

622,691.4(043)  
Т35

**Івано-Франківський національний технічний університет  
нафти і газу**



**ТЕРЕФЕНКО Роман Михайлович**

УДК 622.692.4 (043)

Т35

**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ МЕХАНІЧНИХ  
ОЧИСНИХ ПРИСТРОЇВ В ГАЗОПРОВОДАХ**

Спеціальність 05.15.13 – Трубопровідний транспорт, нафтогазосховища

**АВТОРЕФЕРАТ**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

м Івано-Франківськ – 2010

Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Івано-Франківському національному технічному університеті нафти і газу Міністерства освіти і науки України



**Науковий керівник:** доктор технічних наук, професор  
**Грудз Володимир Ярославович**  
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, завідувач кафедри спорудження та ремонту газонафтопроводів і газонафтосховищ

**Офіційні опоненти:**

доктор технічних наук, професор **Середюк Марія Дмитрівна**, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, завідувач кафедри транспорту і зберігання нафти і газу, (м. Івано-Франківськ).

кандидат технічних наук **Братах Михайло Іванович**, Український науково-дослідний інститут природних газів (УкрНДГаз), старший науковий співробітник (Україна)

Захист в спеціалі: націонал 76019, У

З дисерт Івано-Ф за адрес

Автореф

Вчений вченої р кандида

і газу 5.

Д.



## ГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність проблеми.** Ефективна експлуатація газопроводів у сучасних умовах передбачає використання механічних пристроїв, що рухаються в трубах під тиском газу. До таких пристроїв відносяться засоби очистки, призначені для витіснення забруднень із порожнини газопроводу, інтелектуальні поршні, призначені для діагностування стану труб, засоби локалізації аварійних ділянок для проведення ремонтних робіт. Основним завданням, що ставиться до застосування того чи іншого механічного пристрою, є підвищення ефективності його роботи за прямим призначенням. Однак, крім вказаної мети, до кожного з видів пристроїв ставиться задача подолання складних ділянок траси газопроводу. Непередбачена вимушена зупинка механічного пристрою в газопроводі призводить до його аварійної зупинки і припинення подачі газу споживачам. Слід зауважити, що внаслідок великої протяжності газопроводу аварійна зупинка механічного пристрою вимагає тривалого проміжку часу на пошуки місця зупинки і ліквідації аварійної ситуації. Тому забезпечення ефективності використання механічних пристроїв у газопроводах і оперативна ліквідація аварійної ситуації у випадку їх застрягання на даний час є актуальною задачею загальної проблеми підвищення надійності трубопровідного транспорту газу.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота використовувалась в рамках програми "Нафта і газ України до 2010 року" та госпдоговірної наукової теми № 28/07 "Розробка стратегій раціонального обслуговування об'єктів газотранспортних комплексів в блочно-комплектному виконанні" (2007 р.).

**Мета і задачі дослідження.** Метою дисертаційної роботи є підвищення ефективності використання механічних пристроїв у газопроводах і забезпечення оперативного ліквідування аварій у випадку їх застрягання.

Вказана мета досягається шляхом реалізації наступних задач:

- статистичні дослідження частоти виникнення аварійних ситуацій, пов'язаних з зупинкою механічних пристроїв у газопроводі;
- дослідження нестационарних газодинамічних процесів газопроводів викликаних зупинкою механічного пристрою;
- розробка і дослідження імпульсно-хвильового методу пошуку механічного пристрою в газопроводі;
- експериментальні й аналітичні дослідження запропонованого методу та оцінка точності.

**Об'єкт дослідження.** Механічні пристрої, що рухаються в газопроводі під тиском газу.

**Предмет дослідження.** Невимушені випадкові зупинки механічних пристроїв в газопроводах.

**Методи дослідження.** Аналітичні методи побудови і реалізації математичних моделей нестационарних процесів в газопроводах при русі і зупинці механічних пристроїв, експериментальні методи оцінки точності запропонованого імпульсно-хвильового методу визначення координати

пристрою, що зупинився, аналітичні дослідження аварійних ситуацій у газопроводах, викликаних зупинкою механічних пристроїв.

**Положення, що захищаються:** закономірності газодинамічних процесів в газопроводах, викликаних зупинкою механічних пристроїв.

**Наукова новизна одержаних результатів.** Наукова новизна одержаних результатів полягає в наступному:

- запропоновано нову конструкцію очисного пристрою для газопроводів зі складними трасовими умовами;
- вперше дано оцінку імовірності зупинки механічних пристроїв у газопроводах, аналізу причин застрягання і тривалості ліквідації наслідків аварії;
- на основі аналітичних досліджень вперше показано неможливість визначення місця застрягання механічного пристрою в газопроводі на основі аналізу нестационарного газодинамічного процесу, викликаного зупинкою;
- запропоновано новий імпульсно-хвильовий метод визначення координати механічного пристрою, що зупинився в газопроводі, і проведено його дослідження.

**Практичне значення результатів дослідження.** Запропонована нова конструкція очисного пристрою дозволить підвищити ефективність очистки газопроводів в складних трасових умовах.

Новий метод імпульсно-хвильового пошуку місця зупинки механічних пристроїв у газопроводах дозволяє суттєво скоротити час на ліквідацію аварійних ситуацій, пов'язаних з їх застряганням.

