

# Дослідження та методи аналізу

---

УДК 622.691.4

DOI: 10.69628/pdogf/4.2023.26

## ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ГЕОМЕТРИЧНОЇ ФОРМИ ТА МАТЕРІАЛУ ПОРШНІВ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ ОЧИЩЕННЯ ТРУБОПРОВІДІВ

<sup>1</sup>С. М. Стецюк, <sup>1</sup>Я. В. Дорошенко, <sup>1</sup>Р. В. Бондаренко, <sup>2</sup>О. О. Філіпчук, <sup>1</sup>Ю. І. Дорошенко

<sup>1</sup>ІФНТУНГ; 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15;  
e-mail: yaroslav.doroshenko@nung.edu.ua

<sup>2</sup>Акціонерне товариство «Укргазвидобування»;  
04053, м. Київ, вул. Кудрявська, 26/28

Для підвищення гідравлічної ефективності трубопроводів, зменшення швидкості внутрішньотрубно́ї корозії необхідне регулярне очищення їх внутрішньої порожнини від різноманітних забруднень. Особливо це стосується трубопровідних систем збирання газу газових родовищ, тепло- та газопостачання, забруднення яких призводить до зменшення обсягів видобування газу, суттєвого зростання енерговитрат на транспортування. Традиційні методи очищення таких трубопровідних систем не завжди дають змогу підвищити гідравлічну ефективність трубопроводів, до того ж супроводжуються виробничо-технологічними втратами газу. Запобігти цьому можна застосуванням очисних поршнів, однак через цілий ряд ускладнень для таких трубопроводів необхідна розробка і підбір поршнів підвищеної прохідної здатності та дослідження впливу їх матеріалу і геометричної форми на ефективність очищення трубопроводів. Тому метою роботи є дослідження динаміки руху очисних поршнів різної геометричної форми із різних гіперпружних матеріалів горизонтальними і пониженими ділянками трубопроводів та процесів їх очищення. Для таких досліджень розроблено технології виготовлення дослідних зразків очисних поршнів різної геометричної форми з різних гіперпружних матеріалів. Щоб дослідити динаміку руху кожного дослідного зразка, визначити його прохідну здатність та оцінити ефективність очищення ним трубопроводів, розроблено та змонтовано експериментальну установку зі скляних труб і відводів, яка містить протяжні горизонтальні і понижені ділянки. Експериментально визначено прохідну здатність кожного дослідного зразка очисного поршня та ефективність очищення ним трубопроводу. За результатами досліджень здійснено коректування геометричної форми дослідних зразків очисних поршнів для підвищення їхньої прохідної здатності. Також розроблено план прогресивної верифікації поршня для очищення трубопровідних систем збирання газу газових родовищ, тепло-, газопостачання, що дає змогу підібрати максимально ефективний поршень.

Ключові слова: тестування очисних поршнів, динаміка руху, прохідна здатність, гіперпружний матеріал, рідинні забруднення, понижена ділянка.

To increase the hydraulic efficiency of pipelines and reduce the rate of intra-pipe corrosion, it is necessary to regularly clean their internal cavity from various contaminants. This especially applies to gathering pipeline systems, heat and gas networks, pollution of which leads to a decrease in gas production volumes and a significant increase in energy costs for transportation. Traditional methods of cleaning such pipeline systems do not always make it possible to increase the hydraulic efficiency of pipelines, besides, they are accompanied by production and technological losses of gas. This can be prevented by using cleaning pigs, however, due to a number of

complications for such pipelines, it is necessary to develop and select pigs with increased throughput and study the influence of their material and geometric shape on the efficiency of pipeline cleaning. Therefore, the purpose of the work is to study the dynamics of the movement of cleaning pigs of different geometric shapes made of various hyperelastic materials through horizontal and lowered section of pipelines and their cleaning processes. For such studies, technologies for manufacturing test samples of cleaning pigs of different geometric shapes from various hyperelastic materials have been developed. In order to study the dynamics of the movement of each test sample, determine its throughput and evaluate the effectiveness of its cleaning of pipelines, an experimental installation with glass pipes and elbows was developed and assembled, which contains long horizontal and lowered section. The through-conduit of each test sample of the cleaning pig and the effectiveness of its cleaning of the pipeline were determined experimentally. Based on the results of research, the geometric shape of test samples of cleaning pigs was adjusted to increase their through-conduit. A plan for progressive verification of the pig for cleaning the gathering pipeline systems, heat and gas networks has also been developed, which makes it possible to choose the most effective pig.

Keywords: testing of cleaning pigs, movement dynamics, through-conduit, hyperelastic material, liquid contamination, lowered section.

## Вступ

Гідравлічна ефективність трубопровідних систем різноманітного призначення суттєво залежить від якості їх технічного обслуговування. Я. Дорошенко [1] констатує, що у внутрішній порожнині практично усіх ненових металевих трубопроводів, незалежно від їх призначення, містяться різноманітні забруднення різного походження: винесені зі свердловин частинки порід; газовий конденсат; вода; мастило; продукти внутрішньотрубної корозії; будівельне сміття; окалина, яка відшарувалась від труб; парафіни; різні мінеральні солі; відклади шламу; пісок; ґрунт; біоплівка тощо.

