

УДК 621.965

## ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ГІДРОСТРУМИННОГО ОЧИЩЕННЯ ПРИ ВИКОРИСТАННІ КОМБІНОВАНОГО ІНСТРУМЕНТУ

*Поздняков П.Б., асист.*

*Кременчуцький державний політехнічний університет*

*імені Михайла Остроградського*

*39600, м. Кременчук, вул. Першотравнева, 20.*

*E-mail: [vyk@polytech.poltava.ua](mailto:vyk@polytech.poltava.ua)*

Рассматриваются вопросы создания гидроструйных инструментов для поверхностной обработки (очистки) магистральных трубопроводов. Приведены типовые конструкции сопловых устройств, представлены результаты исследования по созданию интегрированного струйно-абразивного устройства роторного типа.

**Ключевые слова:** струйная головка, ротор, очистка

In the article the questions of creation of jet penetrations instruments are examined for superficial treatment (cleanings) of main pipelines. The constructions of models of devices of nozzles are resulted, the results of research of authors are presented on creation of the integrated stream-abrasive device of rotor type.

**Key words:** jet penetrations, rotor cleaners high pressure

**Введение.** Нині у зв'язку з тривалим періодом експлуатації нафтотранспортної системи гостро постає питання підтримки її працездатності шляхом проведення капітальних ремонтів.

Основний обсяг робіт при капітальному ремонті магістральних нафтопроводів приходить на заміну ізоляційного покриття, яке прийшло у непридатність (55-60% від загального обсягу робіт).

Очищення поверхні трубопроводу при проведенні капремонтів належить до одного з найбільш відповідальних і трудомістких видів робіт і полягає у видаленні з поверхні трубопроводу старої ізоляції, бруду і продуктів корозії. Ретельне очищення трубопроводу є неодмінною умовою одержання якісного ізоляційного покриття, адже ступінь очищення є основним чинником, що визначає адгезію.

На даний час найбільше поширення одержав механічний спосіб очищення поверхні труби, заснований на принципі зрізання старої ізоляції. Однак, порівняння характеристик землерийної техніки й очисного пристрою доводить, що очисна машина є лімітуючою ланкою комплексу, яка знижує його можливу продуктивність, а механічний спосіб видалення ізоляції призводить до uszkodження поверхневого шару тіла труби, порушує його міцність та значно здорожує вартість ремонту.

Поряд із високим енергоспоживанням і важкими умовами праці зазначені причини змушують вести пошук альтернативних методів очищення поверхні труби.

Світовий досвід проведення капітального ремонту лінійної частини трубопроводів свідчить про відмову провідних компаній від механічного методу очищення поверхні труби (перед усім, із високим ризиком її пошкодження та ймовірністю іскроутворення). Там, де дозволяють кліматичні

умови, найбільш ефективним та безпечним способом зняття практично любых ізоляційних матеріалів є гідроочищення. Пристрої для гідро-струминного видалення старої захисної плівки являють собою роторні головки з кількома соплами і належать до так званих пристроїв інтегральної дії (оберткового типу).

У той же час, як зазначають виробники обладнання, для виконання гідроочисних операцій нагальною залишається проблема підвищення ефективності даного процесу за рахунок зниження його енергоємності та забезпечення високого рівня надійності очищення.

Пропоновані на ринку гідроочисні системи мають у своєму складі такі додаткові пристрої, як піскоструминні головки, камери просушування, камери контролю. Так вдається частково автоматизувати процес очищення, забезпечуючи попереднє струминне видалення поверхневої плівки потужним рідинним потоком, наступне піскоабразивне оброблення поверхні, просушування та контроль візуальними засобами або напівавтоматичними пристроями. У разі виявлення дефектів очищення (невідшарованих ділянок, зон корозії тощо) комплекс зупиняється і повертається у попередній стан для повторного виконання операцій. На трасі трубогону це потребує підняття до 200 м труби та задіяння додаткових моторизованих трубогримачів.

Отже, підвищення ефективності та якості струминного очищення, яке вбачається в оптимізації процесу взаємодії струменя з оброблюваною поверхнею, в розробці пристроїв та засобів інтегральної дії, а також відповідних технологій обробки, є важливою народногосподарською проблемою, розв'язання якої дозволить значно скоротити витрати на обслуговування та експлуатацію магістральних трубопроводів та

знизить вартість газо- та нафтопродуктів, що особливо важливо для економіки України.