**Особистий внесок здобувача.** Основні положення та результати дисертаційної роботи одержані автором самостійно. Зокрема, в опублікованих роботах автором особисто:

- проведено статистичний аналіз аварійних ситуацій у газопроводах, викликаних зупинкою механічних пристроїв [1,6];
- розроблено математичну модель і проведено дослідження нестационарних газодинамічних процесів при зупинці механічного пристрою в газопроводі [7,5];
- запропоновано імпульсно-хвильовий метод пошуку місця зупинки механічного пристрою в газопроводі і проведено його дослідження [1,3];
- розроблено нову конструкцію очисного пристрою для газопроводів зі складними трасовими умовами [4].

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати дисертації доповідались і обговорювались на :

- V науково-технічній конференції “Організація неруйнівного контролю якості продукції в промисловості” (Єгипет, 2007 р.);
- Міжнародній науково-технічній конференції “Ресурсозберігаючі технології в нафтогазовій енергетиці” (Івано-Франківськ, 2007 р.);

- Нараді фахівців НАК “Нафтогаз” України та ВАТ “Газпром” з питань науково-технічного співробітництва в галузі транспортування газу” (Яремче, 2008 р.).

В повному обсязі результати досліджень доповідались і обговорювались на засіданні кафедри спорудження та ремонту газонафтопроводів і газонафтохосовищ та науковому семінарі факультету нафтогазопроводів в Івано-Франківському національному технічному університеті нафти і газу (м.Івано-Франківськ, 2008 р.).

**Публікації.** За темою дисертації опубліковано 7 наукових праць, з них 3 у фахових наукових виданнях і один патент на винахід.

**Структура та обсяг роботи.** Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, підсумкових висновків, списку використаних джерел, який налічує 108 найменування. Основний зміст роботи викладено на 159 сторінках машинописного тексту.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У першому розділі наведено аналіз розвитку газотранспортної системи України, зокрема процесів очистки магістральних газопроводів перед введенням в експлуатацію та в процесі експлуатації, а також дана характеристика механічних пристроїв, що рухаються в газопроводах.

Одним із найбільш поширених методів обслуговування лінійної частини газопроводу і в той же час найбільш складним є проведення очистки порожнини трубопроводу механічними засобами очистки. Від ефективності даного процесу суттєво залежать затрати на транспорт газу. Складні умови траси в ряді випадків можуть призвести до непланової зупинки очисного пристрою в газопроводі – застрягання, що вимагає тривалих пошукових та ремонтних робіт.

На даний час питанням підвищення ефективності очистки газопроводів, зокрема підвищенню прохідності очисними пристроями складних ділянок траси і контролю за рухом очисного пристрою в газопроводі приділялося мало уваги в зв'язку з нагальною потребою вирішення більш суттєвих питань (наприклад, забезпечення надійності експлуатації газопроводів). Однак, вказані задачі мають суттєве значення для процесу ефективної експлуатації газопроводів.

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 в останні роки об'єктами капітального будівництва в газотранспортному комплексі є переважно розподільчі газопроводи, які характеризуються порівнянно невеликими діаметром та довжиною. Тенденції розвитку газотранспортної системи України подано в таблиці 1.

До механічних пристроїв, що рухаються в газопроводі під тиском газового потоку, слід віднести механічні пристрої для очистки газопроводу,

засоби технічної внутрішньотрубно́ї діагностики та пристрої для локалізації місця проведення ремонтних робіт.

Таблиця 1

Збільшення протяжності (у % від теперішнього стану) газотранспортної системи України по діаметрах труб

Період	DN1000-1400	DN500-800	DN200-400	DN<200
1970-1980	57	6	16	21
1980-1990	19	68	9	4
1990-2000	14	24	37	25
2000-2005	8	2	38	52

Механічні очисні пристрої за призначенням можна розділити на дві групи:

- механічні очисні пристрої для очистки газопроводу перед введенням його в експлуатацію;
- механічні очисні пристрої для очистки газопроводу в процесі його експлуатації.

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

Для проведення очисток газопроводів розроблено і широко використовується на практиці велика кількість різноманітних конструкцій очисних пристроїв. Однак кожен з них можна умовно віднести до одного з наступних типів: очисні кулі; еластичні очисні поршні; очисні поршні манжетного типу.

Для досягнення високого ступеня витіснення рідини з порожнини газопроводу очисний пристрій, і особливо його ущільнюючі елементи, повинні бути виготовлені пружними. З іншого боку для досягнення високої прохідності складних ділянок траси очисний пристрій повинен бути еластичним. Тому конструктивним вирішенням поставлених задач може бути створення

конструкції очисного пристрою, яка б змінювала свої властивості в процесі очистки газопроводу

З метою підвищення ступеня очистки шляхом скорочення перетоків рідких забруднень в очищену порожнину при високій прохідності складних ділянок траси запропоновано конструкцію механічного пристрою, схема якої приведена на рис. 1.

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

Внаслідок заповнення еластичної оболонки нестискуваною рідиною, а порожнини жорсткої – пружним середовищем, при переході до іншого діаметра створюється різниця тисків, завдяки чому забезпечуються умови для проходження пристроєм ділянок трубопроводу з різної конфігурації.

Існуючі методи контролю за рухом механічних пристроїв по газопроводу в процесі виконання технологічного завдання можна розділити на постові, ультразвукові та газодинамічні.

