

ОПТИМІЗАЦІЯ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ ЛІНІЙНОЇ ЧАСТИНИ ГАЗОПРОВІДІВ

Т.А. Мартинюк, Р.Т. Мартинюк, О.Р. Мартинюк

ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (0342) 727138,
e-mail: snp@nimg.edu.ua

Економічна ефективність транспортування природного газу системою магістральних газопроводів значною мірою залежить від характеристик процесу обслуговування об'єктів газотранспортного комплексу в період експлуатації. Найбільш залежною і складною в обслуговуванні є лінійна частина магістрального газопроводу, яка характеризується значною протяжністю і труднодоступністю для візуального спостереження. Тому до проблем обслуговування висувають особливі вимоги.

Одним із найбільш поширених методів обслуговування лінійної частини газопроводу і водночас найбільш складним є механічне очищення порожнини трубопроводу механічними засобами очистки. Від ефективності даного процесу суттєво залежать затрати на транспортування газу.

Складність процесу очищення пов'язана насамперед зі складністю контролю руху очисного пристрою трасою газопроводу. Складні умови траси в ряді випадків можуть призвести до непланової зупинки очисного пристрою в газопроводі – застрягання, яке вимагає тривалих пошукових робіт, а також вирізання катушки і повторного зварювання газопроводу. Суттєві затрати часу і ресурсів призводять до зниження економічної ефективності транспортування газу газопроводом і забруднення навколишнього середовища.

Ключові слова: газопровід, спостереження, застрягання очисного поршня.

Экономическая эффективность транспортировки природного газа по системе магистральных газопроводов во многом зависит от характеристик процесса обслуживания объектов газотранспортного комплекса в период эксплуатации. Наиболее зависимой и сложной в обслуживании является линейная часть магистрального газопровода, характеризующаяся большой протяженностью и труднодоступностью визуального наблюдения. Поэтому к ее обслуживанию предъявляют особые требования.

Одним из наиболее распространенных методов обслуживания линейной части газопровода, и в то же время наиболее сложной, является механическая очистка полости трубопровода, от эффективности которой существенно зависят затраты на транспорт газа.

Сложность процесса очистки заключается, в первую очередь, в трудностях контроля движения очистного устройства по трассе газопровода. Сложные условия трассы в ряде случаев могут привести к неплановой остановке очистительного устройства в газопроводе – застревание, которое требует длительных поисковых работ, а также вырезания катушки и повторной сварки газопровода. Существенные затраты времени и ресурсов приводят к снижению экономической эффективности транспортировки газа и загрязнению окружающей среды.

Ключевые слова: газопровод, наблюдение, застревание очистительного устройства.

Economic efficiency of natural gas transportation by the gas trunk pipeline system is largely dependent on the characteristics of the process of gas transportation service facilities maintenance during the operation period. The most vulnerable and complex for maintenance is the gas trunk pipeline linear portion, which is characterized by large length and inaccessibility for visual observation. Therefore, the maintenance problems have special requirements.

One of the most common maintenance methods of the gas pipeline linear portion and at the same time the most difficult one is the mechanical cleaning of the pipeline cavity by the mechanical cleaning means. The efficiency of this process is considerably dependent on the costs of gas transportation.

The complexity of the cleaning process is primarily connected with the complexity of the cleaning pig movement control along the gas pipeline route. The severe conditions of the route in some cases can lead to unplanned stoppage of the cleaning pig in the pipeline – sticking that requires long exploration as well as cutting-out of the reel and re-welding of the pipeline. Significant expenditures of time and resources lead to reduced economic efficiency of gas transportation with the help of the gas pipeline and environmental pollution.

Keywords: gas pipeline, observation, sticking of the cleaning pig.

На даний час питанням підвищення ефективності очищення газопроводів, зокрема підвищенню прохідності очисними пристроями складних ділянок траси і контролю за рухом очисного пристрою в газопроводі, приділялося мало уваги через нагальну потребу у вирішенні більш складних питань (наприклад, забезпечення надійності експлуатації газопроводів). Однак очищення має суттєве значення для процесу ефективної експлуатації газопроводів.

До газотранспортного комплексу України входить більше 35 тис. км газопроводів, 167 компресорних станцій загальною потужністю

понад 8,5 млн. кВт, та понад 1300 газорозподільчих станцій. Найбільші газопроводи поєднані у систему, до якої входять газові магістралі «Союз», «Уренгой-Помари-Ужгород» та «Прогрес» з умовним діаметром 1400 мм, що перетинають Україну від східного до західного кордонів і можуть забезпечити транзитне перекачування газу в об'ємі понад 100 млрд. м³ на рік.

За загальною протяжністю газопроводів Україна займає друге місце на континенті, а за їх щільністю (тобто співвідношенням до одиниці площі території) впевнено посідає перше місце.

