

УДК 532.528 (045.2)

ОЧИЩЕННЯ ВНУТРІШНЬОЇ ПОВЕРХНІ ТРУБОПРОВОДУ ВІД ЗАБРУДНЕНЬ*Зайончковський Г. Ф., д-р техн. наук; Власов А. С., Радченко В. Ю., Тарасенко Т. В.*

Національний авіаційний університет

int2080@ukr.net

Досліджено методику очищення внутрішньої поверхні трубопроводу від забруднень. Встановлено наявність ефекту кавітаційного очищення внутрішньої поверхні трубопроводу та визначено оптимальний час кавітаційного очищення трубопроводу, який не повинен перевищувати інкубаційного часу кавітаційної ерозії.

Ключові слова: кавітація, кавітаційне очищення, кавітаційна ерозія, кавітаційний генератор.

The article is sacred to researches of methods of cleaning of internal surface of pipeline from contaminations. Realization of research in this direction allowed setting the presence of effect of the cavitation cleaning of internal surface of pipeline, and defining optimal time of the cavitation cleaning of pipeline which must not exceed incubation time of cavitation erosion.

Key words: cavitation, cavitation cleaning, cavitation erosion, cavitation generator.

Очищення поверхні металевих виробів, внутрішніх порожнин вузлів являє собою сукупність складних фізико-хімічних і механічних процесів, ефективність яких залежить від властивостей миючого середовища, розміру і властивостей часток забруднення, технологічних режимів очищення, конструктивних особливостей деталей. Забруднення, що залишились після очищення поверхні, залежать від способу очищення і типу миючого середовища.

Тривалість процесу очищення деталей, агрегатів і систем сучасних машин досягає 10 — 15 % від загальних затрат часу на їх виготовлення і складання. Тому вибір миючого середовища, способу і гідродинамічних параметрів очищення являється важливим етапом у технологічному процесі виготовлення машин. Забруднення металевих поверхонь у вигляді плівок, прилиплих твердих частинок, мастил можуть бути видалені в результаті механічної дії, розчинення, хімічної реакції або змивання. У деяких випадках використовують комбіновані методи очищення.

Оскільки забруднення поверхні металу являє собою, здебільшого, суміш твердих дрібних частинок, продуктів корозії і окислів із полімеризованими залишками масел, жирів, олів, нагару, то їх видалення потребує значних зусиль і виконання спеціальних операцій. Наприклад, інтенсифікація процесу очищення із використанням кавітаційних ефектів. Поверхню металу можна очищувати механічними засобами, струменем рідини, потоком рідини, у яку занурено деталь, кавітаційними струменями і комбіновано. Якщо необхідно очистити внутрішню поверхню трубопроводу, то зручно застосувати очищення потоком рідини. Режим очищення металевої поверхні деталі потоком миючої рідини визначають виходячи із аналізу гідродинамічної взаємодії миючої рідини з частинками забруднень, а також на основі результатів експериментальних досліджень.

Цей процес можна розділити на такі пов'язані між собою елементарні процеси: відрив частинок забруднень від поверхні, що очищується; підхоплення забруднень потоком рідини; транспортування забруднень до фільтруючих пристроїв.

Процес відриву частинок забруднень — основна складова усього процесу очищення. Разом із тим частинки, що відірвались необхідно швидко видалити, для чого потік рідини повинен мати здатність підхопити і транспортувати забруднення.

Існує швидкість потоку рідини, при якій спостерігається зрушення і початок руху перших частинок, стійкість яких може порушуватись, при цьому частинки коливаються і, відриваючись від поверхні, переміщуються стрибкоподібно поблизу від поверхні. За певних умов частинки, що відірвались, можуть знову осісти на поверхню або перейти в потік у завислий стан.

Величині місцевої швидкості потоку рідини, у зоні розташування частинки забруднень, за якої відбувається її відрив від поверхні, відповідає деяка середня швидкість руху рідини, що називають *швидкістю відриву*. Встановлено, що середня швидкість потоку, необхідна для відриву частинок, збільшується зі зменшенням розміру частинок. Це пояснюється тим, що силова дія на маленькі частинки, що знаходяться у товщі пограничного шару, де швидкості руху рідини малі, також незначна. Необхідне для відриву частинок збільшення місцевих швидкостей рідини зумовлює збільшення і середньої швидкості. Відрив дрібних частинок ускладнено також унаслідок значних адгезійних сил, що потребує підвищених середніх швидкостей потоку. Сила адгезії частинок залежить від їх форми; вона мінімальна для частинок, форма яких наближується до сферичної або до форми правильного багатогранника. Сила адгезії для плоских частинок збільшується за рахунок більшої площі контакту із поверхнею.