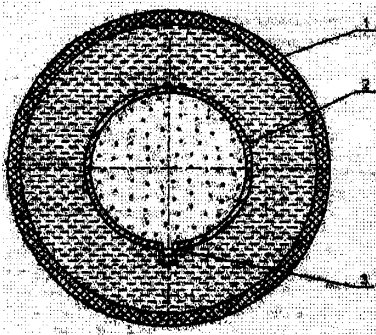


Рис. 1. Пристрій для очистки газопроводу:

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

До постових методів відносяться методи контролю проходження пристроєм певної точки траси газопроводу, в якій розміщено спостережний пост. Ультразвукові методи передбачають застосування спеціального пристрою, який посилає ультразвукові сигнали в трубопровід і сприймає їх відбиту хвилю. Газодинамічні методи передбачають використання законів руху газового потоку і реально стисненого газу для визначення місця зупинки пристрою в газопроводі. Якщо зупинка пристрою призвела до повної закупорки газопроводу, яка характеризується відсутністю перетоків газу через границю розділу, то основним законом, що використовується для діагностики місця зупинки, є рівняння газового стану. Однак, повна закупорка газопроводу при застряганні механічного засобу зустрічається дуже рідко.

У випадку неповної закупорки трубопроводу механічним пристроєм, що зупинився, застосування газодинамічних методів не приносить бажаного результату. Найперше це пояснюється відсутністю інформації про величину перетоків через границю розділу навіть у випадку, якщо вони стали в часі. Тому найбільш прийнятними для практичної реалізації слід вважати методи імпульсного впливу на газовий потік в трубопроводі.

Другий розділ присвячено дослідженням застрягання очисних пристроїв у газопроводі і газодинамічних процесів, викликаних їх зупинкою.

Рух механічного пристрою по газопроводу призводить до нестационарності процесу газодинаміки газового потоку в трубопроводі, характер якого, в свою чергу, впливає на динаміку руху пристрою. Випадкова зупинка пристрою в газопроводі вносить нові збурення в газодинамічний процес, що призводить до зміни характеру нестационарності.

Дослідженням нестационарних процесів в газопроводах присвячено велику кількість наукових праць вітчизняних та зарубіжних вчених. Серед них слід відзначити фундаментальні праці Чарного І.А., що стосуються загальних моделей нестационарної течії газу в трубах, лінеаризації рівнянь та постановки красної задачі. В дослідженнях Галіулліна З.Т., Грудза В.Я., Жидкової М.О., Мірзанджанзаде М.А., Щербакова С.Г., Яковлева Є.І. приведено ряд конкретних задач трубопровідного транспорту газу, показано методи побудови математичних моделей та загальні принципи їх реалізації. Однак автори не дають оцінки впливу нових збурень в ході нестационарного процесу на подальшу зміну параметрів.

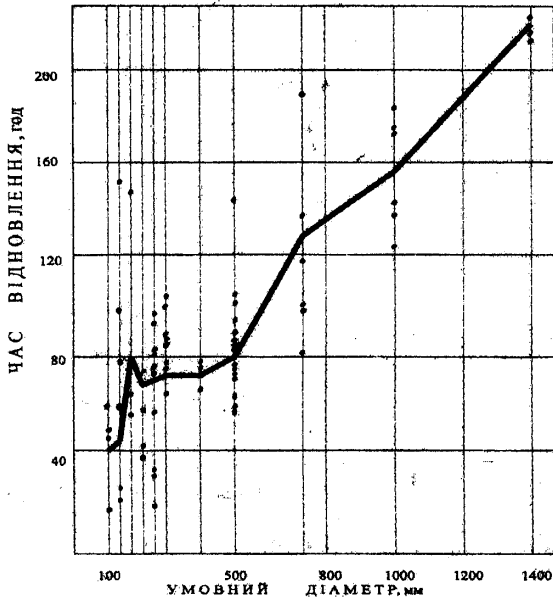
Застрагання можна розглядати як випадкову подію. Тому для визначення ймовірності застрягання поршня використовують методи математичної статистики.

Для формування статистичної вибірки зберемо інформацію про застрягання очисних пристроїв у газопроводах за період 1976-2002 рр. по всіх підрозділах ДК "Укртрансгаз". При формуванні вибірки враховувались: назва газопроводу, його діаметр, товщина стінки, довжина, рік введення в експлуатацію, дата проведення очистки, характер очистки, тип очисного пристрою, координата застрягання, причина застрягання і час відновлення, який враховував час пошуку, місце застрягання і час ліквідації аварії.

Знайдено ймовірності зупинки очисного пристрою в газопроводах різних категорій: для газопроводів малого діаметру (DN 100+500 мм) ймовірність застрягання складає 0,142; для газопроводів середнього діаметру (DN 700+800 мм) – 0,108; для газопроводів великого діаметру (DN 1000+1400 мм) – 0,081. Середньозважена по довжині трубопроводів ймовірність застрягання очисного пристрою складає 0,11. Така висока ймовірність застрягання очисного пристрою вимагає спеціалізованої підготовки при плануванні процесу очистки.

Іншим важливим аспектом, який має безпосередній вплив на збитки, є час ліквідації аварії, викликаної зупинкою очисного пристрою в газопроводі. Найбільш поширеним методом ліквідації аварійної ситуації, викликаної застряганням очисного пристрою, є вирізання котушки трубопроводу.





«Довгогабаритні предмети в порожнині газопроводу». Таким чином, найважливішим фактором, що впливає на частоту застрягання очисних пристроїв у газопроводах перед введенням їх в експлуатацію, є низька культура спорудження газопроводів.

Проведено дослідження, котрі мають за мету оцінити характер зміни тиску на початку газопроводу при зупинці механічного пристрою. Поставлена задача не може бути вирішена без математичного опису газодинамічного процесу в газопроводі в період руху пристрою, тому що фізично цей процес передре зупинці. Оскільки газодинамічні процеси руху пристрою і його зупинки тісно пов'язані, то їх математичні моделі доповнюють одна другу і повинні розглядатися в єдиному комплексі.