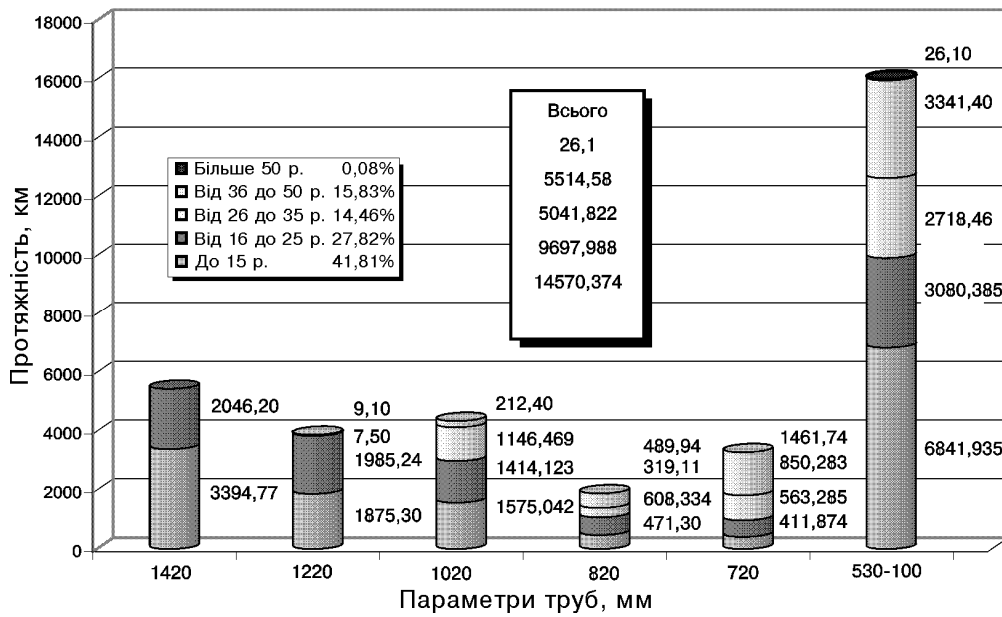


Рисунок 1 – Структура газотранспортної системи та термін експлуатації газопроводів відповідно за діаметрами і довжиною

Загальна протяжність газотранспортної системи ДП «Укртрансгаз» НАК «Нафтогаз України» досягла 34,8 тис. км, у тому числі магістральні газопроводи-відводи – 12,5 тис. км. Проектна пропускна спроможність газотранспортної системи на вході в Україну складає 292 млрд м³ на рік (800 млн м³ на добу). Загальна потужність компресорних станцій складає 5492 МВт. Число газорозподільних станцій складає 1307 одиниць, а газовимірвальних станцій – 100 одиниць.

У структурі газопроводів суттєво переважають трубопроводи великого діаметра. Так, газопроводи діаметром 1420 мм складають 15,82 %, діаметром від 1020 до 1220 мм – 23,34%; від 720 до 820 мм – 14,93 % (рис. 1) [1].

Водночас газотранспортна система має у своєму складі 59,43 % газопроводів з терміном експлуатації від 15 до 50 років, 5,8 тис. км газопроводів відпрацювали свій амортизаційний строк – 33 роки, більш третини газопроводів мають антикорозійне покриття з полімерних плівок холодного нанесення. Це вимагає щорічного виконання значних обсягів капітального ремонту та реконструкції газопроводів.

Одним з найважливіших понять, що характеризує систему з точки зору забезпечення споживачів газом, є надійність. Загальновідомо, що показники надійності залежать від терміну служби об'єкта. Для магістральних газопроводів юридично встановлено граничний ресурс експлуатації 33 роки, після закінчення якого необхідна реконструкція або капітальний ремонт для відновлення показників надійності.

Серед газотранспортних магістралей України 17,27 % експлуатуються вже понад 33 роки, а 13,66 % до вказаної границі залишилось менше 10 років. Отже, 30,33 % газопроводів від загальної їх протяжності вимагають невідкладних заходів не тільки для підвищення експлуатаційної надійності, але й забезпечення живучості.

Розвинута газотранспортна система України не вимагає на даний час збільшення її пропускної здатності шляхом будівництва нових газових магістралей. Основною проблемою є підвищення надійності існуючих газопроводів шляхом їх оптимального обслуговування та реконструкції. Тому за останні роки об'єктами капітального будівництва в газотранспортному комплексі є переважно розподільчі газопроводи, які характеризуються порівняно невеликими діаметром та довжиною.

Слід відзначити, що експлуатаційними службами ведуться роботи з діагностування стану газопроводів різнорідними методами, в тому числі з застосуванням інтелектуальних поршнів. Останні показали, що на окремих ділянках стан лінійної частини газопроводів критичний. Корозійні процеси призвели до зменшення робочої товщини стінки труб до такої міри, що подальша експлуатація газопроводів під робочим тиском є вкрай небезпечною. Для підвищення гідравлічної ефективності загальноприйнято застосовувати періодичне очищення газопроводів механічними очисними засобами. Однак, за наявності рідини в газопроводі виникає проблема внутрішньотрубної стрес-корозії, яка вимагає нових технологій ремонту лінійної частини, а також забезпечення стійкості та міцності повітряних переходів у період очищення, що вимагає додаткових досліджень і нових технічних рішень.

До механічних пристроїв, що рухаються в газопроводі під тиском газового потоку, слід віднести механічні пристрої для очищення газопроводу, засоби технічної внутрішньотрубної діагностики та пристрої для локалізації місця проведення ремонтних робіт. Всі види механічних пристроїв у відповідності до технології проведення процесу вводять в газопровід через камеру запуску пристроїв. Відтак вони рухаються вздовж газопроводу, виконуючи покла-

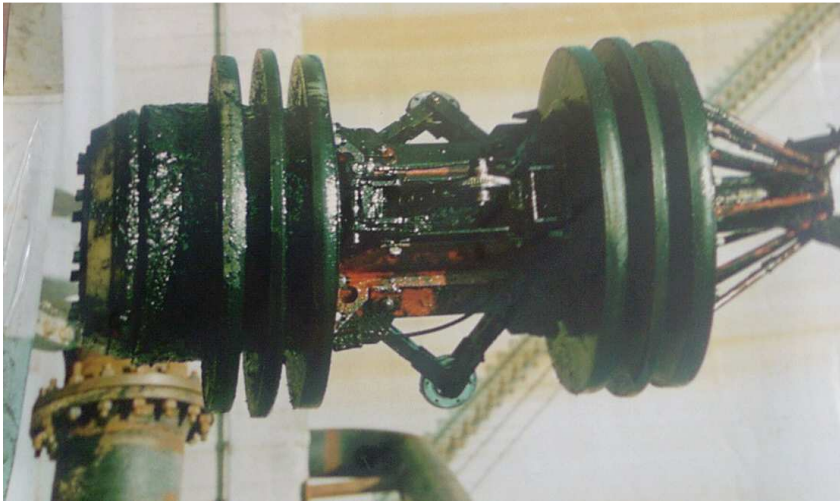


Рисунок 2 – Очисний поршень типу ОПРМ-1400 з екранами після очищення газопроводу

дені на них функції, і в кінці траси приймаються в камеру прийому пристроїв.