За недостатньої швидкості потоку забруднення накопичуються у понижених ділянках газопроводів, відкладаються на внутрішній стінці, що призводить до збільшення гідравлічного опору трубопроводів і, як наслідок, до збільшення перепаду тиску, зростання енерговитрат на транспортування, зменшення обсягів вилучення вуглеводнів із пластів родовищ, збільшення швидкості внутрішньотрубної корозії і зменшення надійності трубопроводів. В. Воловецький [2]) за результатами CFD моделювання встановив, що збільшення обсягу рідких забруднень у внутрішній порожнині трубопроводів систем збирання газу газових родовищ призводить до збільшення втрат тиску вище величин, передбачених технологічним режимом транспортування. Також В. Воловецький [3] зазначив, що наявність рідких забруднень у газовому потоці за певних термобаричних умов може призвести до утворення в трубопроводах твердих кристалічних сполук, а саме, гідратів. Потенційно схильними до накопичення гідратів є місця розгалужень трубопроводу, перехідники з одного діаметра трубопроводу на інший, відводи, регулюючі дроселі та понижені ділянки траси. Відкладення гідратів призводить до зменшення внутрішнього діаметра трубопроводу, а

в окремих випадках – до повного закупорення газопроводу.

Видалення забруднень продуванням газопроводів швидкісним газовим потоком супроводжується збільшенням обсягів виробничо-технологічних втрат природного газу і забрудненням доквілля парниковими газами, не завжди забезпечує повне очищення газопроводу. До того ж, в Україні багато газових родовищ перебувають на завершальній стадії розробки в умовах низьких тисків, яких не завжди достатньо, щоб продути промислові газопроводи. Енергетична криза, висока вартість енергоносіїв, необхідність в декарбонізації вимагають уваги до багатьох аспектів і питань технічного обслуговування трубопровідних систем.

Ефективно очистити трубопроводи від накопичених у внутрішній порожнині і відкладених на стінці забруднень можливо очисними поршнями. Газопроводи поршнями можна очистити без втрат газу і викидів метану в доквілля. Магістральні газопроводи спроектовані таким чином, щоб була можливість періодичного їх очищення та діагностування поршнями. Однак, що стосується систем збору газу газових родовищ, трубопроводів газових і теплових мереж, то під час їх проектування і будівництва не було передбачено можливості застосування очисних поршнів. Тому такі трубопроводи містять різні елементи, що перешкоджають вільному руху поршнів, зокрема, крутовигнуті відводи, перехідники з більшого на менший діаметр труб тощо. Також доволі часто зустрічаються зміщення кромки труб та напливи металу у внутрішню порожнину в місці зварних швів, вм'ятини, овальності та інші дефекти. Усі ці ускладнення можуть призвести до застрягання очисних поршнів і часткового або повного закупорювання трубопроводу Найкращим підходом у такому випадку є розроблення індивідуальної програми очищення кожного трубопро-

воду, так як очищення поршнями таких трубопроводів буде виконано вперше. Тому треба оцінити придатність кожного трубопроводу для очищення та підібрати для нього матеріал і геометричну форму очисного поршня (верифікувати очисний поршень), оскільки одним і тим же очисним поршнем ефективно очищувати усі трубопроводи від різних забруднень неможливо.

Верифікацію очисних поршнів треба виконати з урахуванням стану кожного трубопроводу (наявність рідких, твердих забруднень у внутрішній порожнині, твердих відкладів на внутрішній стінці), його прохідності (наявність фітінгів, крутовигнутих відводів, трійників, перехідників із більшого на менший діаметр труб і навпаки), значних впливів чи зміщень кромки у місці зварних з'єднань, вм'ятин), режимів роботи (витрата, тиск) серією запусків тестових поршнів. Запускання тестових поршнів дає можливість переконатись у прохідності трубопроводу, підібрати геометричну форму і матеріал поршня для максимально ефективного очищення. Щоб мінімізувати ризик застрягання чи руйнування очисного поршня, треба здійснювати прогресивну його верифікацію. Найпершими доцільно запускати тестові поршні, виготовлені з матеріалу невеликої твердості, які мають таку геометричну форму, яка забезпечить їм найкращу прохідність. Кожен наступний тестовий поршень повинен бути з матеріалу більшої твердості та геометричної форми, яка дасть змогу ефективніше очищувати трубопровід. Тому для виконання таких робіт потрібен набір очисних поршнів із різних матеріалів різної геометричної форми.

R. Lie [4] зазначив, що тільки виконанням експериментальних досліджень прохідної здатності поршнів різної геометричної форми можна знизити ризик їх застрягання і зупинки трубопроводів.

J. Zhou [5] застерігає: якщо поршень виносить у камеру приймання експериментальної установки велику кількість рідинних забруднень, то наприкінці процесу очищення виникає гідравлічний удар такої сили, що може відбутись розрив трубопроводу.

C. Стецюк [6] експериментально оцінив ефективність очищення циліндричними поршнями із гіперпружних матеріалів різної твердості (пінополіуретан; пінополіуретан, покритий уретаном; саморуйнівна пружно-полімерна композиція; силіконовий герметик, силіконовий компаунд) горизонтальних і понижених ділянок трубопроводів із скляних труб. Встановлено, що найефективніше внутрішню порож-

нину таких ділянок трубопроводів очищують поршні із силіконового компаунду, силіконового герметика та пінополіуретану високої щільності. При цьому очищення усіма поршнями було найефективнішим, коли поршні рухались із майже постійною швидкістю – 2-5 м/с. При цьому Z. Liang [7] встановив, що швидкість руху поршня визначається, насамперед, діаметром трубопроводу, швидкістю газу, величиною перетікання через поршень і силою тертя між поршнем та стінкою трубопроводу.