**Мета роботи.** Підвищення якості та ефективності гідроочищення великогабаритних виробів струминними пристроями інтегральної дії комбінованого (струминного та струминно-абразивного) впливу.

**Матеріал і результати досліджень.** Для виконання операцій струминного очищення наразі використовуються різні конструкції головок.

Відомий пристрій для струминного очищення поверхонь твердих тіл [1], який являє собою циліндричний корпус з установленим в ньому соплом постійної або змінної витрати, і сполучений з утримуючою трубою підведення рідини високого тиску так, що центральна вісь сопла та трубки співпадають. Пристрій також оснащений елементами центрування та фіксації сопла, які стикаються із корпусом.

Отриманий за допомогою такого пристрою струмінь рідини використовується для виконання мийних або гідрорізних операцій.

Недоліком такого пристрою є те, що продуктивність процесу очищення забруднення або видалення поверхневої плівки, яка обумовлюється площею контакту ядра струменя та інтенсивністю струминного впливу, є достатньою малою, а для очищення поверхонь значної протяжності необхідне інтенсивне і щільне переміщення пристрою вздовж поверхні, що обробляється. Іншим недоліком є висока ймовірність наявності залишків забруднення після струминного впливу (внаслідок того, що струмінь володіє вибіркою спроможністю «оминати» більш міцні фрагменти та адгезійні сполуки). Конструкційно такий пристрій складається із штуцера з підвідним каналом, який закінчується струменеформуючим соплом, де відбувається формування ріжучого струменя рідини, ущільнюючого елемента та натискної гайки. Інколи для зручності складання використовують установочну втулку. У натискній гайці, а також у втулці є отвори, які виконані співосно зі струменеформуючим каналом. Останні необхідні для виходу струменя рідини.

Спосіб встановлення струменеформуючого сопла в насадку повинен забезпечити його швидкозмінність, яка необхідна у випадку поломки сопла. Окрім того, технічні камені та надтверді матеріали є відносно крихкими, що вимагає забезпечення мінімуму навантаження на сопло з боку насадки. В соплових насадках із соплами з високоміцного матеріалу, зазвичай, витримуються майже всі зазначені вимоги, окрім вимоги про плавність переходу між елементами каналів, що обумовлюється, як правило, наявністю між підвідним та струменеформуючим каналами зони, діаметр якої більший діаметра підвідного каналу.

У більшості випадків така конструктивна особливість призводить до втрат тиску та порушення плавності потоку рідини. Подолати зазначений недолік можна, забезпечивши так зване досконале стискування потоку, коли діаметр

підвідного каналу набагато більший за діаметр отвору витікання, а вхід до струменеформуючого каналу має плавні контури. У той же час, слід зазначити, що вільне встановлення сопла на опорній поверхні викликає труднощі при його заміні, обумовлені можливістю порушення співосності отворів струменеформуючого та випускного отворів.

Відомий пристрій, який також складається з корпусу, в якому виконана порожнина та до якої надходить два канали, що перетинаються під гострим кутом: канал протікання рідини та канал підведення абразиву, причому на виході з каналу рідини встановлено калібрувальну циліндричну трубку, а на вході цього ж каналу встановлено сопло з елементами кріплення та центрування; корпус жорстко з'єднаний із утримуючою трубою підведення рідини високого тиску.

Під час подання рідини під високим тиском за рахунок ефекту ежекції в змішувальній камері відбувається підхоплення абразиву струменем, і крізь калібрувальну трубку протікає абразивно-рідинний струмінь. Ефективність операцій очищення значно зростає у порівнянні з першим аналогом.

Недоліком зазначеного пристрою є також мала локальна дія ядра струменя, а також імовірність залишку в поверхневому шарі оброблюваного матеріалу частинок абразиву (зокрема, кремнію), який погіршує зчеплення з поверхнею нових захисних плівок.

Перспективним є пристрій інтегральної дії, що являє собою обертову головку (рис. 1), робочий рух якої забезпечується реактивною дією струменів.