Механічні очисні пристрої застосовують на газопроводах практично від початку їх існування як газотранспортних систем. За призначенням їх можна поділити на дві групи [1]:

- механічні очисні пристрої для очищення газопроводу перед введенням його в експлуатацію;

- механічні очисні пристрої для очищення газопроводу в процесі його експлуатації.

Не дивлячись на те, що в обох випадках можуть бути використані одні і ті ж конструкції очисних пристроїв (або близькі за функціональною схемою), умови роботи їх в газопроводі суттєво різні. Якщо в першому випадку пристрій має завдання очистити газопровід від будівельного сміття, що є сукупністю твердих тіл непередбачуваної форми з абсолютно невідомим розподілом вздовж траси, то в другому випадку очисні пристрої повинні забезпечити, в основному, витіснення рідкої фази з газопроводу. В обох випадках пристрій повинен максимально ефективно виконати поставлену задачу і пройти трасу газопроводу без зупинок. У випадку неякісного очищення газопроводу технологічний процес пропуском очисного пристрою повторюють, що призводить до додаткових експлуатаційних витрат. При зупинці очисного пристрою в газопроводі насамперед слід визначити його застрягання, і в подальшому приймати міри для вилучення його з газопроводу. За часом процес діагностування місця зупинки пристрою часто набагато перевищує тривалість процесу вилучення пристрою з газопроводу, який найчастіше полягає у вирізанні ділянки газопроводу, на якій зупинився пристрій.

Для очищення газопроводів розроблено і широко використовується на практиці велика кількість різноманітних конструкцій очисних пристроїв. Однак кожен з них можна умовно віднести до одного з типів:

- очисні кулі;
- еластичні очисні поршні;
- очисні поршні манжетного типу.

Очисна куля – це сферична оболонка з горловиною для заповнення порожнини нестислою рідиною, в якості якої найчастіше використовують вапняне молоко або відпрацьоване масло. Після заповнення горловины куля закривається корком.

Перевагою кульових пристроїв є висока прохідність складних ділянок траси. Крім того, кульові очисні пристрої зарекомендували себе на практиці як міцні очисні засоби, що можуть використовуватись як перед введенням їх в експлуатацію, так і в процесі експлуатації газопроводу.

Очисні еластичні поршні являють собою циліндри, виготовлені з еластичного матеріалу які, рухаючись під тиском газу газопроводом, не тільки виштовхують рідинні пробки, але й витирають внутрішню поверхню труб від наведеної шорсткості. Їх діаметр складає від 1,3 до 1,5 внутрішнього діаметра газопроводу, а довжина – від 2,0 до 2,5 діаметрів. Торцеві перерізи пристрою насичують клеями для запобігання проникності рідини та газу.

Завдяки еластичності матеріалу поршні володіють високою прохідністю складних ділянок траси газопроводу, однак, характеристики міцності при цьому невисокі. На протяжних ділянках траси газопроводу часто відбувається руйнування еластичного поршня, особливо коли у внутрішній порожнині газопроводу знаходяться тверді предмети. Для підвищення міцності еластичних поршнів їх підсилюють вставками з гуми чи пінополіуретану. Однак, використовувати їх для очищення газопроводу перед введенням в експлуатацію не рекомендується.

Очисні поршні манжетного типу (ОПРМ) знайшли найбільш широке застосування завдяки високим очисним якостям. Конструктивно вони складаються з металевого корпусу, на якому розміщені еластичні гумові манжети, що виконують функції ущільнюючих елементів. Для підвищення ефективності очищення газопроводу перед ущільнюючими манжетами встановлюють екрани з пінополіуретану. В якості прикладу наведено поршень фірми «Розен», зовнішній вигляд якого наведено на рис. 2.

Особливу групу серед очисних поршнів типу ОПРМ складають поршні з самоущільнюючими манжетами. Самоущільнююча манжета виготовляється з конічною внутрішньою поверхнею, на якій сила тиску газу, яка спрямована по нормалі до поверхні, розкладається на дві складові: осьову, що рухає поршень газопроводом, і радіальну, що притискує ущільнення до стінки труби. Такі поршні мають високу прохідність і очисні якості.

Діагностичні механічні засоби, що рухаються під тиском газу газопроводом, називають інтелектуальними поршнями. Такі пристрої почали застосовуватися в 90-х роках минулого століття [2].

В 1981 році засновано компанію «Розен», яка надає послуги в галузі інспектування лінійної частини трубопроводів, очищення їх внутрішньої порожнини.

В основі роботи діагностичного обладнання лежить метод розсіювання магнітного потоку, завдяки чому можна проводити дослідження стану стінки труб газопроводу [3].

Діагностичний інтелектуальний поршень для газопроводів діаметром 1420 мм побудований на базі жорсткого корпусу діаметром 500 мм (рис. 3). В передній і задній торцевих частинах пристрою розміщені направляючі ролики, що забезпечують керований рух пристрою і ведуть відлік лінійної координати. Як ущільнюючі елементи використовуються збірні пінополіуретанові манжети, що кріпляться безпосередньо до корпусу.



Рисунок 3 – Інтелектуальний поршень

Для створення магнітного потоку використовуються циліндричні вставки з постійного магніту. Сприйняття інформації здійснюється спеціальними первинними перетворювачами сигналу, які розміщені в кільцевій касеті, що кріпиться до корпусу, кількість первинних перетворювачів в одній касеті складає 360 одиниць. На корпусі розміщено два магнітних диски і дві касети первинних перетворювачів сигналу, що дає змогу сканувати стан газопроводу практично в кожній точці поверхні труби. Загальна довжина пристрою 2900 мм, загальна маса 6000 кг.