Збільшення сили адгезії спостерігається також зі зменшенням мікросорсткості поверхні частинок.

Існує загальноприйняте положення, що стійке перенесення рідиною важких частинок у завислому стані можливе тільки в турбулентних потоках рідини, які характеризуються високими середніми швидкостями течії. Неможливість забезпечити потрібні для очищення швидкостей потоку миючої рідини (порядку 25 — 30 м/с) призводить до значного збільшення часу очищення, а також не гарантує повного видалення частинок забруднень розміром менше 5 — 10 мкм.

Спеціальні дослідження показують, що ефективно видалення полідисперсного порошку забруднень розміром 2 — 100 мкм можливо при помірних середніх швидкостях миючої рідини, якщо штучним способом створити збурення, що викликаються коливаннями тиску або швидкості потоку рідини.

Для підвищення продуктивності очищення внутрішньої поверхні трубопроводу запропоновано пристрій (рис. 1), який складається із камери 1, в яку поміщено трубопровід 4, заповнений промиваючою рідиною. У камері 1 за допомогою кавітаційного генератора створюються високочастотні кавітаційні коливання тиску значної амплітуди. Інтенсивність пульсацій регулюється за допомогою дроселя 3. Трубопровід 4 у камері 1 являє собою тонкостінну оболонку, яка під дією знакозмінної сили набуває радіальної деформації високої частоти. Стінка трубопроводу «прихлюпується», що сприяє відриву забруднень від внутрішньої поверхні трубопроводу. Через значну силу інерції, що діє на частинку забруднення і яка може перевищувати сили адгезії, відбувається

ся відрив забруднення від поверхні трубопроводу. Завдяки пульсаціям стінки трубопроводу в рідині, що знаходиться (протікає) у трубопроводі, з'являються поперечні складові швидкостей, що створює можливість перенесення разом із масою рідини (у поперечному напрямку) твердих частинок і підтримання їх у завислому стані.

Розглянемо процеси відривання, зависання і транспортування частинок забруднень потоком рідини. На частинку, що лежить на поверхні, діють сили, зображені на рис. 2: сила тяжіння частинки у рідині G ; сила адгезії частинки до поверхні $F_{ад}$; піднімальна сила W_y ; яка є вертикальною складовою головного вектора гідродинамічної дії рідини на частинку; сила лобового опору W_x — складова головного вектора гідродинамічної дії рідини на частинку, що збігається із напрямком вектора швидкості потоку; сила інерції, що діє на частинку забруднення, яка виникає від високочастотної радіальної деформації трубопроводу в кавітаційному полі $F_{ин}$.

Оскільки реальні розміри частинок забруднень, які необхідно видалити, перебуває в межах від 0,5 до 100 мкм, то певна їх кількість перебуває у товщі пограничного шару рідини, що загальмовано біля поверхні під дією сил в'язкості і адгезії. Пограничний шар перешкоджає контакту частинок забруднень із сусідніми, що рухаються інтенсивно у сусідніх шарах рідини, це ускладнює видалення частинок забруднень, що прилипли до поверхні. Але завдяки інерційній складовій $F_{ин}$, частинки забруднень рухаючись поперек пограничного шару «вистрілюються» у сусідні шари, де є інтенсивний рух рідини.