Рисунок 1 – Роторна очищувальна головка

Він складається з корпусу, нерухомо закріпленому на трубці підведення рідини високого тиску, на якому, з можливістю обертання довкола осей трубки та корпусу, які співпадають, установлений ротор так, що рідина через центральний отвір трубки та корпусу крізь ущільнюючу пару спряжених поверхонь надходить до центрального каналу ротора, і далі, свердлуваннями у роторі, прямує до сопел, розташованих на передньому торці ротору, причому осі сопел перехреснюються з віссю ротору під

невеликим ( $3^0-5^0$ ) кутом у напрямку передбаченого обертання ротору. Зазначених сопел може бути кілька. Подібний інструмент інтегральної дії має значну продуктивність внаслідок роботи кількома струменями з одночасним обертанням довкола осі ротору, що дозволяє виконувати операцію очищення подібно до операції торцевого фрезерування.

Особливість цієї конструкції полягає в тому, що за рахунок двох окремих струменеформуючих соплових насадок, конструкція допускає зміну кута розходження струменів. Однак обертання довкола центральної осі головка отримує від реактивної сили, що виникає при витіканні рідини з сопел, встановлених під деяким кутом до нормалі площини обертання. Недоліком даного пристрою є відсутність засобів змішування рідинного потоку з потоком абразиву, внаслідок чого ймовірна наявність залишків забруднення після струминного впливу (як і у випадку використання пристрою) (рис. 2).

Складність та нестаціонарність процесів, одночасна взаємодія великої кількості елементів, що мають певні матеріально-функціональні характеристики, відмінність фізико-механічних властивостей плівки внаслідок її старіння та деструкції та відсутність системного підходу до створення конструкцій очищувальних пристроїв потребують проведення морфологічного аналізу, спрямованого на виявлення оптимальних конструктивних рішень, які б дозволили виконувати подібну обробку ефективно, якісно та надійно.



Рисунок 2 – Робоча зона напівавтоматичного очищувача із роторними струминними головками. Видні плями залишкового забруднення на трубопроводі

Попередніми дослідженнями встановлено, що:

- струминне очищення поверхні є ефективним у всякому випадку, коли плівка виявляє квазікрихілі властивості або вона достатньо пошкоджена на межі адгезійного контакту (наприклад, унаслідок поверхневої корозії тощо);

- струмінь надійно видаляє високо

еластичні або в'язкі плівки, особливо великої товщини;

- струмінь рідини не видаляє високоміцні плівки, а також поверхневі утворення (наприклад, окалину, оксидну плівку, іржу);

- гідроабразивний струмінь ефективно та надійно видаляє будь-яку міцну плівку, товщина якої суттєво не впливає на продуктивність обробки. При цьому частково змінюється мікрорельєф поверхні;

- гідроабразивний струмінь не видаляє еластичні та в'язкі покриття, частинки абразиву міцно занурюються в плівку.

Отже, метою синтезу гідроструминного інструменту інтегральної дії є створення такого компактного та надійного пристрою, який забезпечив би ефективне виконання мийних операцій за умови мінімальних енергетичних витрат на створення потоку рідини високого тиску. Створюваний інструмент повинен бути придатним для виконання операцій очищення будь-яких поверхневих плівок, а технологія – забезпечувати точне та стабільне виявлення оптимальних режимів ведення обробки.

Зазначена мета досягається тим, що у відомому пристрої інтегральної дії для виконання струминної обробки, який складається з корпусу, ротору, сопел та утримуючої труби, новим є те, що в утримуючій трубці нерухомо встановлена співвісна трубка подачі абразиву меншого діаметру, яка зовнішньою поверхнею контактує із елементом бокового підведення рідини високого тиску. Останній жорстко з'єднаний з утримуючою трубкою, а кінцями контактує з одного боку з магістраллю подачі абразиву, а іншим – входить у додатковий центральний отвір ротору, утворюючи з останнім змішувальну камеру. На її кінці якої нерухомо закріплена калібрувальна трубка у вигляді однотипних сегментних елементів, стикованих у жорстко встановленому на роторі бандажі. При цьому потік рідини високого тиску регульовано поділяється між боковими струминними соплами та центральним струминно-абразивним соплом, а сам ротор забезпечує установлення сопел так, що вісі струменів схрещуються з центральною віссю утримуючої труби і можуть перетинатися у зоні натикання струменів на оброблювану поверхню на відстані біля двох діаметрів сопла.