### Мета та завдання досліджень

Метою роботи є дослідження динаміки руху очисних поршнів різної геометричної форми із різних гіперпружних матеріалів горизонтальними і пониженими ділянками трубопроводів та оцінка ефективності їх очищення.

Основними завданнями роботи є розроблення технології виготовлення дослідних зразків очисних поршнів різної геометричної форми з різних гіперпружних матеріалів, розроблення та монтаж експериментальної установки для тестування очисних поршнів, визначення прохідної здатності кожного поршня та оцінка ефективності очищення горизонтальних і понижених ділянок трубопроводів.

### Огляд літератури

P. Кондрат [8] для очищення внутрішньої порожнини систем збирання газу газових родовищ розробив саморуйнівний в'язкопружний очисний поршень, для якого не треба влаштовувати камери приймання. До складу матеріалу поршня входить карбоксиметилцелюлоза, спінуюча поверхнево-активна речовина та вода. Шляхом лабораторних досліджень встановлено, що, змінюючи рецептуру виготовлення такого поршня, можна регулювати тривалість його існування: від 40 хв до понад годину – у воді, від більш ніж двох до трьох годин – у суміші води з конденсатом.

W. Winters [9] констатує, що на сьогодні існує понад 500 типів поршнів. Вони мають різноманітне призначення (очищення, розділення різних транспортованих продуктів, нанесення хімічних речовин на внутрішню стінку, діагностування, картографування, різних вимірювань тощо). А тому надзвичайно важливо правильно підібрати поршень. Для очищення трубопроводів застосовують циліндричні поршні з різних спінених полімерів та литі з уретану і інших матеріалів, які мають різну геометричну форму.

Щоб правильно підібрати поршень для очищення трубопроводу, необхідні як теоретичні, так і лабораторні експериментальні дослі-

дження, тестування та промислова верифікація для кожного трубопроводу систем збирання газу газових родовищ, мереж тепло- та газопостачання. Неправильний підбір очисного поршня може призвести до його застрягання чи руйнування. Причин для цього є надзвичайно багато. Основні з них розглянули А. O'Donoghue [19] та Р. Ward [20]. До того ж, застосування невірно підібраних поршнів може спричинити вибух газопроводу, причини чого розслідує L. Matta [21].

Теоретичні дослідження полягають у моделюванні руху поршнів трубопроводами, режимів роботи трубопроводу і газодинамічних процесів при цьому для визначення розподілу тиску, швидкості руху поршня, його місцезнаходження за заданих умов експлуатації трубопроводу.

А. Nieckele [10], А. Solghar [22] та М. Lesani [23] для моделювання руху поршнів трубопроводом об'єднали рівняння руху потоку (збереження маси, імпульсу та енергії) з рівняннями балансу сил, які діють на поршень. У рівнянні балансу сил врахував сили тиску, контактні сили та різні режими тертя та прискорення поршня. Розв'язують ці рівняння чисельним методом. Реалізація згаданих математичних моделей дала змогу дослідити динаміку руху поршня трубопроводом, встановити місця його пришвидшення, гальмування, моменти збільшення і зменшення тиску, побудувати набір графічних моделей зміни тиску, витрати, швидкості руху та положення поршня в часі. Суттєві зміни цих параметрів спостерігались в моменти початку руху поршня, в місцях зміни його діаметра. Натомість М. Borregales [11] для дослідження розподілу швидкості й тиску під час руху поршня трубопроводом запропонував застосувати CFD моделювання в програмному комплексі Ansys. Змодельовано рух поршнів різної геометричної форми (циліндричної, кулеподібної і дискової) з постійною швидкістю трубопроводом, який містить дві прямолінійні ділянки і криву повороту. Встановлено, що найкращим поршнем для очищення досліджуваного трубопроводу є дисковий.

В. Грудз [12] теоретично дослідив нестационарні термогазодинамічні процеси, які відбуваються в газопроводі під час руху поршнів. Для цього створено математичну модель руху газу в газовій області, яка рухається перед і за поршнем. Реалізація такої моделі дає змогу прогнозувати характер переміщення рухомої границі та розподіл тисків і витрати газу впродовж нестационарного процесу.

Також В. Грудз [13] запропонував підвищувати ефективність очищення газопроводів гальмуванням руху очисного пристрою на низхідних ділянках зміною технологічної схеми лінійної частини шляхом підключення лупінгу. Для встановлення закономірностей руху очисного пристрою при зміні технологічної схеми газопроводу побудовано математичну модель процесу і запропоновано алгоритм її реалізації, що дало змогу розрахувати ступень зменшення швидкості руху поршня після підключення лупінгу.

Х. Zhu [24] та А. Heijer [25] досліджували силу тертя, спричинену нелінійним контактом між ущільнювальним диском поршня та внутрішньою стінкою труби. Одержані результати засвідчили, що сила тертя залежить від сили притискання дисків, стану стінки труби та швидкості руху поршня. Експериментально визначено контактну силу, силу тертя та розраховано коефіцієнт тертя між ущільнювальним диском і стінкою труби, який, в основному, визначався станом стінки труби і майже не залежав від розмірів ущільнювального диска. S. Kim [14] в лабораторних умовах експериментально досліджував вплив тертя на швидкість руху поршня трубопроводом. Розроблено та виготовлено експериментальну установку з прозорих труб, особливістю якої є можливість заміни двох секції трубопроводу на секції з різними товщинами стінки і, відповідно, різними внутрішніми діаметрами. Зменшення діаметра трубопроводу призводило до збільшення контактних сил і сил тертя під час проходження поршнем таких секцій трубопроводу, що, в свою чергу, пригальмовувало поршень. Пригальмовування поршня призводило до збільшення тиску в запоршневому просторі, тож коли він проходив змінну секцію, його швидкість суттєво збільшувалась.