Рис. 3. Розподіл прояви частоти відмов по причинах і діаметрах: ряд 1 – загальна частота; ряд 2 – малі діаметри (100 – 300 мм); ряд 3 – середні діаметри (400-800 мм); ряд 3 – великі діаметри (1000-1400).

Причини застрягання:

1 – невідповідність конструкції ОП; 2 – довгогабаритні предмети в трубопроводі; 3 – крупнооб'ємні тверді тіла в трубопроводі; 4 – велика кількість будівельного сміття; 5 – зачеплення ОП за гострі виступи; 6 – місцева деформація трубопроводу; 7 – різке звуження трубопроводу; 8 – порушення при врізці відводів; 9 – гідратні пробки; 10 – рівнопрохідні фітінги; 11 – гідростатичний протитиск; 12- не повністю відкрита запірна арматура.

Ізотермічний характер руху газу в газовій області, що рухається перед поршнем і в області запоршневого простору, описується математичною моделлю, що містить рівняння руху газу і рівняння нерозривності

$$\frac{\partial P_j}{\partial x} = \frac{\lambda_j \rho W^2}{2d}; -\frac{\partial P_j}{\partial t} = c^2 \frac{\partial(\rho W)}{\partial x}, \quad (1)$$

де  $P_j(x, t)$  - тиск як функція лінійної координати  $x$  і часу  $t$ ;  $\lambda_j$  - коефіцієнт гідралічного опору газопроводу;  $\rho$  - густина газу;  $W$  - лінійна швидкість газу;  $c$  - швидкість звуку в газі;

Для реалізації поставленої задачі вважаємо, що в зоні контакту газу з поршнем лінійні швидкості газу по обидві сторони рухомої границі рівні і дорівнюють швидкості руху поршня, тобто

$$W_1(l, t) = W_2(l, t) = \frac{dl}{dt}. \quad (2)$$

Невідомі функції розподілу тисків по довжині газопроводу і в часі руху поршня отримасмо у вигляді залежностей  $P_1^2(x, t)$  та  $P_2^2(x, t)$  відповідно для газової області, що рухається перед поршнем і області запоршневого простору.

Нехай в момент часу  $t_0$  відбулася зупинка поршня в газопроводі на віддалі  $l_0(t)$  від початку траси. Тоді, починаючи з даного моменту часу, характер газодинамічного процесу в запоршневому просторі порушиться. Розв'язок для  $P_1^2(x, t)$  буде відповідати тільки початковим умовам нового нестационарного процесу, який може бути описаний системою рівнянь (1).

Будемо вважати, що на початку газопроводу здійснюється подача газу в запоршневий простір з сталою масовою витратою  $M_0$ , величина якої може бути знайдена з розв'язку задачі про рух очисного пристрою для моменту часу  $t_0$ . Для кінцевого перерізу масова витрата буде рівною величині перетоків через поршень, що зупинився  $M_L$ , і може бути знайдена з формули Сен-Венана-Вентцеля

Тоді граничні умови для реалізації задачі про зупинку пристрою мають вигляд

$$\frac{\partial P}{\partial x} \Big|_{x=0} = -\mu M_0; \quad \frac{\partial P}{\partial x} \Big|_{x=l_0} = -\mu M. \quad (3)$$

Тиск в газопроводі при зупинці пристрою як функція лінійної координати і часу визначиться з формули

$$P(x, t) = \sqrt{P_1^2 - \frac{P_1^2 - P_2^2}{L}x + \frac{2\lambda w}{m^3} M_0 x \left[ \left(1 - \frac{M_L}{M_0}\right) \frac{x}{l_0} - 1 \right] + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4\lambda w M_0 l_0}{d^3 \pi^3 n^2} \{ [1 - (-1)^n] + (1 - \frac{M_L}{M_0})(-1)^n \} + \frac{16L}{l_0 [(4n-1)\pi l_0 - \frac{4\pi^2 n^2 L^2}{(4n-1)\pi l_0}] \cos\left(\frac{(4n-1)\pi}{2}(L-l_0)\right) - \cos\left(\frac{(4n-1)\pi L}{2}\right) \} \cos \frac{\pi n x}{l_0} [1 - \exp(-\frac{\pi^2 n^2 \lambda t}{l_0^2})]. \quad (4)$$

Розрахунки показують, що в точці неповної закупорки газопроводу безпосередньо за очисним пристроєм тиск починає зростати і стабілізується на певному рівні за невеликий проміжок часу (8 - 10 с). Місцева неповна закупорка газопроводу очисним пристроєм відіграє роль місцевого опору в

газопроводі, який характеризується сталим коефіцієнтом місцевого опору. На початку траси газопроводу ріст тиску в часі більш стрімкий. По відношенню до тиску в точці неповної закупорки різниця тисків в часі постійно зростає. Стабілізація тиску на початку траси газопроводу залежить від діаметру газопроводу, коефіцієнта гідравлічного опору та віддалі до місця неповної закупорки. Важливе значення при цьому відіграє величина витрати перетоків газу через границю розділу, яка, в принципі, невідома. З збільшенням діаметру газопроводу (при решта сталих даних) із 300 мм до 500 мм тривалість стабілізації тиску на початку газопроводу зменшується із 530 с до 315 с. При збільшенні відстані до місця неповної закупорки і коефіцієнта гідравлічного опору газопроводу час стабілізації тиску на початку газопроводу зростає ідентично. Так, при  $\mu_0 = 85$  м тривалість процесу стабілізації тиску 315 с, а при  $\mu_0 = 95$  м вона становить 333 с. Подальше збільшення  $\mu_0$  до 105 зумовлює зростання часу стабілізації тиску до 350 с.