Підвищення ефективності очищення газопроводів від рідинних скупчень досягається вирішенням двох задач:

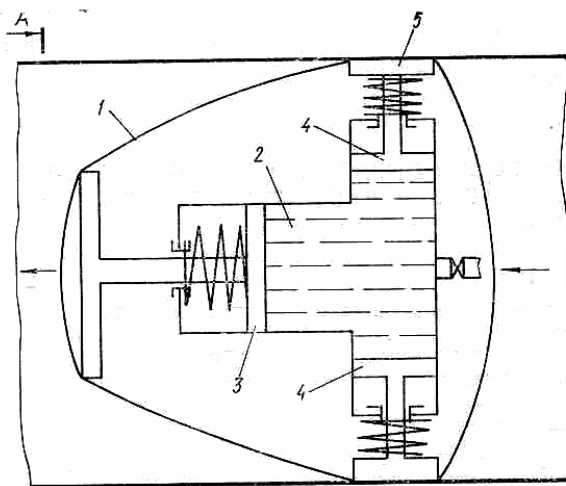
- збільшенням ступеня витиснення рідини з трубопроводу очисним пристроєм;
- забезпеченням прохідності очисним пристроєм складних ділянок траси.

Вказані задачі взаємовиключають одна одну. Для досягнення високого ступеня витис-

нення рідини з порожнини газопроводу очисний пристрій, і особливо його ущільнюючі елементи, повинні бути виготовлені пружними і твердими. З іншого боку, для досягнення високої прохідності складних ділянок траси очисний пристрій повинен бути м'яким і еластичним. Тому конструктивним вирішенням поставлених задач може бути створення конструкції очисного пристрою, яка б змінювала свої властивості в процесі очищення газопроводу.

Крім того, велика кількість рідини з рідинної пробки, що витискається очисним пристроєм, перетікає в запоршневий простір внаслідок деформації ущільнюючих елементів у результаті гідравлічного удару, який виникає при зустрічі рідинної пробки з очисним пристроєм. Скорочення таких перетоків дозволило б збільшити швидкість руху пристрою, з одного боку, і підвищити ступінь очищення, з іншого.

З метою підвищення ступеня очищення шляхом скорочення перетоків рідких забруднень в очищену порожнину при гідроударі запропоновано удосконалену конструкцію механічного пристрою (рис. 4).



1 – еластична оболонка; 2 – камера; 3 – горизонтальний поршень; 4 – радіальний поршень; 5 – ущільнюючі елементи

Рисунок 4 – Схема пристрою для очищення газопроводу

Поставлена мета досягається тим, що пристрій оснащено засобом підтискання оболонки до газопроводу, котрий являє собою сполучені підпоршневі порожнини силові гідроциліндри. При цьому вісь одного із циліндрів розташована вздовж осі очищуваного газопроводу, а осі інших розташовані перпендикулярно до неї.

Засіб для очищення внутрішньої поверхні газопроводу містить еластичну оболонку 1, всередині котрої розміщений засіб підтискання оболонки до газопроводу у вигляді камери 2, заповнений рідиною зі встановленим у ній горизонтальним поршнем 3 і сполученими з ним радіальними поршнями, на котрих розміщені ущільнюючі елементи.

Описаний засіб працює наступним чином. За рахунок транспортованого газопроводом

середовища очисний пристрій рухається й очищує внутрішню порожнину, накопичуючи поперед себе продукти очищення. У момент зустрічі його з рідкими забрудненнями горизонтальний поршень 3, приймаючи зусилля від гідравлічного удару, стискає рідину в камері 2. Ці зусилля передаються в систему радіальних поршнів 4, певним чином збільшуючи сили притиснення ущільнюючих елементів 5 до стінок очищуваного газопроводу, попереджуючи перетоки рідких забруднень за очисний пристрій в очищену ділянку газопроводу. Скорочення перетоків рідких забруднень за очисний пристрій підвищить якість очищення газопроводів, зменшить коефіцієнт гідравлічного опору, що дасть змогу скоротити число очисних операцій від 20% до 30%. Величина перетоків рідини через рухомих границю значною мірою залежить від сили тертя ущільнюючих елементів до стінок газопроводу. Очевидно, що зменшення сили тертя ущільнень внаслідок їх зношування при русі очисного пристрою призведе до зниження ступеня очищення.

Метою іншої конструкції очисного пристрою є підвищення якості очищення за рахунок компенсації зносу еластичних елементів під час роботи. Це досягається тим, що пристрій оснащено розміщеною всередині корпусу підпружиненою камерою з робочим агентом і отвором зі зворотними клапанами, число яких відповідає числу еластичних елементів, причому корпус має отвори, розташовані відносно отворів еластичних кільцевих елементів і розміщених в них клапанах, а камера встановлена з можливістю переміщення вздовж корпусу для суміщення її отворів з отворами корпусу.

Важливим питанням проведення процесу очищення газопроводу є прохідність очисним пристроєм складних ділянок траси, зокрема місцевих звужень. Для досягнення цієї мети очисний пристрій повинен бути еластичним. Однак, в такому випадку він втрачає свої очисні якості. Тому необхідно конструктивно вирішити задачу підвищення ступеня очищення газопроводу при надійній прохідності місцевих звужень (наприклад, нерівнопрохідних кранів) на газопроводі.

Поставлена мета – підвищення надійності пристрою при очищенні газопроводів з місцевим звуженням досягається тим, що в пристрої, який складається з двох кульових оболонок, з'єднаних перемичкою зі зворотним клапаном двосторонньої дії, сумарний об'єм рідини в оболонках складає

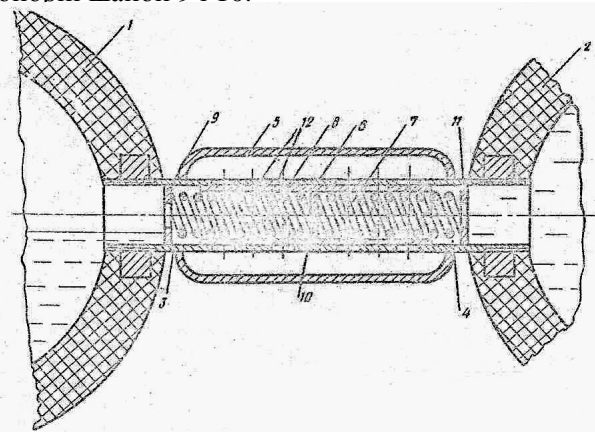
$$V_{\Sigma} = \frac{4}{3}\pi \cdot \pi^3 + \frac{4}{3}\pi \cdot r^2 R, \quad (1)$$

де r – мінімальний радіус газопроводу.