Досліджено взаємозв'язок між швидкістю руху поршня на виході із змінної секції та основними змінними, якими були швидкість потоку, товщина стінки змінної секції та довжина прямолінійної ділянки трубопроводу перед змінною секцією. Встановлено, що збільшення товщини стінки змінної секції і, відповідно, підвищення сили тертя призводить до пришвидшення поршня на виході змінної секції на величину від 46 % до 110 %, Особливо значним воно було при малій швидкості потоку. Результати показали, що довжина пакету ліній є основним фактором поведінки свиней. Зокрема, лінійний пакет також слід розглядати як важливу змінну, яка впливає на відхилення швидкості та

поведінку під час проходження трубопроводу на великій відстані.

W. Wang [15] експериментально в лабораторних умовах досліджував ефективність видалення дисковими і чашковими поршнями відкладів парафіну різної товщини і різної твердості з внутрішньої стінки трубопроводу. Найефективніше відклади на внутрішній стінці трубопроводу видаляють дискові поршні, які чинять більшу сили опору парафінам. При цьому ефективність видалення воску можна підвищувати оптимізацією розмірів і твердості дисків.

Z. Chen [16] та Y. Cao [17] для дослідження напружено-деформованого стану, деформацій чашок очисного поршня застосували чисельне моделювання методом кінцевих елементів. Такий метод дає змогу визначати розподіл напружень у чашках поршня, від величини яких залежить очисна здатність поршня та його здатність проходити елементи трубопроводу.

Під час руху поршня прямолінійною ділянкою трубопроводу радіальні напруження на зовнішньому краю чашки розподілені рівномірно, а коли поршень проходить кривою – їх розподіл має кардіальний характер.

D. Molynieux [18] описує успішне застосування очисного поршня з еластомеру для очищення газозбірного трубопроводу газового родовища сланцевого газу накопичення води, в понижений ділянці якого в місці перетинання ущелини призводило до виникнення значного перепаду тиску. Газопровід не містив камер запускання-приймання поршнів, тому для поміщення поршня в газопровід демонтували котушку труби довжиною 1,5 метрів і кран у початковій його точці. З газопроводу очисний поршень був видалений через продувну лінію. У результаті очищення перепад тиску в трубопроводі зменшився до 0,01 МПа.

### Матеріали та методи

Для виготовлення дослідних зразків очисних поршнів підібрано різні матеріали, які мають різні фізико-механічні характеристики. Це силіконовий компаунд, поліуретан та пінополіуретан. При цьому очисні поршні виготовлені із силіконового компаунда і поліуретану різної твердості (за шкалою Шор А), а пінополіуретану - різної густини. Підібрані матеріали називають гіперпружними, оскільки під навантаженням вони зазнають значних деформацій і мінімально змінюють об'єм (у разі стискання бічної поверхні зразки видовжуються, а у разі прикладання вертикального навантаження – розширюються), швидко відновлюють форму після знімання навантажень. Тому такі матеріа-

ли спроможні забезпечити здатність очисним поршням проходити через різноманітні ускладнення, які спостерігаються в трубопроводах систем збору газу газових родовищ, газових і теплових мереж (зокрема, коліна малого радіусу вигину, перехідники з більшого на менший діаметр труб, зміщення кромки труб та напливи металу у внутрішню порожнину в місці зварних швів, вм'ятини, овальності тощо).

Цікавим щодо виготовлення очисних поршнів для очищення складних трубопровідних систем є силіконовий компаунд, який після затвердіння при кімнатній температурі стає надзвичайно міцним і непроникним матеріалом великої пружності, гнучкості, зносостійкості, довговічності та добре розтягується і точно повторює форму, в яку його заливають, незалежно від її розміру та складності.

Дослідні зразки очисних поршнів виготовлено із силіконового компаунда на олов'яному каталізаторі (поліконденсаційного), який простий у використанні, добре обтікає внутрішню поверхню форми. Натомість силіконовий компаунд на платиновому каталізаторі (поліадитивний) є липким, але термостійким, тому його доцільно застосовувати для виготовлення очисних поршнів, призначених для очищення внутрішньої порожнини трубопроводів тепломереж під тиском теплоносія.

Поршні виготовлено із силіконових компаундів різних марок, які мають різну твердість за Шор А (табл. 1).

Для виготовлення суцільнолитих дослідних зразків очисних поршнів із силіконового компаунда розроблено таку технічну послідовність виконання робіт:

- розроблення 3D моделі очисного поршня;
- виготовлення 3D моделі ливарної форми;
- виготовлення ливарної форми;
- приготування суміші силікону (основи) і каталізатора;
- заливання суміші в ливарну форму;
- забезпечення технічної перерви для твердіння силіконового компаунда;
- вилучення очисного поршня з ливарної форми;
- контроль якості очисного поршня.

3D моделі очисних поршнів доцільно розробляти для наочності, виявлення недоліків і внесення необхідних коректив щодо геометричної форми та розмірів поршня, виготовлення 3D моделі форми для лиття із максимальним ступенем деталізації.