Зміна масової витрати перетоків через неповну закупорку в найбільшій мірі впливає як на величину зміни тиску на початку газопроводу, так і на тривалість процесу стабілізації тиску. При величині масової витрати перетоків газу  $m = 25 \text{ кг/с}$ , тобто 10% від витрати газу по газопроводу при русі очисного пристрою, відношення тиску в кінці періоду стабілізації до тиску на початку газопроводу при русі очисного пристрою на даний момент часу складає  $\frac{P_3}{P(0,t)} = 1,52$ , а тривалість періоду стабілізації 351 с. При збільшенні величини масової витрати перетоків до  $37,5 \text{ кг/с}$ , тобто до 15% від витрати газу по газопроводу при русі очисного пристрою відношення вказаних тисків склало  $\frac{P_3}{P(0,t)} = 1,306$ , а час стабілізації тиску зменшився до 302 с. Отже, збільшення витрати масових перетоків через границю розділу призводить до зменшення величини тиску стабілізації на початку траси газопроводу і скорочує період стабілізації тиску.

Аналіз параметрів нестационарних газодинамічних процесів у газопроводі, викликаних неплановою зупинкою очисного пристрою показує, що діапазон їх зміни достатньо широкий і залежить від великої кількості факторів, що безпосередньо впливають на параметри і тривалість процесів. В зв'язку з сказаним на основі аналізу нестационарного процесу при зупинці очисного пристрою координату застрягання визначити неможливо.

**Третій розділ** присвячений розробці імпульсно-хвильового методу визначення координати пристрою, що зупинився в газопроводі, і дослідженням його практичної реалізації

При спорудженні розподільчих газопроводів невеликого діаметру і місцевого значення використання дорогих і дефіцитних приладів для визначення місця застрягання механічного пристрою малоймовірно. Тому газодинамічні методи визначення координати пристрою в газопроводі є на даний час найбільш прийнятним, оскільки вони не вимагають ні додаткового обладнання, ні спеціальних приладів.

З метою визначення місця зупинки механічного пристрою в газопроводі нами запропоновано метод імпульсного впливу на даний потік у трубопроводі. Імпульс тиску на початку газопроводу створюється шляхом з'єднання його порожнини з невеликим за геометричним об'ємом ресивером, наповненим газом до високого тиску. Короткочасний вплив імпульсу тиску на газовий потік у трубопроводі викличе в ньому коливний процес із розповсюдженням ударної хвилі вздовж газопроводу до місця зупинки механічного пристрою, який слугуватиме екраном-відбивачем хвилі. Відбита хвиля розповсюджуватиметься в зворотному напрямку зі швидкістю звуку в газі, і за певний проміжок часу досягне початкового періоду, де буде зареєстрована відповідним самопишучим приладом. Вважаючи швидкість хвилі в прямому та зворотному напрямках сталою, можна за відомим часом, виміряним по картограмі запису коливань тиску, визначити віддаль до екрану

На рис. 4 показано приклад запису картограми коливання тиску в часі на початку газопроводу в умовах експериментальної установки. Як видно з графіка, після імпульсу тиску коливальний процес на початку газопроводу має згасаючий характер, властивий процесу розповсюдження ударної хвилі вздовж трубопроводу до екрану відбивача. З деякого моменту часу амплітудні максимуми починають зростати, що характерно для процесу розповсюдження відбитої хвилі, і в певний момент часу досягають екстремального рівня, характерного для прибуття відбитої хвилі до початку трубопроводу.

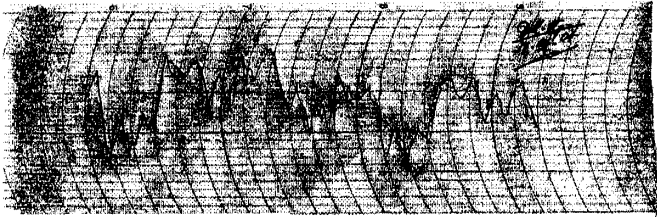


Рис. 4. Картограма коливань тиску

Простий, на перший погляд, метод визначення координати пристрою, що зупинився в трубопроводі, вимагає аналітичних і експериментальних досліджень процесу імпульсного впливу на квазістаціонарний газовий потік.

Нехай на початку ділянки газопроводу підтримується стала масова витрата газу  $m_1$ , а в кінці ділянки (в точці зупинки механічного пристрою) – також стала масова витрата газу  $m_2$ . Вздовж осі газопроводу підтримується сталий тиск  $P_0$ , який не змінюється по довжині внаслідок невеликих значень гідравлічних втрат. В певний момент часу  $t_0$  в точці газопроводу  $x=x_0$  на потік діє імпульс тиску величиною  $\Delta P$  і тривалістю  $\Delta t$ . Необхідно визначити характер зміни тиску в газопроводі, викликаний дією імпульсу тиску. В основу математичної моделі покладене рівняння руху газу, яке включає імпульс тиску, втрати енергії на тертя і інерційні втрати.

$$-\frac{\partial P}{\partial x} + \Delta P \Delta t \delta(x - x_0) \delta(t - t_0) = \frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \frac{\lambda w}{2d} (\rho w), \quad (5)$$

де  $P = P(x, t)$  - тиск газу як функція лінійної координати і часу  $t$ ;  $\delta(x - x_0)$  - функція джерела Дірака, що діє в точці  $x = x_0$ ;  $\delta(t - t_0)$  - функція джерела Дірака, що діє в момент часу  $t_0$ ;  $\rho$  - густина газу;  $w$  - лінійна швидкість газу;  $\lambda$  - коефіцієнт гідравлічного опору газопроводу.