Сполучення відомих елементів – ротору з периферійно розташованими соплами, змішувальної камери із калібрувальною трубкою, розташованою на центральній вісі ротору, веде до набуття пристроєм нових ознак: підвищення надійності видалення міцних забруднень та зменшення залишку в поверхневому шарі оброблюваного матеріалу абразивних частинок після виконання операції; висока продуктивність обробки забезпечується використанням обертального ротору з соплами, які створюють періодичне пряме та косокутове навантаження малої (біля двох діаметрів) ділянки оброблюваної поверхні; висока ефективність видалення міцних фрагментів плівки

забезпечується використанням абразивно-рідинного струменя. Виключення залишку в поверхневому шарі основи абразивних частинок досягається тим, що абразивно-рідинний струмінь знаходиться між обертовими з високою швидкістю струменями, в яких абразив відсутній, тобто кінцевий вплив на поверхню здійснюють саме ці струмені.

Робота пристрою пояснюється рис. 3. Пристрій складається з оснащеної з одного боку сферичним кінцевиком утримуючої труби 1 (рис. 3), на якій встановлено упорно-радіальний підшипник 11, за допомогою якого утримуюча труба 1 сполучається з виконаним із можливістю обертання довкола вісі труби 1 корпусом 6, жорстко з'єднаним за допомогою гвинтів 8 із ротором 3, який з можливістю обертання на конічній розточці пояску контактує зі сферичним кінцем труби 1. Ротор 3 має ряд свердловань – центральне, яке утворює змішувальну камеру; бокові, що утворюють канали для підведення рідини до сопел 4 та 5, розташованих із торця ротору так, що вісі сопел 4 і 5 знаходяться на певних відстанях від центральної вісі труби 1 і схрещуються з нею під кутом  $(3-5)^{\circ}$  (що забезпечує виникнення реактивного моменту для обертання ротору), а між собою перетинаються під кутом, який забезпечує на певній відстані до оброблюваної поверхні періодичне струминне навантаження поверхні з кроком, що приблизно дорівнює двом діаметрам сопла, та радіальні свердловання, що сполучають змішувальну камеру з боковими

каналами. Всередині утримуючої труби 1 співвісно з нею розташована трубка 2 подачі абразиву, яка одним кінцем сполучена з кінцевим фіксуючим елементом 10, контактуючим з утримуючою трубою 1 та ковпачковою гайкою 9 так, що налагоджувальне розміщення трубки подачі абразиву 2 відносно торця центрального отвору ротору 3 забезпечується її переміщенням уздовж осі та фіксацією у цьому стані гайкою 9, а інший кінець трубки 2 виконаний у вигляді сопла, яке входить у центральний отвір ротору 3, в якому з торця ротору змонтоване сегментне сопло 16 із підтисненням потоку рідини. На корпусі 6 із протилежного від ротору боку виконано лабіринтне ущільнення 13, яке разом із елементом 7, установленим на трубі 1 та зафіксованим кільцем 12, забезпечує ущільнення обертОВОЇ частини пристрою від нерухомої. Додатково на центральній трубі 1 змонтований блок підведення рідини високого тиску 14, закріплений гайками 15, розточка якого сполучається із отвором труби 1.

Пристрій працює так. Після подання рідини через канал блоку підведення рідини 14, вона надходить до отвору труби 1 і далі прямує до змішувальної камери ротору 3, в якій утворений потік поділяється і надходить крізь радіальні отвори до бокових сопел 4 та 5, а, минаючи змішувальну камеру, до сопла 16, в якому потік формується сегментами.