Таблиця 1 – Фізико-механічні властивості силіконових компаундів

Показник	Марка силіконового компаунда		
	SKR-780	SKR-781	SKR-788
Усереднена в'язкість, СПз	15000	15000	19000
Твердість за Шор А	5	10	30
Відносне подовження за розривання, %	600	660	580
Умовна міцність за розривання, МПа	2,4	2,5	3,5
Співвідношення компонентів	100:2	100:2	100:2
Густина, кг/м <sup>3</sup>	1100	1100	1100
Особливості	Дуже м'який, міцний	М'який, міцний	Твердий

3D моделі очисних поршнів виготовляли за такою послідовністю:

- розроблення геометричної форми очисного поршня (до уваги приймалися результати експериментальних досліджень із використанням попередньо виготовлених поршнів);

- розрахунок, оптимізування розмірів очисного поршня (у тому числі з урахуванням результатів експериментальних досліджень із використанням попередньо виготовлених поршнів);

- двовимірне креслення очисного поршня;

- побудова 3D моделі очисного поршня без урахування його фізичних характеристик;

- експериментальне тестування очисного поршня та внесення коректив до проекту (у разі потреби).

Під час розроблення геометричної форми очисних поршнів, оптимізування їх розмірів особливу увагу треба приділяти їх міцності з урахуванням фізико-механічних характеристик гіперпружного матеріалу, діаметра трубопроводу. Розроблено очисні поршні циліндричної, гантелеподібної (дво- і три- кулевої, дискової, циліндричної), багатодискової, циліндрично-одностискової, циліндрично-двостискової, манжетної, чашкової, манжетно-чашкової геометричних форм. За двовимірним кресленням очисних поршнів виготовлено 3D моделі очисних поршнів (рис. 1).

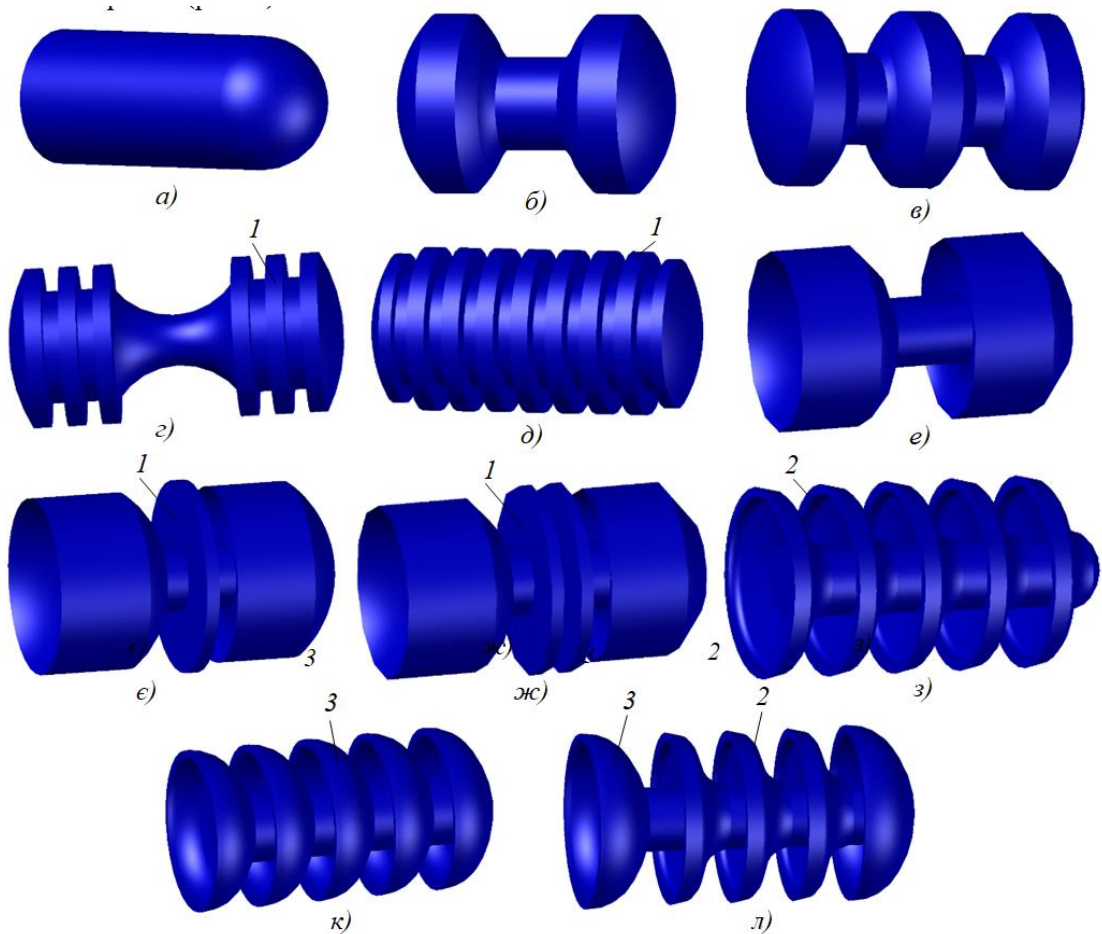
Оскільки, внутрішня стінка ливарної форми повинна повторювати геометричну форму зовнішньої поверхні поршня, то на основі 3D-моделі очисного поршня виготовлено 3D-модель ливарної форми. Приклад 3D моделі ливарної форми подано на рисунку 2, а. Товщину стінки ливарної форми приймали рівною 1,5 мм.

Ливарна форма для очисних поршнів складається зі з'єднаних між собою двох половин. Щоб точно з'єднати дві половини ливарної форми, одна з них має виступи 2 (рис. 2, а). Для заливання силіконового компаунда у ливарних

формах передбачено горловину 3 діаметром 20 мм та довжиною від 10 мм до 30 мм.