Використавши рівняння нерозривності потоку і граничні умови, що визначають масові витрати газу на кінцях ділянки, отримуємо розв'язок задачі у вигляді

$$P(x, t) = P_0 + \frac{2aL}{F} \left( m_1 - \frac{m - m_2}{L} x \right) \cdot \sin \frac{\pi x}{L} + \frac{4ac^2}{V} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{m_1 + (-1)^n m_2}{2a^2 + \omega_n^2} \cdot \left[ 1 - e^{-at} \left( \cos \sqrt{\omega_n^2 - a^2} t - \frac{a}{\sqrt{\omega_n^2 - a^2}} \sin \sqrt{\omega_n^2 - a^2} t \right) \right] \cos \frac{\pi x}{L} + \frac{4\Delta P \Delta t c^2}{L} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin \sqrt{\omega_n^2 - a^2} t}{\sqrt{\omega_n^2 - a^2}} e^{-at} \cos \frac{\pi x}{L} \cos \frac{\pi x_0}{L} \quad (6)$$

де  $V = FL$  - об'єм трубопроводу

$$a = \frac{\lambda \omega}{4d}; \quad \omega_n = \frac{\pi n c}{L}.$$

На основі одержаної залежності проведемо аналіз газодинамічного процесу в газопроводі і умови реалізації запропонованого методу для умов застрягання очисного поршня при продувці ділянки газопроводу Комарно - Дроздовичі перед введенням її в експлуатацію після ремонту 26.09.2004.

В якості очисного пристрою використовувався поршень ОПРМ-500, який зупинився на віддалі ПК 360+8. В результаті створилась ситуація, що відповідає неповній закупорці газопроводу очисним поршнем. Застосування імпульсно-хвильового методу дозволило отримати характеристики коливального процесу в газопроводі, які представлені у вигляді графіків на рис. 5.

Розрахункова відстань до місця закупорки 3603,5 м, похибка в її визначенні 0.093%. Слід зауважити, що ця похибка враховує лише неточності, закладені при побудові моделі і не враховує похибок вимірювальних приладів, які також матимуть місце.

Для оцінки точності методу були проведені розрахунки по моделі для віддалі до поршня на 100 м більшої за фактичну і для віддалі на 20 м більшої за фактичну. За таких умов похибка склала 0.109% у першому випадку і 0,07% в другому. Таким чином, похибка методу моделювання не перевищує 0,1% в сторону заниження результату.

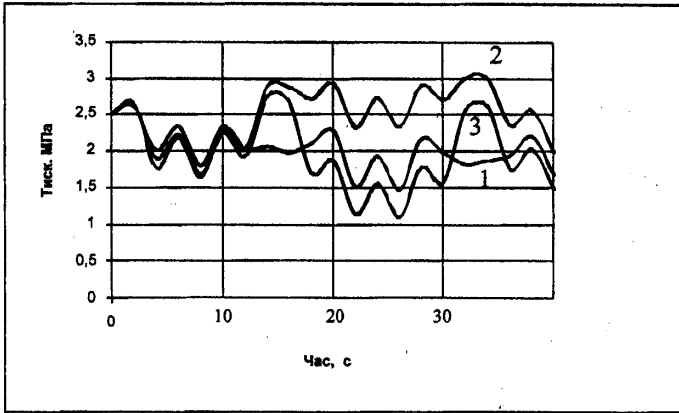


Рис. 5. Характер коливання тиску в трубопроводі:

1 –  $L=3628$  м; 2 –  $L=3608$  м; 3 –  $L=3708$  м;

Збільшення маси газу в газопроводі до початку коливального процесу призводить до зростання часу стабілізації процесу, оскільки в цьому випадку має місце велика інерційність системи. Зростання температури газу, що призводить до збільшення швидкості звуку в газі, призводить до більш швидкого загасання коливного процесу, оскільки хвиля ущільнення швидше пробігає довжину ділянки газопроводу. До повного затухання процесу хвиля пробігає ділянку трубопроводу 12-15 разів. Гідравлічний опір трубопроводу у випадку рухомого газового потоку сприяє більш швидкому загасанню коливного процесу. Отже на практиці витрата газу через місце закупорки незначна тому рух газового потоку незначною мірою впливає на коливальний процес.

У четвертому розділі проведено аналіз точності прогнозу координати зупинки пристрою в газопроводі.

Незапланована зупинка очисного механічного пристрою в газопроводі викликає складний газодинамічний процес, в якому безперервно змінюються тиск і температура шару газу, його фізичні властивості, що в кінцевому рахунку впливає на швидкість розповсюдження хвилі збурень у прямому і зворотному напрямку. Слід також зауважити, що на швидкість розповсюдження хвилі в газовому середовищі має певний вплив і лінійна швидкість газу й амплітуда вимушених коливань тиску, якими при розробці імпульсного методу контролю за місцем застрягання очисного пристрою нехтується. В той же час при реалізації методу немає необхідності абсолютно точно визначити координати пристрою, що зупинився. Достатньо вказати межі ітераційного інтервалу з

метою визначення довжини котловану відкриття трубопроводу для вирізання катушки і повторного зварювання труб.