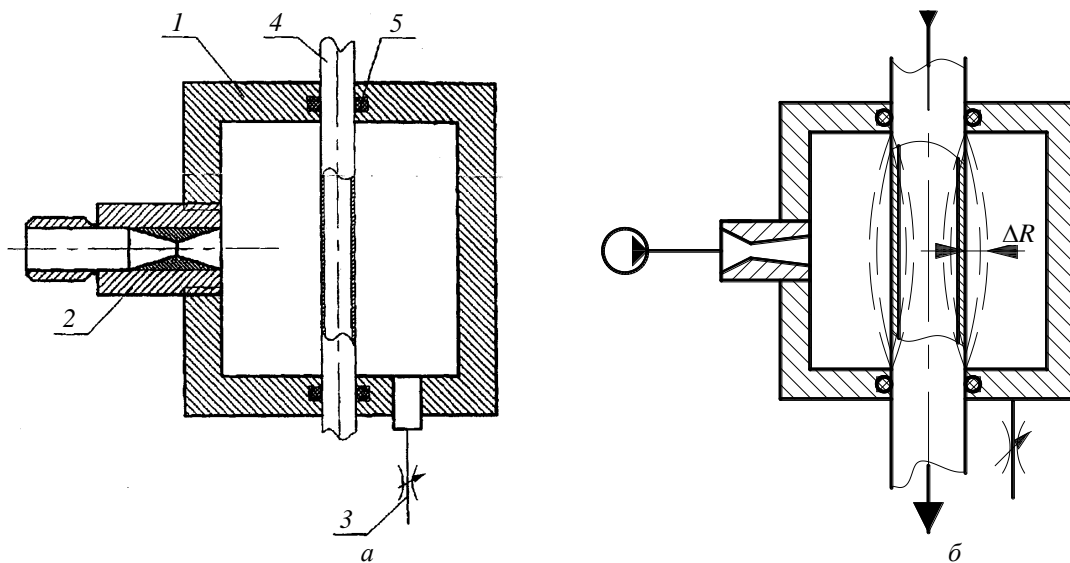


Рис. 1. Конструкція пристрою для очищення внутрішньої поверхні трубопроводу (а) і схема принципу дії (б):

1 — кавітаційна камера; 2 — кавітаційний генератор пульсацій тиску; 3 — дросель регульований; 4 — трубопровід, що очищується; 5 — ущільнення

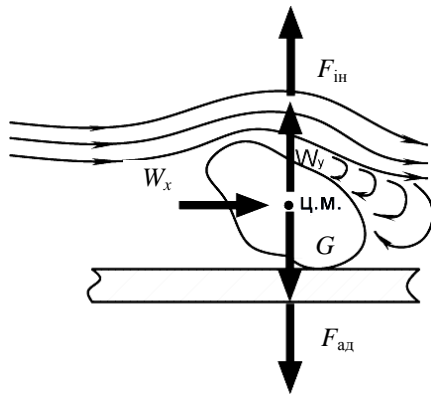


Рис. 2. Схема дії сил на частинку забруднення, що знаходиться на поверхні в потоці рідини

Величину сили інерції можна визначити, враховуючи, що внаслідок високочастотних пульсацій тиску трубопровід зазнає радіальних деформацій. Виходячи із закону Гука

$$\frac{\Delta R}{R} E = \sigma,$$

де ΔR — радіальна деформація трубопроводу; R — радіус трубопроводу; E — модуль пружності матеріалу труби (для дюралюмінію $E = 0,71 \cdot 10^6$ кгс/см²); σ — нормальні напруження в матеріалі стінки труби, які пов'язані з пульсацією тиску Δp_1 і товщиною стінки δ співвідношенням:

$$\sigma = \frac{\Delta p_m R}{\delta}$$

З урахуванням властивостей забруднень і матеріалу трубопроводу та параметрів пульсацій можна визначити швидкість і прискорення оболонки в радіальному напрямку:

$$a = \frac{\Delta R}{\tau^2},$$

де τ — період коливання стінок трубопроводу.

Так, для трубопроводу із дюралюмінію діаметром 10 мм прискорення оболонки в радіальному напрямку може становити значну величину. Маса частинки забруднення можна визначити за формулою

$$m = \frac{4}{3} \pi \left(\frac{d_{\text{ч}}}{2} \right)^3 \rho_{\text{ч}},$$

де $d_{\text{ч}}$ — діаметр частинки забруднення; $\rho_{\text{ч}}$ — густина частинки забруднення (1800 кг/м³).

Розрахунки показують, що для частинки забруднення розміром 5 мкм, при розмаху кавітаційних коливань тиску $\Delta p_m = 10$ МПа, частоті кавітаційних коливань тиску в кавітаційній камері 10 кГц сила інерції перевищує силу адгезії у два рази. Силу адгезії розраховують за формулою:

$$F_{\text{ад}} = k_a d_{\text{ч}},$$

де k_a — емпіричний коефіцієнт, що залежить від числа адгезії, $1,6 \cdot 10^{-8}$ Н/мкм.