Суміш основи і каталізатора готували в окремій вимірювальній ємності. Для визначення об'єму необхідного силіконового компаунда, у програмному комплексі комп'ютерного моделювання визначали об'єм 3D моделі очисного поршня. Недотримання пропорцій основи і каталізатора порушує перебіг хімічної реакції, що призводить до неповного затвердіння силіконового компаунда і наявності рідких включень. Тому під час підготовки суміші конкретної марки ретельно дотримувались пропорцій основи і каталізатора, зазначених виробником компаунда. Після перемішування суміш одразу виливали тонким струменем у горловину ливарної форми крізь лійку вимірювальної ємності так, щоб силікон поступово сам розподілявся в ливарній формі. Зволікання чи повільне виливання може призвести до суттєвого збільшення в'язкості суміші, що ускладнює (унеможливує) виливання, призводить до застигання суміші в вимірювальній ємності або під час лиття і неповного заповнення ливарної форми. Коли силіконовий компаунд полімеризувався, з'єднувач двох половин ливарної форми видаляли, відокремлювали дві половини ливарної форми і виймали очисний поршень. Очисним поршнями із силіконового компаунда різної твердості за шкалою Шор А надано різного забарвлення. Для цього під час перемішування основи і каталізатора до суміші додавали флуоресцентні пігменти. Додавання барвника дало змогу контролювати рівномірність розподілу каталізатора в масі основи. Приклади виливок очисних поршнів із силіконового компаунда подано на рисунку 3, а, б, в.

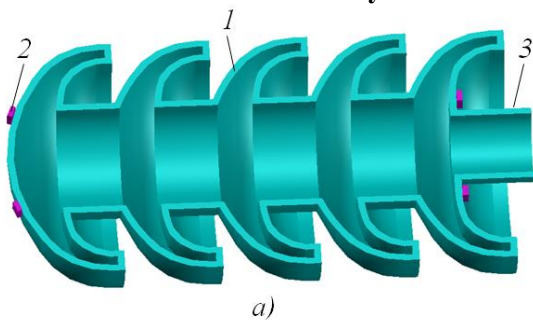
Поліуретан, із якого виготовляли дослідні зразки очисних поршнів, характеризується жорсткістю і міцністю та твердістю 80 одиниць за шкалою Шор А. Поршні із поліуретану виготовляли за такою ж технологічною послідовністю виконання робіт, що й із силіконового



1 – диск; 2 – манжета; 3 – чашка

- а) – циліндрична; б) – гантелеподібна двокулева; в) – гантелеподібна трикулева;  
 г) – гантелеподібна дискова; д) – багатодискова; е) – гантелеподібна циліндрична;  
 ж) – циліндрично-однорискова; з) – циліндрично-дворискова;  
 к) – манжетна; л) – чашкова; л) – манжетно-чашкова

Рисунок 1 – 3D моделі очисних поршнів



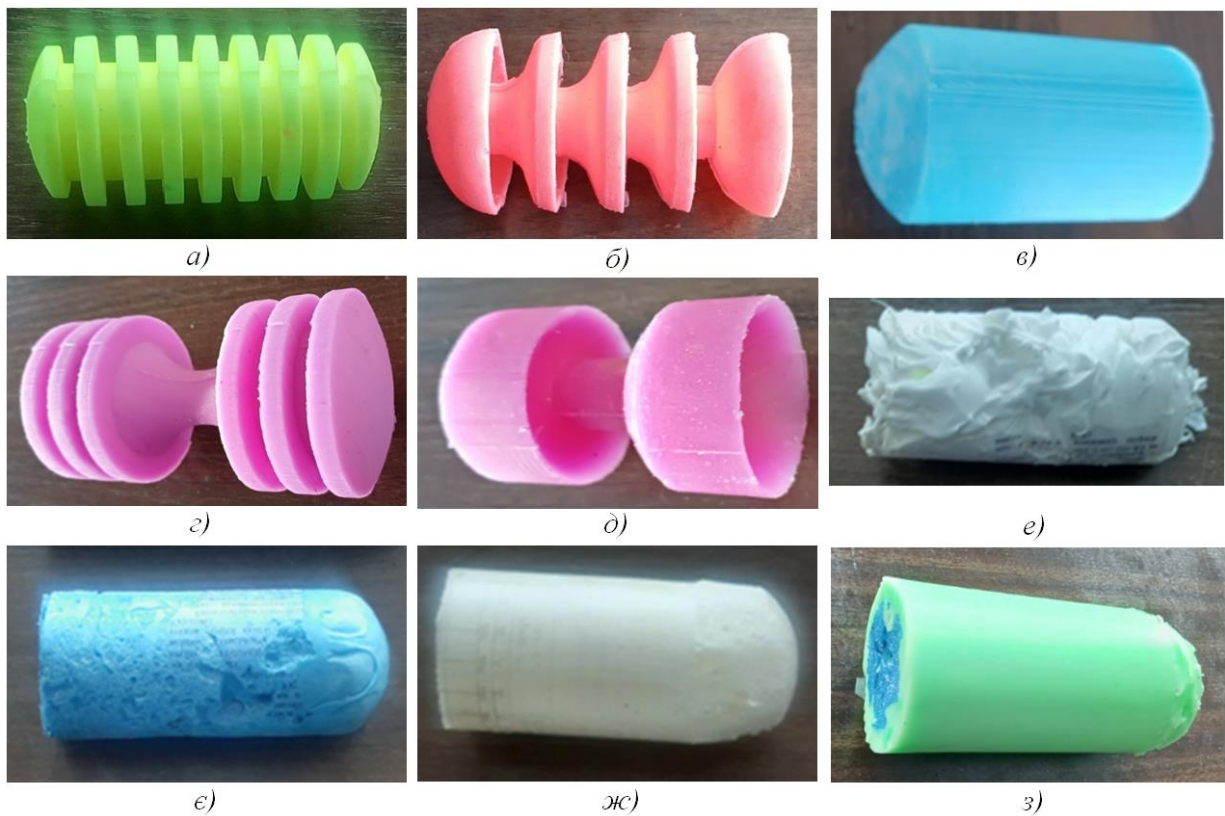
- а) – 3D модель; б) – форми, роздруковані на 3D принтері;  
 1 – ливарна форма; 2 – виступ; 3 – горловина