R – максимальний радіус газопроводу;

Пристрій (рис. 5) містить очисний елемент, виконаний у вигляді еластичних камер 1 і 2, наповнених рідиною, сумарний об'єм якої визначається за вищенаведеною формулою. Камери з'єднані між собою перемичкою 3 зі зворотнім клапаном 4, який виконаний у вигляді клапана двосторонньої дії і містить герметич-

ний корпус 5, втулку 6, встановлену в перемичці зі здатністю переміщення, пружини 7 і 8 і опорні шайби 9 і 10.



1, 2 – камера; 3 – перемичка; 4 – зворотній клапан; 5 – герметичний корпус; 6 – втулка; 7, 8 – пружина; 9, 10 – опорні шайби; 11, 12 – отвори

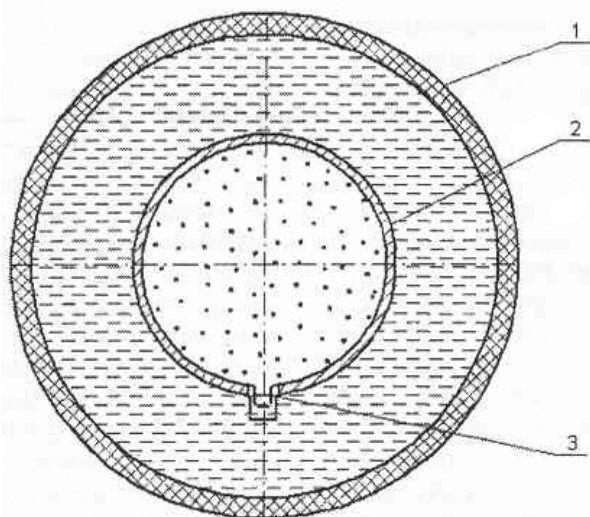
Рисунок 5 – Пристрій для очищення газопроводу з місцевими звуженнями

Втулка 6 і перемичка 3 виконані зі взаємозміщеними отворами. Пристрій працює наступним чином.

При зустрічі пристрою, що рухається під тиском перекачуваного середовища, із забрудненнями у вигляді рідких скупчень тиск на камеру 1 (другу по ходу руху пристрою) збільшується, що спричиняє стискання пружини 8 до сполучення отворів 12 перемички 3 і втулки 6 і перетікання частини рідини в камеру 2, що попереду. При цьому тиск в камері 2 збільшується зумовлюючи стискання пружини 7 і зміщення отворів 11. Це призводить до перетікання рідини із камери 2 до камери 1, що створює умови для подолання камерою 2 місцевого звуження. При проходженні через звуження камери 1 клапан 4 зміщується в інший бік.

Недоліком наведеної конструкції очисного пристрою є можливість руйнування при проходженні місцевого звуження під дією великих осьових зусиль на перемичку. Крім того, пристрій даної конструкції не здатний проходити ділянки різного діаметра складного газопроводу.

Вдосконалення конструкції очисного пристрою під час проходження його дільницею постійного діаметра і при вході в дільницю меншого діаметра дає змогу забезпечити проходження очисного пристрою по газопроводу зі складною геометричною конфігурацією без перешкод по всій довжині із високим ступенем очищення. Поставлена задача вирішується тим, що у пристрої для очищення внутрішньої порожнини газопроводу, який включає дві порожнисті оболонки та зворотній клапан двосторонньої дії, друга оболонка виконана жорсткою і розміщена всередині еластичної, сполучена з нею за допомогою зворотного клапана двосторонньої дії (рис. 6). При цьому порожнина еластичної оболонки заповнена нестискуваною рідиною, а порожнина жорсткої оболонки – стискуваним середовищем (газом).



1 – еластична оболонка; 2 – жорстка оболонка;
3 – клапан

Рисунок 6 – Пристрій для очищення газопроводу змінного перерізу

Виконання пристрою у вигляді двох оболонок, одна з яких є жорсткою, а друга еластичною і розміщених одна всередині іншої, робить конструкцію компактною і маневровою.

Заповнення еластичної оболонки нестискуваною рідиною, а порожнини жорсткої – стискуваним середовищем, при переході до іншого діаметра створює різницю тисків, завдяки чому забезпечуються умови для проходження пристроєм ділянок трубопроводу з різною конфігурації.

Зворотній клапан двосторонньої дії, що сполучає обидві камери, дає пристрою можливість самоприсосуватись і адаптуватись до зміни діаметра і геометричної конфігурації газопроводу.

Нестискувана рідина, що знаходиться в порожнині між жорсткою і гумовою оболонками забезпечує пружні властивості пристрою. Стискуване середовище в порожнині жорсткої оболонки забезпечує еластичні властивості пристрою при заданому підвищенні тиску газу на нього.

Пристрій працює наступним чином. При зменшенні діаметра газопроводу збільшується тиск на еластичну оболонку 1 і передається рідині, яка її заповнює. За рахунок різниці тисків нестискуваної рідини і середовищем, що знаходиться в жорсткій оболонці 2, зворотний клапан 3 двосторонньої дії, відкривається, і частина рідини з еластичної оболонки перетікає в порожнину жорсткої, стискаючи газове середовище і створюючи умови для проходження пристроєм ділянки меншого діаметра.

Існуючі методи контролю за рухом механічних пристроїв газопроводом у ході виконання технологічних робіт можна поділити на наступні групи:

- постові методи;
- ультразвукові методи;
- газодинамічні методи.

