this problem, the approaches of technical hydromechanics, the theory of fluid flow in nozzles and slots are used. It is shown that, in contrast to the known methods of forming several jets due to the rotating head, the use of flexible systems with a multitude of jet nozzles is more expedient. At the same time, the flexibility of the tool leads to a more active change in the position of the points of leakage of the jets, which causes an intense impact on the curved surface. The latter is important on the inner surface of the pipe, since jets can be formed not only due to an external source of pressure, but also due to the flow of the working fluid in the pipe. Also, new technical solutions were obtained using morphological analysis. **Results.** A fundamentally new design of an integral-action tool with flexible elements in the form of a long pipeline, obtained from interconnected common hemispherical elements, is proposed. An equation is obtained to determine the cost characteristics of the instrument. **Originality.** The authors determined the patterns of change in the speed of the working flow of such a device along the axis of the pipeline, depending on its diameter, the number of mating elements, the type of pollution. In this case, the pressure loss in the pre-nozzle space should be taken into account as the distance from the introductory part of the device to the final links increases. **Practical value.** All theoretical developments were brought to practical implementation, the constructive implementation of the elements of a flexible tool was proposed, recommendations on the design of such a tool were given. The results of tests of such a device are given. To ensure effective jet-machining, it is advisable to use a combined-action tool with flexible elements. Fluid flow and pressure along the entire length of a chain of tubular elements are described by falling dependencies. In this case, the flow rate at the end of the chain is much less than the cost of input and amounts to 20 ... 50% of the consumed power.

Key words. Water Jet processing, Flexible tool, Pipeline cleaning

REFERENS

1. Mustafin, F. M. (2004), *Promyslovyye truboprovody i oborudovaniye* [Field pipelines and equipment], Moscow, Russia.
2. *Ochistnyye porshni dlya truboprovodov* (2010), [Cleaning pistons for pipelines], Information Brochure Ufa, Russia.
3. Pozdnyakov, P. B., Salenko, A. F., Strutinskiy, V. B. (2004), *Gidrostruynyye tekhnologi pri remonte magistral'nykh truboprovodov* [Hydrojet technology in the repair of pipelines], *Oborudovaniye i instrument*, no. 12, pp. 34-38.
4. Salenko, A. F. Pozdnyakov, P. B. (2006), *Imitatsiynna model' gidrostruminnogo vidsharuvannya yelastichnogo zakhisnogo pokrittya z poverkhni tverdogo tila* [The simulation model of the hydro-jet detachment of an elastic protective coating from the surface of a solid.], *Prikladna gidromekhanika gidromashini ih gidropnevmoagregati*, no. 2(12), pp. 98-103.
5. Salenko, O. F., Strutinskiy, V. B., Zagirnyak, M. V. (2005), *Yefektivne gudrorizannya*. [Effective hydraulic cutting], Kremenchuk, Ukraine.
6. Bondarenko, M. Y., Salenko, O. F., Petko, H. V., Prikhod'ko, V. H. (2011), *Gidrostrumeneve ochishchennya poverkini tverdogo tila* [Hydrostatic cleaning of the surface of a solid.], *Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskiy National University*, iss. 2(67), pp. 68-72.
7. Brenner, V. A., Zhabin, A. B., Pushkarev, A. Ye., Shchegolevskiy, M. M. (2000), *Gidrostruynyye tekhnologii v promyshlennosti. Gidromekhanicheskoye razrusheniye gornykh porod* [Hydrojet technology in industry], Moscow, Russia.
8. Pozdnyakov, P. B., Salenko, O. F. (2004), *Yefektivnist' struminnikh rotornikh pristroiv, vikoristovuvanikh dlya ochishchennya poverkhni tverdikh til* [Efficiency of the jet rotary devices used to clean the surface of solids.], *Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskiy National University*, iss. 6, pp. 88-92.
9. Pozdnyakov, P. B., Salenko, O. F. (2008), *Instrument integral'noi dii dlya vikonannya struminno-abrazivnogo ochishchennya* [Integral action tool for inkjet-abrasive cleaning], *Transactions of Lviv Polytechnic*, no. 613, pp. 46-55.

Стаття надійшла 15.02.2019.