Рисунок 2 – Ливарні форми

компаунда. Відмінністю є те, що після полімеризації поліуретан сильно прилипає до стінок ливарної форми. Щоб запобігти цьому, обидві половини ливарної форми перед з'єднанням змащували декількома шарами спеціального розділювача для поліуретану. Приклади виливок очисних поршнів із поліуретану подано на рисунку 3, г, д.

Також дослідні зразки поршнів для очищення внутрішньої порожнини трубопроводів виготовляли зі силіконового герметика холодного твердіння густиною  $1020 \text{ кг/м}^3$ , твердістю 18 одиниць за шкалою Шор А. Для виготовлення суцільнолитих очисних поршнів із силіконового герметика розроблено технічну послідовність виконання робіт:





а) – багатодисковий із силіконового компаунда; б) – манжетно-чашковий із силіконового компаунда; в) – циліндричний із силіконового компаунда; г) – гантелеподібний дисковий із поліуретану; д) – гантелеподібний циліндричний із поліуретану; е) – циліндричний із силіконового герметика; є) – циліндричний із пінополіуретану густиною 20-30 кг/м<sup>3</sup>; ж) – циліндричний із пінополіуретану густиною 150-160 кг/м<sup>3</sup>; з) – циліндричний із пінополіуретану, покритого силіконовим компаундом

**Рисунок 3 – Приклади очисних поршнів із гіперпружних матеріалів**

- виготовлення форми;
- підготовка матеріалу;
- заповнення форми силіконовим герметиком;
- забезпечення технічної перерви для твердіння силіконового герметика;
- вилучення очисного поршня з форми;
- контроль якості очисного поршня.

Силіконовий герметик не достатньо добре обтікає внутрішню поверхню форми, тому з нього виготовляли тільки циліндричні очисні поршні. Для виготовлення циліндричних очисних поршнів форму виготовляли з такої ж труби, що й споруджений трубопровід. Щоб полегшити відділення поршня від форми, її внутрішню порожнину обгортали змащеним рослинною олією папером. Силіконовий герметик твердіє взаємодіючи з повітрям докільля, тому заповнену форму витримували відкритою. Час повного затвердіння силіконового герметика за кімнатної температури може перевищувати 4-5 діб. Під час виготовлення очисних поршнів із силіконового герметика можливе неповне затвердіння, значна нерівномірність усадку. Прик-

лад виливки очисного поршня із силіконового компаунда подано на рисунку 3, е.

Що стосується пінополіуретану, то чим більша його густина – тим він міцніший, чим менша – тим пружніший та м'якший. Вироби із пінополіуретану малої густини надзвичайно пружні, гнучкі і здатні повернутися до початкової форми після стиснення (навіть до 75 %) або розтягування (до 45 %). Вироби із пінополіуретану великої густини жорсткі і здатні повернутися до початкової форми після стиснення до 10 %. Дослідні зразки очисних поршнів для очищення внутрішньої порожнини трубопроводів виготовляли з пінополіуретанів різної густини. Пінополіуретану малої густини 20-30 кг/м<sup>3</sup> (піна монтажна еластична FLEXIFOAM Soudal) та пінополіуретану великої густини 150-160 кг/м<sup>3</sup> (піна звичайна монтажна).

Для виготовлення суцільнолитих дослідних зразків очисних поршнів із пінополіуретану розроблено наступну технічну послідовність виконання робіт:

- виготовлення форми;
- підготовка матеріалів, інструментів;



- заповнення форми пінополіуретаном;
- технічна перерва для твердіння пінополіуретану;
- вилучення очисного поршня з форми;
- контроль якості очисного поршня.

Пінополіуретан є пористим спіненим полімером, який на 85-90 % складається з газової фази. Наявність газової фази суттєво зменшує міцність очисного поршня, особливо коли він має складну геометричну форму. Тому з пінополіуретану виготовляли тільки циліндричні очисні поршні. У такому разі форму найкраще виготовити з такої ж труби, що й трубопровід.

Пінополіуретан застигає під впливом вологи повітря, тому після наповнення форми її не можна закривати, а для кращої якості очисного поршня дно форми має бути перфорованим. Форма має бути закріплена таким чином, щоб її дно перебувало у повітрі. Для полегшення відділення очисного поршня від форми її внутрішню порожнину обгортали змащеним рослинною олією папером. Пінополіуретан після виходу із балона збільшується в об'ємі, тому форму заповнювали наполовину. Приклади поршнів із пінополіуретану подано на рисунку 3, є, ж. Щоб збільшити міцність, жорсткість та зносостійкість очисних поршнів із пінополіуретану, їх підсилювали покриванням зовнішньої поверхні силіконовим компаундом (рис. 3, з). Для цього поршень із пінополіуретану виготовляли діаметром, меншим за діаметр форми, а простір між поршнем і формою заливали силіконовим компаундом.