До постових методів відносяться методи контролю за проходженням пристроєм певної точки траси газопроводу, в якій розміщено спостережний пост. Конструктивно спостережний пост, що встановлюється на газопроводі з метою контролю за проходженням механічного пристрою, може бути виконаний у вигляді механічного, гідравлічного або електромагнітного первинного перетворювача. Механічні і гідравлічні первинні перетворювачі вимагають вирізування в тілі труби вікна, через яке в порожнину газопроводу опускається важіль, з'єднаний механічним чи гідравлічним способом з системою перетворення і передачі інформації про момент проходження пристрою. Електромагнітний перетворювач фіксує електрорушійну силу індукції, яка виникає при проходженні пристрою з вмонтованим постійним магнітом через розміщений в трубі соленоїд.

Слід відмітити, що встановлення постових первинних перетворювачів на газопроводі вимагає вирізування вікна в тілі труби, що суттєво знижує надійність експлуатації газотранспортної магістралі. Тому такі пости встановлюють на газопроводі на значних відстанях по трасі, що не дозволяє навіть приблизно визначити місце зупинки механічного пристрою в разі його застрягання.

Ультразвукові методи передбачають застосування спеціального пристрою, який надсилає ультразвукові сигнали в газопровід і сприймає їх відбиту хвилю. Цей метод надто дорогий і може бути застосований за наявності спеціального приладу, розрахованого на даний діаметр газопроводу. Тому його використання для діагностування місця зупинки механічного пристрою в газопроводах місцевого значення нерациональне.

Газодинамічні методи передбачають використання законів руху газового потоку і реального стисненого газу для визначення місця зупинки пристрою в газопроводі. Якщо зупинка пристрою призвела до повного закупорювання газопроводу, яка характеризується відсутністю перетоків газу через границю розділу, то основним законом, що використовується для діагностування місця зупинки, є рівняння газового стану. Різні модифікації рівняння дозволяють достатньо точно визначити місце границі розділу. Однак, повна закупорка газопроводу при застряганні механічного засобу трапляється дуже рідко. Навіть якщо вслід за пристроєм, що зупинився, посилаються в газопровід ще додаткові пристрої, домогтися повного закупорювання не завжди вдається.

У випадку неповного закупорювання газопроводу механічним пристроєм, що зупинився, застосування газодинамічних методів не приносить бажаного результату. В першу чергу, це пояснюється відсутністю інформації про величину перетікання через границю розділу навіть у випадку, якщо вони стали в часі. В реальному випадку величина перетікання залежить від тиску в запоршневому просторі і тому змінюється в часі. Крім того, неповні відомості про величину гідравлічного опору газопроводу не до-

зволяє використати газодинамічні методи на практиці. Тому найбільш прийнятними для практичної реалізації слід вважати методи імпульсного впливу на газовий потік у газопроводі. Для їх розробки і реалізації необхідні дослідження характеру розповсюдження пружних хвиль в рухомому газоподібному середовищі.

Коливання, збуджені в будь-якій точці середовища, розповсюджуються в ньому із кінцевою швидкістю, котра залежить від властивостей середовища, передаючись від одної точки середовища до іншої. Чим далі розміщена частина середовища від джерела коливань, тим пізніше вона почне коливатися. Інакше кажучи, фази коливань часток середовища і джерела тим більше відрізняються одна від одної, чим більшою є ця віддаль. При вивченні процесу розповсюдження коливань не враховується дискретний (молекулярний) стан середовища, що, в свою чергу, розглядається як суцільне, тобто неперервно розподілене в просторі й таке, якому притаманні пружні властивості.

Усі існуючі в природі та техніці хвилі поділяють так: хвилі на поверхні рідини, пружні та електромагнітні. Пружні хвилі бувають повздовжніми і поперечними. У повздовжніх хвилях частки середовища коливаються в напрямку розповсюдження хвилі, в поперечних – у площинах, перпендикулярних напрямку розповсюдження хвилі.

Повздовжні хвилі можуть розповсюджуватися в середовищах, в яких виникають пружні сили при деформації стискування і розтягування, тобто твердих, рідких і газоподібних тілах. Поперечні хвилі розповсюджуються в середовищі, в котрому виникають пружні сили при деформації зсуву, тобто фактично лише у твердих тілах; в рідинах та газах виникають тільки повздовжні хвилі, а в твердих тілах – як повздовжні, так і поперечні.

Якщо розглядати хвильовий процес детальніше, то стає зрозумілим, що коливаються не лише частки, розташовані вздовж осі x , а коливається сукупність часток, розташованих у певному об'ємі, тобто хвиля, розповсюджуючись від джерела коливання, охоплює все нові та нові області простору. Геометричне місце точок, до яких доходять коливання до моменту часу t , називають хвильовим фронтом а геометричне місце точок, які коливаються в однаковій фазі, називають хвильовою поверхнею. Хвильових поверхонь можна навести незчисленну кількість, а хвильовий фронт у кожний момент часу – один. Хвильовий фронт також є хвильовою поверхнею. Хвильові поверхні можуть бути будь-якої форми, а в найпростішому випадку вони представляють собою сукупність площин, паралельних одна одній, чи сукупність концентричних сфер. Відповідно хвиля називається сферичною.

Біжучими хвилями називаються хвилі, котрі переносять у просторі енергію. Перенесення енергії в хвилях кількісно характеризується вектором щільності потоку енергії.

Для виведення рівняння біжучої хвилі – залежності зміщення коливаючих частинок від

координати та часу – розглянемо плоску хвилю, передбачаючи, що коливання мають гармонічний характер, а вісь x збігається з напрямком розповсюдження хвиль. У даному випадку хвильові поверхні перпендикулярні до осі x , а оскільки всі точки хвильової поверхні коливаються однаково, то зміщення залежатиме лише від x і t .