За тих самих параметрів кавітаційних коливань тиску для частинки розміром 15 мкм сила інерції перевищує силу адгезії в 4,6 рази, для частинки розміром 50 мкм — у 52 рази. Для частинки розміром 100 мкм сила інерції перевищує силу адгезії у два рази вже за частотою 1 кГц.

Для дрібних частинок забруднень сила адгезії може на декілька порядків перевищувати силу тяжіння і є основною силою, що утримує частинку забруднення на поверхні. Отже, для частинки розміром 5 мкм сила інерції буде перевищувати силу адгезії за частотою 15 кГц.

У загальному випадку відрив частинки від поверхні можливий, коли сума сил гідродинамічної дії рідини на частинку в напрямку потоку перевищить силу тертя частинки об поверхню. Ця сила зумовлена переважно силою тяжіння G і силою адгезії $F_{\text{ад}}$. Ця умова описується такою нерівністю:

$$W_x > f(G - W_y + F_{\text{ад}} - F_{\text{тр}}),$$

де f — коефіцієнт тертя частинки по поверхні.

Експеримент очищення внутрішньої поверхні проводився для трубопроводів, виготовлених із сплавів Д16АТВ, 1Х18Н9Т. На рис. 3 подано гістограми очищення внутрішньої поверхні трубопроводу в функції часу.

Біля гістограм вказано кількість частинок забруднень, що містяться у об'ємі $9,04 \cdot 10^{-6}$ м³, які відділились від поверхні трубопроводу. Промивочна рідина АМГ-10, тиск живлення кавітаційного генератора становив 10 МПа, матеріал трубопроводу Д16АТВ, кавітаційний генератор — конфузорно-дифузорний насадок. Із гістограм очищення поверхні трубопроводу видно, що зі збільшенням часу експозиції збільшується кількість забруднень, що відділились від поверхні трубопроводу. Максимальний час експозиції для матеріалу Д16АТВ становить 15 хв, збільшувати час очищення недоцільно, тому, що в матеріалі трубопроводу почнуть нагромаджуватися руйнування, пов'язані з дією кавітаційної ерозії. Час експозиції для інших матеріалів можна збільшити, до тих меж доки він не стане дорівнювати часу інкубаційного періоду кавітаційної ерозії.

Із збільшенням часу експозиції збільшується кількість забруднень усіх гранулометричних фракцій. Оскільки стінки трубопроводу пульсують під дією кавітаційного навантаження, відбувається коагуляція часток забруднення. Частинки забруднення дрібнішої фракційної групи під дією знакозмінних навантажень утворюють значні конгломерати, таким чином пояснюється збільшення фракційної групи із розміром частинок забруднень понад 200 мкм.

Таким чином із даних експерименту видно, що кавітаційне очищення трубопроводу сприяє підвищенню інтенсивності очищення поверхні, зменшує час, необхідний для промивання трубопроводу.