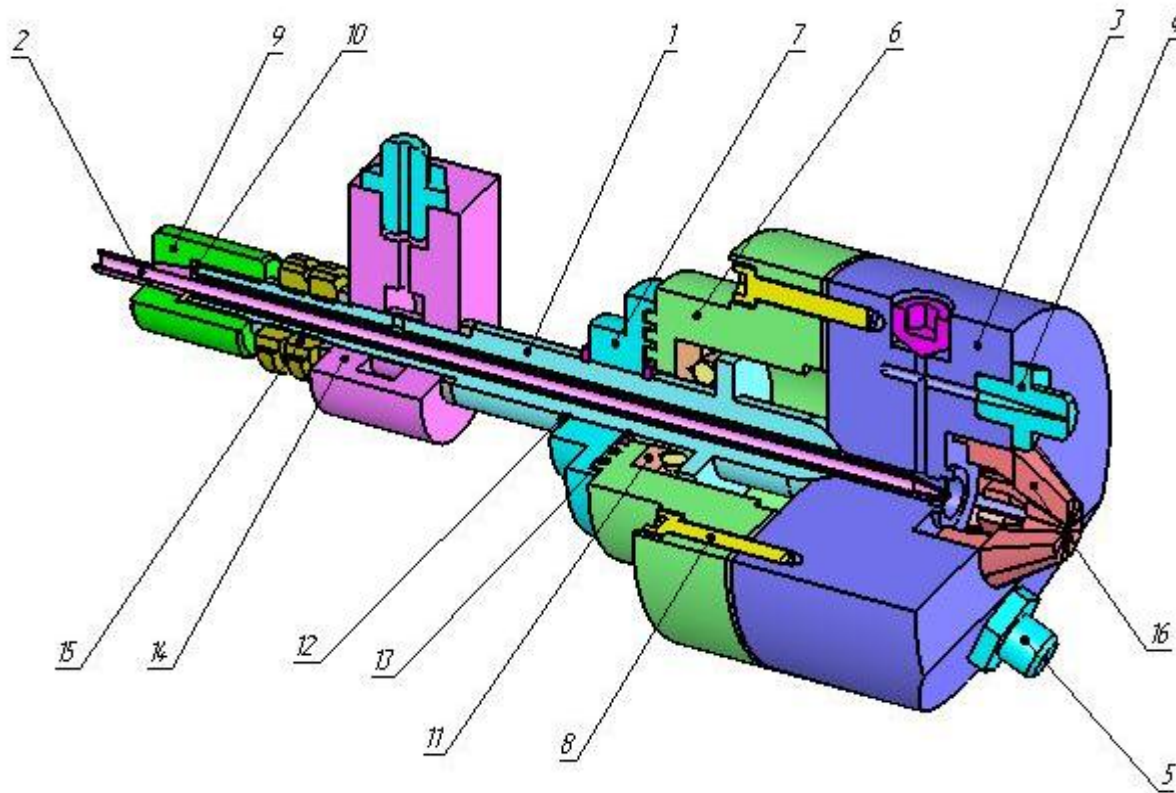


Рисунок 3 – Роторний очищувач з гідроабразивним соплом

Тип головки	Показники якості обробки				Показники ефективності		Примітка
	$s$	$k_{Ra}$	$k_s$	$Rz$ , мкм	$F$ , м <sup>2</sup>	$N$ , кВт	
1) монострум. гідроабраз. очищувач	0,003	0,75	1,1	40...80	4,2	6,5	матовий блиск
2) роторний очищувач	0,12	1,0	1,0	-	12,8	13,8	чорна пов-ня, жиров. залишок
3) очищувач WOMA	0,11	1,0	1,0	-	14,9	15,5	чорна пов-ня, жиров. залишок
4) пропонуваній очищувач	0,003	0,88	1,05	40	13,1	12,2	матовий блиск

Одночасне подавання абразивної суспензії до каналу трубки подачі абразиву 2 призводить до того, що за рахунок ежекції у змішувальній камері абразивні частинки підхоплюються рідинним потоком, розганяються, і проходячи через сопло 16, утворюють сформований рідинно-абразивний потік. За рахунок того, що сопла 4 та 5 виконані зі схрещеними осями, при стіканні струменів рідини виникає реактивний момент, який надає обертового руху ротору 3 та зв'язаному з ним корпусу 6. Обертовий рух ротору призводить до того, що оброблювана поверхня сприймає струминне навантаження як від рухаючих за кільцевою траєкторією струменів рідини, один з яких натікає на перепону у практично перпендикулярній площині, а інший є косокутовим, так і від нерухомого у площині оброблюваної заготовки струминно-абразивного потоку.