Розглянемо деяку частку середовища, яка знаходиться на віддалі x від джерела коливання. Якщо коливання точок, що лежать у площині $x = 0$, описуються функцією $\xi(0, t) = A \cos \omega t$, то частка середовища коливається за тим самим законом, але її коливання будуть відставати у часі від коливання джерела на τ , оскільки для проходження хвилею віддалі x потрібен час $\tau = x/v$, де v – швидкість розповсюдження хвилі. Тоді рівняння коливання часток, які лежать у площині x , має вигляд

$$\xi(x, t) = A \cos \omega(1 - x/v). \quad (2)$$

Звідки випливає, що $\xi(x, t)$ є не тільки періодичною функцією часу, але і періодичною функцією координати x . Рівняння (2) є рівнянням біжучої хвилі. Якщо плоска хвиля розповсюджується в протилежному напрямку, то

$$\xi(x, t) = A \cos \omega(1 + x/v).$$

У загальному випадку рівняння плоскої хвилі, що розповсюджується вздовж позитивного напрямку осі x у середовищі, яке не поглинає енергію, має вигляд

$$\xi(x, t) = A \cos[\omega(1 + x/v) + \varphi_0], \quad (3)$$

де $A = const$ – амплітуда хвилі;

ω – циклічна частота хвилі;

φ_0 – початкова фаза коливання, котра визначається в загальному випадку вибором початку відліку x і t ;

$[\omega(1 + x/v) + \varphi_0]$ – фаза плоскої хвилі.

Для характеристики хвиль використовується хвильове число

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi}{vT} = \frac{\omega}{v}. \quad (4)$$

Ураховуючи (4), рівнянню (3) можна надати вигляду

$$\xi(x, t) = A \cos(\omega t - kx + \varphi_0). \quad (5)$$

Рівняння хвилі, яка розповсюджується вздовж від'ємного напрямку осі x , відрізняється від (5) тільки знаком члена kx .

Припустимо, що при хвильовому процесі фаза є постійною, тобто

$$\omega(1 - x/v) + \varphi_0 = const. \quad (6)$$

Продиференціювавши вираз (6) і скоротивши на ω , отримаємо $dt - \frac{1}{v} dx = 0$, звідки

$$\frac{dx}{dt} = v. \quad (7)$$

Відповідно, швидкість v розповсюдження хвилі у рівнянні (7) є нічим іншим, як швидкістю переміщення фази хвилі, і її називають фазовою швидкістю.

Якщо фазова швидкість хвиль у середовищі залежить від їх частоти, то це явище називають дисперсією хвиль, а середовище, в котрому спостерігається дисперсія, називається диспергуючим середовищем.

Розповсюдження хвиль в однорідному ізо-тропному середовищі в загальному випадку описується хвильовим рівнянням – диференціальним рівнянням у часткових похідних.

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \xi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \xi}{\partial z^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2},$$

або

$$\Delta \xi = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2}, \quad (8)$$

де v – фазова швидкість;

$$\Delta = \frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \xi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \xi}{\partial z^2} \text{ – оператор Лапласа.}$$

Розв'язком рівняння (8) є рівняння будь-якої хвилі.

Якщо середовище, в якому розповсюджується одночасно кілька хвиль, лінійне, тобто його властивості не змінюються під впливом збурень, які створюються хвилею, то до них можна застосувати принцип суперпозиції (накладання) хвиль: при розповсюдженні в лінійному середовищі кількох хвиль кожна з них розповсюджується так, ніби інші хвилі відсутні, а результуюче зміщення часток середовища в будь-який момент часу рівне геометричній сумі зміщень, які отримують частки, беручи участь в кожному зі складових хвильових процесів.

Виходячи з принципу суперпозиції і розкладу Фур'є, будь-яка хвиля може бути представлена у вигляді суми гармонічних хвиль, а саме, у вигляді хвильового пакету чи групи хвиль. Хвильовим пакетом називається суперпозиція хвиль, які мало відрізняються одна від одної за частотою та займають у кожний момент часу обмежену ділянку простору.

За швидкість розповсюдження цієї негармонічної хвилі (хвильового пакету) приймають швидкість переміщення максимальної амплітуди хвилі, розглядаючи тим самим максимум як центр хвильового пакету. За умови, що $td\omega - xdk = const$, матимемо

$$\frac{dx}{dt} = \frac{d\omega}{dk} = u. \quad (9)$$

Швидкість u є груповою швидкістю. Її можна визначити як швидкість руху групи хвиль, які утворюють у кожний момент часу локалізований у просторі хвильовий пакет.

$$\text{Розглянемо зв'язок між груповою } u = \frac{d\omega}{dk}$$

і фазовою $u = \omega/k$ швидкостями. Враховуючи, що $\lambda = 2\pi/k$, отримаємо

$$\begin{aligned} u &= \frac{d\omega}{dk} = \frac{d(vk)}{dk} = v + k \frac{dv}{dk} = \\ &= v + k \left(\frac{dv}{d\lambda} \frac{d\lambda}{dk} \right) = v + k \left(-\frac{\lambda}{k} \right) \frac{dv}{d\lambda} \end{aligned}$$

або

$$u = v - \lambda \frac{dv}{d\lambda}. \quad (10)$$

Із формули (10) випливає, що групова швидкість (u) може бути як менше, так і більше від фазової швидкості (v) і не залежить від знаку $\frac{dv}{d\lambda}$. У недиспергуючому середовищі

$\frac{dv}{d\lambda} = 0$ і групова швидкість збігається з фазовою.

Поняття групової швидкості дуже важливе, оскільки саме вона фігурує при вимірюванні дальності в радіолокації, в системах управління космічними об'єктами тощо. У теорії відносності доводиться, що групова швидкість $u \leq c$, у той час як для фазової швидкості обмежень не існує.

Узгоджене протікання у часі та просторі кількох коливних чи хвильових процесів пов'язують із поняттям когерентності. Хвилі називаються когерентними, якщо відмінність їх фаз залишається постійною в часі. Очевидно, що когерентними можуть бути лише хвилі, які мають однакою частоту. При накладанні в просторі двох (чи кількох) когерентних хвиль у різних його точках відбувається посилення чи послаблення результуючої хвилі в залежності від співвідношень між фазами цих хвиль. Це явище називається інтерференцією хвиль.