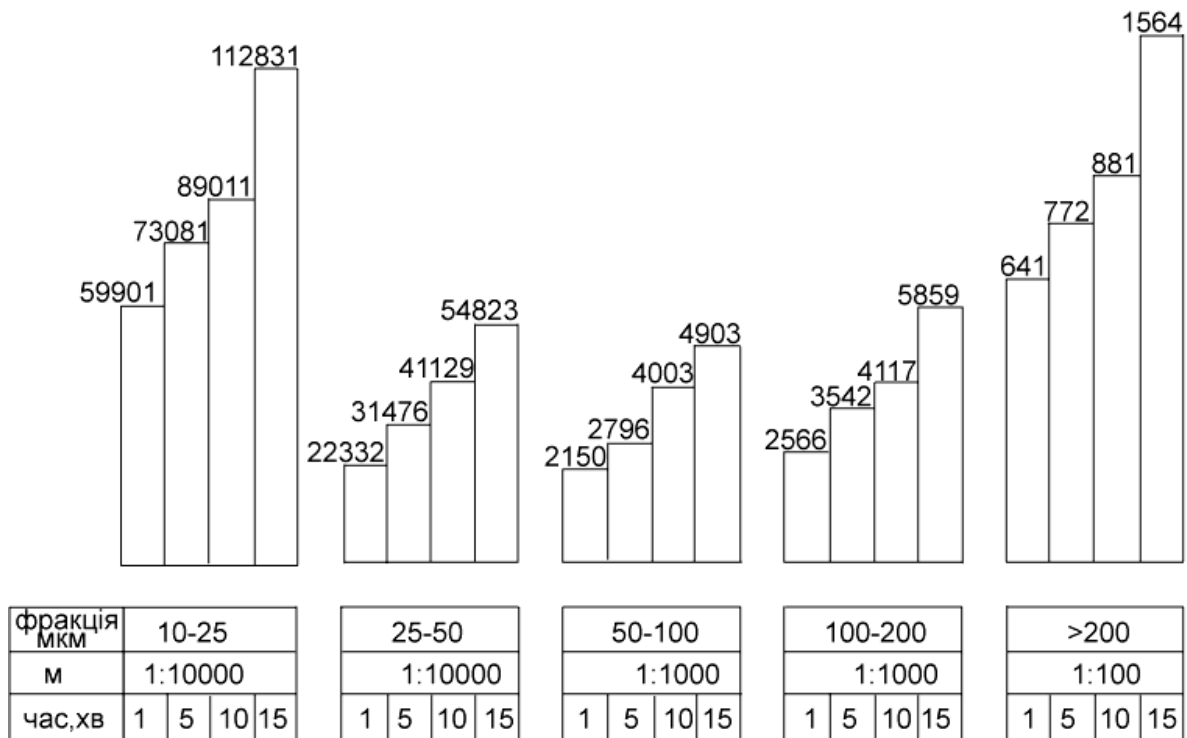


Рис. 3. Результати експерименту з очищення внутрішньої поверхні трубопроводу в кавітаційному полі.
(Довжина трубопроводу $l = 180$ мм; діаметр $d = 10$ мм;
матеріал Д16АТВ; рідина АМГ-10, $p_{\text{вх}} = 10$ МПа; $\Delta\bar{p} = 0,9$)

Порівнюючи гранулометричний склад рідини — забруднювача із результатами експерименту, можна стверджувати, що фракція забруднень розміром 10 — 25 мкм повністю відділяється від стінок трубопроводу після 5 хв кавітаційної обробки. Фракція розмірами 25 — 50 мкм відділяється від стінок дослідного трубопроводу після 10 хв кавітаційної обробки. Фракції забруднень розміром 50 — 100 мкм і 100 — 200 мкм коагулюють під дією вібрацій, що спричинені кавітаційними коливаннями тиску, у фракцію більшого розміру (> 200 мкм), яка відділяється від стінок трубопроводу після 1 хв кавітаційної обробки у три рази більше порівняно із вихідними даними рідини — забруднювача (рис. 4).

Для досягнення максимального очищення трубопроводу із матеріалу Д16АТВ необхідно, щоб час кавітаційного очищення не перевищував інкубаційного часу кавітаційної ерозії, який для сплаву Д16 АТВ становить 15 хв.

Висновки

1. Встановлено наявність ефекту кавітаційного очищення внутрішньої поверхні трубопроводу.
2. Визначено оптимальний режим роботи кавітаційного генератора $\Delta\bar{p} = 0,9$ при $p_{\text{вх}} = 10$ МПа;
3. Розраховано оптимальний час кавітаційного очищення трубопроводу, який не повинен перевищувати інкубаційного часу кавітаційної ерозії.

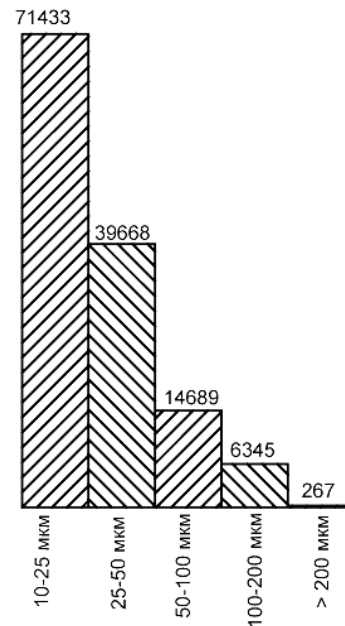


Рис. 4. Вихідні дані гранулометричного складу рідини — забруднювача

ЛІТЕРАТУРА

1. Глазков М. М. Кавитация в жидкостных системах воздушных судов / М. М. Глазков, В. Г. Ланецкий, Н. Г. Макаренко, И. П. Челюканов. — К. : КИИГА, 1987. — 62 с.