Тут не йдеться про похибку, викликану класом точності вимірювальних приладів і системи передачі інформації, хоча ця похибка також має суттєве значення. Важливо оцінити похибку самого методу, викликану нестабільністю параметрів багатофакторної системи.

Таким чином, задача полягає у визначенні похибки методу, викликаного впливом нестабільних факторів на газодинамічну систему, необхідної для оцінки розмірів (довжини) котловану розкриття трубопроводу з метою ліквідації аварійної ситуації.

Газодинамічна система в газопроводі з урахуванням неповної закупорки газопроводу механічним пристроєм є багатофакторною і описується складною математичною моделлю з невизначеністю вхідної інформації, тому аналітичні дослідження такої системи є малоефективними. Для експериментальної оцінки величини похибки у визначенні координати неповної закупорки газопроводу окреслено коло параметрів системи, що мають вирішальний вплив на результат.

На основі теорії розмірностей множина параметрів, що впливають на характер процесу, зведена до критеріїв Ейлера  $Eu$  і Струхаля  $Sh$ , числа Маха  $M$  та безрозмірного відношення  $L/d$ . Шляхом нескладних перетворень критеріїв Ейлера зведено до безрозмірного тиску  $\bar{p}$ . Тоді шукана залежність матиме вигляд

$$\delta x = \varphi\left(\bar{p}, \frac{L}{d}, M, Sh\right). \quad (7)$$

Досліди з оцінки похибки визначення місця зберігання механічного пристрою в газопроводі проводились на експериментальних стендах, створених в лабораторних умовах на базі трубопроводу діаметром 25 мм і довжиною 16 м, та в напівпромислових умовах на основі трубопроводу ПМТ-100 максимальною довжиною 600 м.

В основу планування дослідів і обробки їх результатів покладено методуку раціонального планування експерименту Протодьяконова і Тедера. Було проведено 25 дослідів, результати яких дозволили побудувати емпіричну залежність величини похиби методу від перерахованих параметрів у критеріальній формі

$$\delta x = 0,055 \left(\frac{L}{d}\right)^{0,11} Sh^{-0,25} \bar{p}^{0,31} M^{1,1}. \quad (8)$$

Одержана залежність визначає системну похибку методу визначення координати очисного механічного пристрою, що застряг в газопроводі. Вона має важливе практичне застосування, адже визначивши місце зупинки механічного пристрою в газопроводі, необхідно провести земляні роботи, зв'язані з відкриттям трубопроводу.



## ВИСНОВКИ

На основі проведених досліджень вирішено важливу наукову задачу, яка полягає у встановленні закономірностей розповсюдження хвиль малих збурень, викликаних імпульсом тиску, в газодинамічній системі, що дозволило створити новий метод визначення місця зупинки механічного пристрою в газопроводі і підвищити ефективність технологічного процесу очистки трубопроводів, а саме:

1. На основі статистичних досліджень процесу очистки газопроводів України встановлено, що ймовірність застрягання механічного пристрою складає близько 11%, причому для газопроводів малих діаметрів цей показник складає 14,2%, для газопроводів середніх діаметрів – 10,8%, для газопроводів великих діаметрів – 8,1%. Встановлено також основні причини застрягання механічних пристроїв у газопроводах і статистичну тривалість ліквідації аварій.
2. Запропоновано нову конструкцію очисного пристрою, що характеризується підвищеною ефективністю очистки газопроводів у складних трасових умовах.
3. На основі теоретичних досліджень нестационарних процесів, викликаних зупинкою механічного пристрою в газопроводі, показано, що моменту зупинки пристрою відповідає підвищення тиску на початку газопроводу, однак багатofакторність процесу не дозволяє встановити місце зупинки за параметрами газодинамічного процесу.
4. Запропоновано новий імпульсно-хвильовий метод визначення координати механічного пристрою, що зупинився в газопроводі, проведено аналітичні й експериментальні дослідження газодинамічних процесів, викликаних застряганням механічного пристрою, в результаті яких встановлено раціональні параметри методу та величину похибки його результату.
5. Дослідно-промислова апробація запропонованого методу визначення координати пристрою, що застряг у газопроводі, та розроблене для його реалізації обладнання показали високу ефективність на газопроводах-відводах УМГ «Прикарпаттрансгаз».

Список опублікованих праць за темою дисертації:

1. Василюшин О.Я. Метод імпульсного впливу для визначення координати зупинки поршня в газопроводі / Василюшин О.Я., Терепенко Р.М. // Матеріали VI науково-практичної конференції «Організація невідшкодуваного контролю якості продукції в промисловості». – 2008. – Таба (Египет). – С.20– 21.
2. Грудз В.Я. Статистичні дослідження застрягання механічних засобів в газопроводі/ В.Я. Грудз, Р.М. Терепенко// Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ: держ. міжвід. наук.-техн. зб. – Івано-Франківськ, 2008. – №4(29). – С. 73-75