Особливим випадком інтерференції є стоячі хвилі – це хвилі, які утворюються при накладанні двох біжучих хвиль, котрі розповсюджуються назустріч одна одній з однаковими частотами й амплітудами.

На відміну від біжучої хвилі, всі точки котрої здійснюють коливання з однаковою амплітудою, але із запізненням по фазі, у біжучій хвилі фаза коливань залежить від координати x точки, що розглядається, всі точки стоячої хвилі між двома вузлами коливаються з різними амплітудами, але з однаковими фазами.

Утворення стоячих хвиль спостерігають при інтерференції біжучої та відображеної хвилі. Наприклад, якщо кінець шнура закріпити нерухомо, то відбита в місці закріплення шнура хвиля буде інтерферувати з біжучою хвилею і утворює стоячу хвилю. На границі, де проходить відображення хвилі, в даному випадку утворюється вузол. Чи буде на границі відбиття вузол чи пучковість, залежить від співвідношення густин середовищ. Якщо середовище, від якого відбувається відбиття, менш густе, то в місці відбиття утворюється пучковість, а якщо більш щільне – вузол. Утворення вузла пов'язане з тим, що хвиля, відбиваючись від більш щільного середовища, змінює фазу на протилежну й біля кордону проходить сумування коливань протилежних напрямків, у результаті чого отримується вузол. Якщо ж хвиля відбивається від менш щільного середовища, то зміна фази не відбувається й біля границі коли-

вання сумують з однаковими фазами – утворюється пучковість.

Якщо розглядати біжучу хвилю, то в напрямку її розповсюдження переноситься енергія коливального руху. У випадку стоячої хвилі переносу енергії немає, оскільки падаюча і відбита хвиля однакової амплітуди несуть однако-ву енергію в протилежних напрямках. Тому повна енергія результуючої стоячої хвилі, яка знаходиться між вузловими точками, залишається постійною. Тільки в межах відстаней, рівних половині довжини хвилі, відбуваються взаємні перетворення кінетичної енергії в потенційну і навпаки.

Звуковими (чи акустичними) хвилями називаються розповсюджені в середовищі пружні хвилі, частота яких дорівнює в межах від 16 до 20000 Гц. Хвилі зазначених частот, діючи на слуховий апарат людини, викликають відчуття звуку. Хвилі з $\nu < 16$ Гц (інфразвукові) та $\nu > 20$ кГц (ультразвукові) органами слуху людини не сприймаються.

Джерелом звуку може бути будь-яке тіло в пружному середовищі зі звуковою частотою (наприклад, у струнних інструментах джерелом звуку є струна, з'єднана з корпусом інструменту).

Здійснюючи коливання, тіло викликає коливання прилягаючих до нього часток середовища із такою ж частотою. Стан коливного руху послідовно передається до все більш віддалених від тіла часток середовища, тобто в середовищі розповсюджується хвиля з частотою коливань, рівною частоті її джерела, і з певною швидкістю, котра залежить від щільності і пружних властивостей середовища. Швидкість розповсюдження звукових хвиль у газах визначають за формулою

$$\nu = \sqrt{\frac{R \cdot T \cdot k}{M}}, \quad (11)$$

де R – універсальна газова стала;

T – температура газу;

$k = C_p / C_v$ – відношення молярних тепло-

ємностей газу при сталих тиску та об'ємі.

M – молярна маса,

Із формули (11) випливає, що швидкість звуку в газі не залежить від тиску p газу, але зростає з підвищенням температури. Чим більша молярна маса газу, тим менша в ньому швидкість звуку. Наприклад, при $T=273$ К швидкість звуку у повітрі ($M=29$ кг/моль) $\nu=331$ м/с, у водні ($M=2$ кг/моль) $\nu=1260$ м/с.

При розповсюдженні звуку необхідно враховувати ряд факторів, а саме молекулярну структуру газового середовища, явища переломлювання і відбиття звуку на границі двох середовищ. Окрім того, будь-яке реальне середовище має в'язкість, тому спостерігається зату-хання звуку та зменшення його амплітуди і, відповідно, інтенсивності звукової хвилі по мірі її розповсюдження. Затухання звуку зумовлено значною мірою його поглинанням в середовищі, пов'язаним із необерненим переходом зву-

кової енергії в інші форми енергії (в основному в теплову).

Аналіз літературних джерел та досвід проведення очищення, методів контролю за рухом очисних пристроїв в газопроводах показав, що для підвищення ефективності очищення, зокрема підвищення прохідності механічних засобів і ліквідації аварій в випадку їх застрягання повинні бути вирішені наступні задачі:

- розробка конструкцій механічних засобів очищення газопроводів, які б володіли прохідністю на складних ділянках траси;

- для підвищення якості очищення необхідно забезпечити високий ступінь притискання ущільнюючих елементів до внутрішніх стінок газопроводу;

- конструкція механічного пристрою повинна змінювати свої властивості.

Література

1 Трубопровідний транспорт газу / [М. П. Ковалко, В. Я. Грудз, В. Б. Михалків та ін.] – Київ : Арена ЕКО, 2002. – 650 с.

2 Андронов А. А. Теория колебаний / А. А. Андронов, А. А. Витт, С. Э. Хайкин – М.: Физматгиз, 1959. – 427 с.

3 Галиуллин З. Т. Вопросы физического моделирования нестационарных течений газа в магистральных газопроводах с учетом влияния инерционных сил и зон гидравлического сопротивления. Повышение надежности газоснабжения / З. Т. Галиуллин, И. Е. Ходанович, В. В. Девичев // Труды ВНИИГАЗ, 1976. – С. 7-16.

Стаття надійшла до редакційної колегії
11.08.14

Рекомендована до друку
професором Грудзом В.Я.
(ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ)
професором Говдяком Р.М.
(ТОВ «ІК Машекспорт», м. Київ)