Таке поєднання призводить до технічного результату: отримання якісного очищення поверхні за рахунок поєднання періодичного струминного та струминно-абразивного впливу; виключення на поверхні залишків абразиву внаслідок того, що абразивно-рідинний швидкоплинний потік знаходиться всередині обертових з високою швидкістю струменів чистої рідини.

За результатами досліджень нами було виготовлено та випробувано струминно-абразивну головку зазначеної конструкції.

Випробовуванню піддавали:

1) стандартний моноструминний абразивний очищувач із системою подачі абразиву ежекційного типу;

2) роторний очищувач з двома струминними соплами;

2) роторний очищувач з двома соплами;

3) пропонуваній роторний очищувач.

У якості джерела живлення високого тиску використовували помпову станцію, налагоджену на тиск 100 МПа, витрату рідини до 45 дм<sup>3</sup>/хв., що достатньо для живлення двох сопел діам. 1,8 мм, або струминно-абразивного пристрою.

Витрату енергії фіксували по споживаній потужності лічильником типу СЧЗ-100-ВНР-П УХЛ4, з похибкою визначення не більше 3% в діапазоні 0,5 – 100 кВт ч.

Ступінь очищення досліджували візуально (за допомогою 8-х луп) та мікроскопічним дослідженням (на оптичному мікроскопі МИМ-8),

стан поверхневого шару визначали за контрольними зразками на електронному мікроскопі РЕМ-106, наявність залишків – енергодисперсійним аналізом (ЕДАР з ППП «Магеллан 2.2»).

Результати досліджень подано в таблиці. Дослідження виконувались при очищенні вручну, протягом 10 хв. Ефективність визначали за ознакою питомої витрати енергії на виконання очищення одиниці площі з урахуванням наявного залишку (рис. 4)



Рисунок 4 – Очищена поверхня із використанням традиційного інструмента

При цьому брали до уваги, що залишок плівки на поверхні потребує додаткових витрат енергії та часу. Отже, визначення ефективності здійснювали за формулою:

$$E = \frac{N}{F} (1 + s)$$

Для варіантів таблиці маємо:  $E_1 = 1,55$  кВт/м<sup>2</sup>;  $E_2 = 1,207$  кВт/м<sup>2</sup>;  $E_3 = 1,144$  кВт/м<sup>2</sup>;  $E_4 = 0,98$  кВт/м<sup>2</sup>;

Відтоді, зважаючи на подані показники, кращим є пропонуваній варіант виконання обробки.

Якість очищення та наявність у поверхневому шарі перевіряли шляхом виконання рентгенівського енергодисперсійного аналізу на РЕМ-106 И.

Так, для двох зразків, оброблених за традиційною технологією, яка передбачала гідро струминне очищення з наступним піскоструминним очищенням, та за допомогою пропонуваного пристрою в один прохід (одночасна обробка струминно абразивним пристроєм) отримано такі спектрограми, рис.5.

На рис. 5,а подано спектрограму, отриману для випадку струминно-абразивної обробки поверхні. Дослідження виконували для 10 точок поверхні, вільно обраних на зразку (координати точок визначалися за допомогою генератора випадкових чисел), далі результати усереднювалися і піддавалися статистичній обробці, результатом якої є подана спектрограма. З рис. 5,а видно, що на поверхні залізного зразка присутній кремній, який входить до складу оксиду  $\text{SiO}_2$ , що

використовувався нами як абразив. Кількісний аналіз довів, що частка речовини на поверхні незначна, і знаходиться у межах 0,08%. - використання пропонованого пристрою майже повністю виключає наявність цієї речовини на поверхні тобто можна припустити, що частини абразиву, які залишилися на поверхні, видаляються роторним струменем, що ковзає по поверхні у подальшому, тобто вода практично повністю вимиває абразив (доля менша за (0,001%).