3. Грудз В. Я. Метод визначення координати механічного пристрою в газопроводі/ В. Я. Грудз, Р.М. Терещенко// Науковий вісник ІФНТУНГ: держ.міжвід.наук.-техн.зб. – Івано-Франківськ, 2008. – № 2 (18). – С. 103-105
4. Пат. 79510 С2 Україна, МПК D08d 9/04. Пристрій для очищення внутрішньої порожнини трубопроводу./ Грудз В.Я., Клов А.К., Терещенко Р.М., Василюшин О.Я. - №200504469. Заявл. 13.05.2005;Опубл.25.06.2007, Бюл.№9,2007р.
5. Терещенко Р.М. Методи визначення координати пристрою, що зупинився в газопроводі/ Терещенко Р. М.// Обслуговування та ремонт газопроводів/ [Грудз В. Я., Тимків Д. Ф., Михалків В. Б., Костів В .В.] – Івано-Франківськ: Лілея,2009. – 710с.
6. Терещенко Р.М. Аналіз причин застрягання механічних пристроїв в газопроводі. Збірник матеріалів всеукраїнської науково-практичної конференції «Вісник науковця-2009». 2 квіт. 2009р.,Миколаїв.- С.237-238.
7. Грудз В.Я. Дослідження газодинамічних процесів в газопроводі, викликаних застряганням механічного пристрою/В.Я.Грудз.,Р.М.Терещенко.//Науковий вісник ІФНТУНГ №1(19),2009 – С.103-105.

### АНОТАЦІЯ

**Терещенко Р.М. Підвищення ефективності використання механічних очистних пристроїв в газопроводах. – Рукопис.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.15.13 – Трубопровідний транспорт, нафтогазосховища. – Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, Івано-Франківськ, 2009.

Дисертаційна робота присвячена підвищенню ефективності використання механічних пристроїв у газопроводах і забезпечення оперативного ліквідування аварій у випадку їх застрягання.

Запропоновано імпульсно-хвильовий метод пошуку очистного пристрою, що застряг у газопроводі, створено математичну модель газодинамічних процесів і проведено аналітичні та експериментальні дослідження, на основі яких встановлено раціональні параметри процесу та дано оцінку точності методу.

**Ключові слова:** газопровід, очистка, механічні пристрої, застрягання, імпульсно-хвильовий метод пошуку.

### АННОТАЦИЯ

**Терещенко Р.М. Повышение эффективности использования механических очистных устройств в газопроводах. – Рукопись.**

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.15.13 – Трубопроводный транспорт, нефтегазохранилища.

– Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа, Ивано-Франковськ, 2009.

Дисертационная работа посвящена повышению эффективности использования механических очистных устройств в газопроводах и обеспечению оперативной ликвидации аварий в случае их застревания.

Статистический анализ застревания очистных устройств в газопроводах, выполненный на основании информации ДК «Укртансгаз» на протяжении 1976-2002 гг., позволил оценить вероятность застревания с разбивкой по типам очистных устройств, причинам застревания и диаметрам трубопроводов. Выявлено основные причины застревания очистных устройств при очистке трубопровода перед вводом в эксплуатацию. Установлены также среднестатистические затраты времени на ликвидацию аварий в случае застревания очистного устройства в разрезе диаметров газопроводов и типа очистных устройств..

Создана математическая модель газодинамического нестационарного процесса в газопроводе, вызванного остановкой очистного устройства в процессе проведения очистки. На основе реализации предложенной математической модели и анализа результатов многовариантных расчетов сделаны выводы о взаимозависимости между параметрами процесса в случае полной и неполной закупорки трубопровода. Установлено, что в случае неполной закупорки газопровода очистным устройством газодинамические методы контроля за движением и остановкой устройства не могут удовлетворить требованиям определения места его остановки вследствие неопределенности исходной информации.

Предложен импульсно-волновой метод поиска места остановки очистного устройства в газопроводе, заключающийся в воздействии на газовый стационарный поток кратковременным импульсом повышенного давления, что позволит создать волновой колебательный процесс. По времени распространения прямой и отраженной волны и скорости распространения звука в газовой бреше определяется координата места закупорки трубопровода. С целью выбора рациональных параметров реализации метода проведены его аналитические исследования с применением математической модели, созданной на основе уравнений движения газа, в котором учтены инерционные потери и потери на преодоление сил трения, и неразрывности, в которой импульсное воздействие на стационарный газовый поток иммитировалось при помощи функции источника Диракка. Реализация предложенной математической модели для многовариантной исходной информации позволила оценить влияние различных параметров процесса на окончательный результат и выбрать их рациональные значения.

Для точности предложенного метода проводились экспериментальные исследования на физических моделях. Опыты проводились при различных значениях геометрических размеров модели и разных параметрах режима. Результаты моделирования обрабатывались с учетом теории подобия и размерностей на основе методики рационального

планирования эксперимента. В итоге получено в критериальной форме уравнение для определения погрешности предложенного метода.

В результате проведенных исследований создана технология и разработано оборудование для практической реализации метода и проведены опытно-промысловые испытания на газопроводах-отводах УМГ Прикарпаттрансгаз, которые показали высокую эффективность метода.

**Ключевые слова:** газопровод, очистка, механические устройства, застрегание, импульсно-волновой метод поиска.

## ANNOTATION

**Terefenko R. M. Increase of efficiency of the use of mechanical cleansing devices in gas pipelines.- Manuscript.**

Dissertation on the receipt of scientific degree of candidate of engineering sciences after specialty 05.15.13 - Pipeline transport, oil gas-shelters. - Ivano-Frankivsk national technical university of oil and gas, Ivano-Frankivsk, 2009.

Dissertation is devoted to the increase of efficiency of the use of mechanical pigs in gas pipelines and providing the operative accident elimination, in the case of its sticking.

The impact-wave method of search of stucked in a gas pipeline cleansing pigs is offered, the mathematical model of gas dynamic processes is created, the analytical and experimental researches are conducted, on the basis of these researches the rational parameters of process are set and the estimation of the method accuracy is given.

**Keywords:** gas pipeline, cleaning mechanical pigs, sticking, impact-wave method of search.