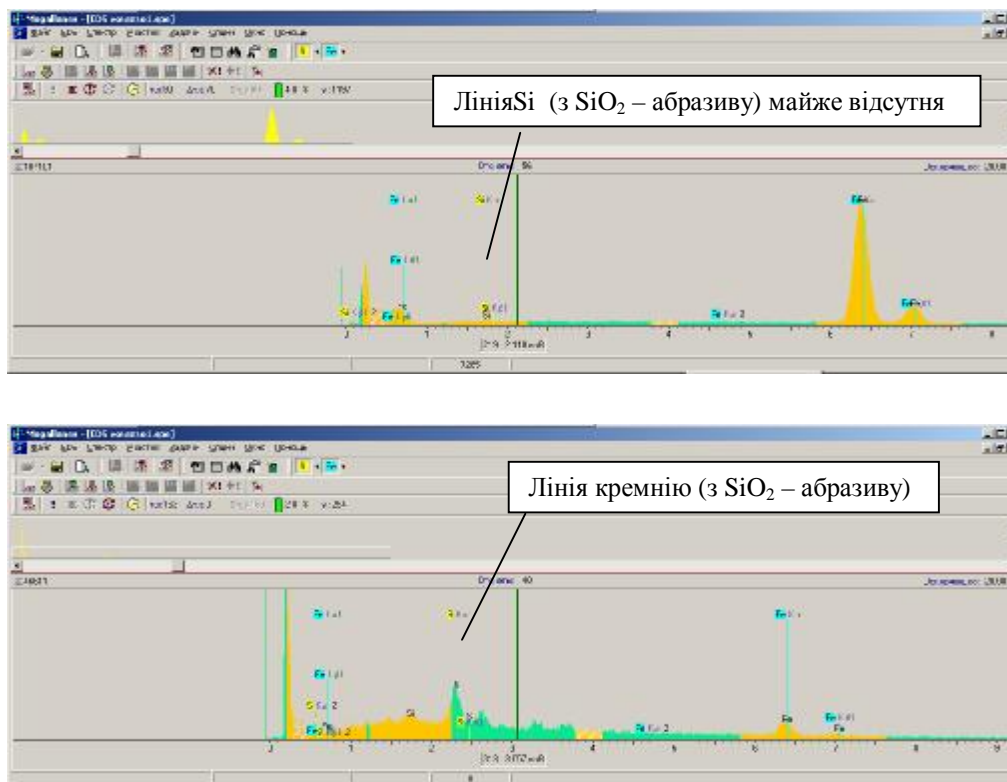


Рисунок 5 – Характерні спектри поверхневого шару при обробці пропонованим струминно-абразивним роторним пристроєм (а) та за існуючою технологією (б)

Спектрограма рис. 5,б доводить, що використання пропонованого пристрою майже повністю виключає наявність цієї речовини на поверхні тобто можна припустити, що частини абразиву, які залишилися на поверхні, видаляються роторним струменем, що ковзає по поверхні у подальшому, тобто вода практично повністю вимиває абразив (доля менша за (0,001%).

Спектрограма рис. 5.11, в, виконана для зразку обробки поверхні за традиційною технологією (тобто у два проходи – струминним очищенням та піскоповітряною наступною обробкою), доводить, що у даному випадку абразивні включення на поверхні максимальні, і сягають 0,1%.

Шорсткість поверхні після виконання струминно-абразивної обробки також контролювали за допомогою растрового електронного мікроскопу. З цією метою нами було проведено серію дослідів,

направлених на виявлення закономірності зміни рівня інтенсивності сигналу розгортки залежно від рівня шорсткості поверхні для неметалевих та металевих зразків. При цьому базувалися на принципі підсилення топографічного та послаблення композиційного контрастів, визначеного двома детекторами Еверхарта-Торнлі.

За основу приймали зразкові еталони шорсткості з параметрами  $Ra$  1,6 мкм – 6,3 мкм,  $Rz$  40-80 мкм, які установлювали на предметний столик мікроскопу та кріпили до його опорної поверхні. Внаслідок того, що даний прилад є приладом відносного виміру, за еталон обрали зразок шорсткістю  $Ra=6,3$  мкм. Розмах інтенсивності, отриманий на даному зразку, становив опорну величину  $F_0$ . Відносно цієї величини визначали розмах інших сигналів  $F_i$ , що знімалися зі скінтілятору. Растр зображення наведений на рис. 6.

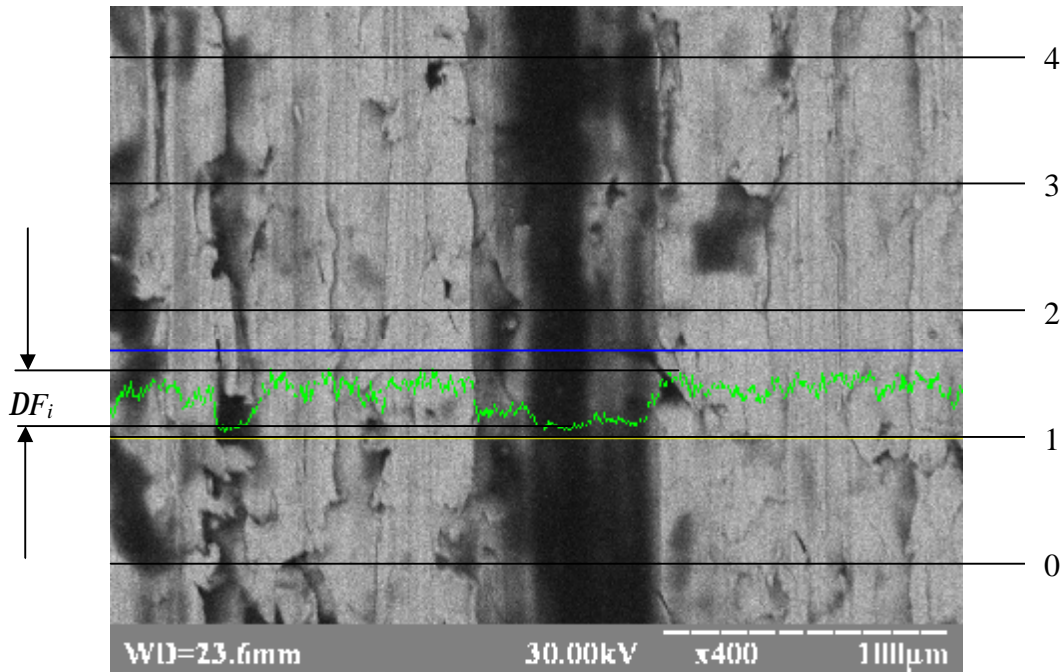


Рисунок 6 – Растр зображення та крива інтенсивності випромінювання, що відповідає рівню шорсткості поверхні

Далі, скориставшись профілографом-профілометром ПР-110, та отримавши відповідні відбитки досліджуваних поверхонь, виконали статистичну обробку вибірки рівнів розмаху сигналу яскравості, та отримали розрахункове рівняння  $R_z = e^{0,78+0,14dF}$ , яке дає змогу за рівнем сигналу  $\Delta \bar{F}$  (як незалежного параметру, встановленого з отриманого растру поверхні) визначати рівень шорсткості досліджуваної поверхні. Помилка виміру при цьому становить

$$s_0 = 1.46 + 2.4 \cdot 10^{-3} xR - 1.44 \cdot 10^{-6} xR^2$$

при кореляції 0,96 та довірчому інтервалі 90%.

Це дало змогу дослідити вплив окремих технологічних факторів на зміну рівня шорсткості та на якість очищення поверхні гідро струминним та гідро абразивним струменями.

Таким чином, пропонується пристрій, поряд із наведеними перевагами, дозволяє також майже повністю виключати наявність на оброблюваній поверхні залишків абразивних частинок, що

підвищує якість підготовленої під нанесення нового захисного покриття поверхні.

**Висновки.** Проведені дослідження довели, що запропонований нами пристрій є достатньо ефективним гідроструминним інструментом інтегральної дії, а сполучення ознак струминного та струминно-абразивного сопел дає змогу практично повністю виключити недоліки, властиві традиційним інструментам. Використання запропонованого інструменту є ефективним засобом зменшення енергетичних витрат при ремонті магістральних нафтопроводів та при виконанні аварійно-відновлювальних робіт.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Саленко О.Ф., Петко І.В., Третьяков О.В. "Гідро- та гідроабразивна обробка: теорія. Технологія та обладнання. – К.: ІЗМН, 1998. – 488 с.
2. Струтинський В.Б. Математичне моделювання процесів і систем: Підручник для студентів ВТУЗів. – Житомир: вид-во ЖІТІ, 2006. – 520 с.

Стаття надійшла 20.03.2007 р.  
Рекомендовано до друку д.т.н., проф.  
Саленком О.Ф.