Дослідні зразки очисних поршнів, виготовлені із різних гіперпружних матеріалів, мають різну геометричну форму. Різні гіперпружні матеріали мають різну твердість, модулі пружності, механічну міцність, густину тощо, тому поршні із різних гіперпружних матеріалів різної геометричної форми із різною ефективністю очищують трубопроводи від різних забруднень (рідинних чи твердих накопичень, відкладів на стінці тощо), мають різну прохідну здатність. Для обґрунтованого підбору поршня з метою ефективного очищення трубопроводів систем збирання газу газових родовищ, мереж тепло- та газопостачання та продуманої натурної прогресивної його верифікації необхідні тестування дослідних зразків очисних поршнів, дослідження процесів очищення ними різних ділянок трубопроводу. Під час таких експериментальних тестувань треба визначити прохідну здатність та ефективність очищення трубопроводу кожним з поршнів.

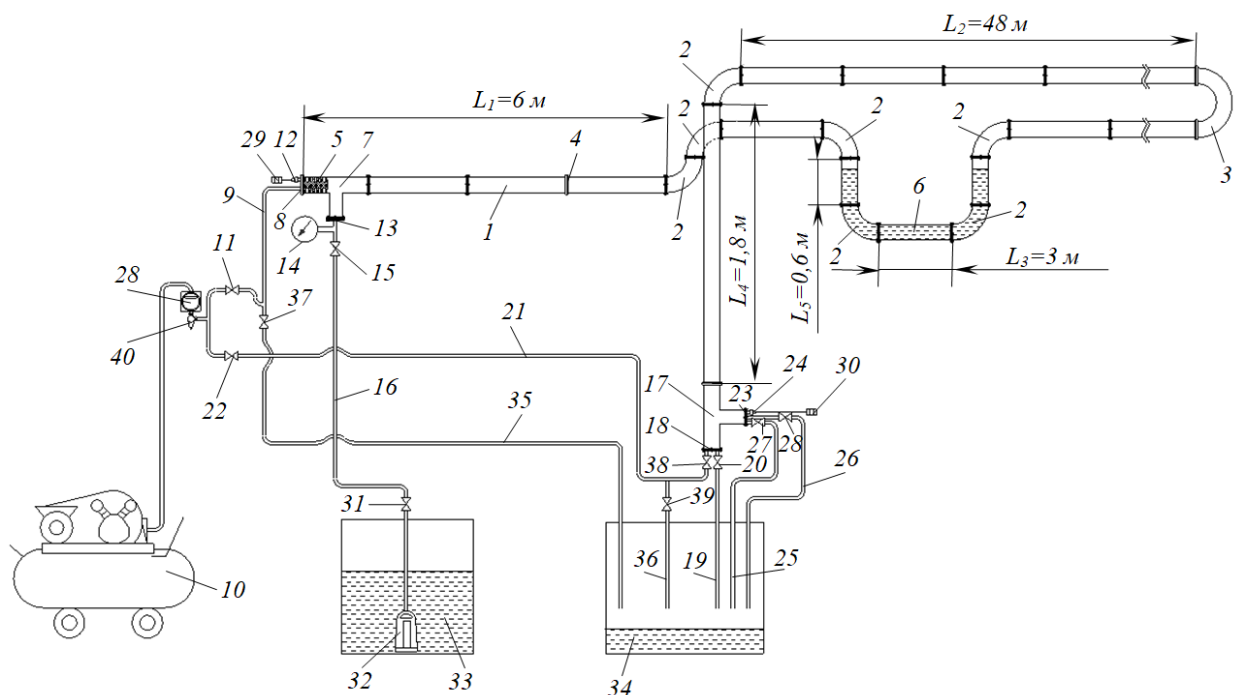
Установка для тестування дослідних зразків очисних поршнів, дослідження ефективності

очищення ними трубопроводів, їх прохідної здатності змонтована у лабораторії трубопровідного транспорту нафти ІФНТУНГ на базі експериментальної установки зі скляних труб. У наявній експериментальній установці змонтовано камеру запускання та камеру приймання поршнів, понижену ділянку трубопроводу і обв'язку, яка забезпечує можливість закачувати воду в понижену ділянку, рухати поршень як в аверсному, так і в реверсному напрямку.

Експериментальна установка складається з трубопроводу загальною довжиною 105 м, виконаного зі скляних труб 1 (рис. 4) зовнішнім діаметром 65 мм, товщиною стінки 5 мм і довжиною 3,4 м кожна, скляних відводів 2 з кутом вигину 90° і радіусом вигину, рівним 1,5DN (де DN – умовний діаметр трубопроводу) та відводу 3 з кутом вигину 180° (рис. 4, рис. 5). Скляні труби 1 та відводи 2 з'єднані між собою фланцями 4 (рис. 4), ущільненими гумовими кільцями та прокладками між скляними трубами 1. Прокладки в деяких фланцях незначно виступають у внутрішню порожнину трубопроводу, що імітує зміщення кромки і напливи металу у внутрішню порожнину трубопроводу в місці зварних з'єднань трубопроводів систем збирання газу газових родовищ, мереж тепло- та газопостачання.

Щоб забезпечити можливість дослідження ефективності очищення поршнем 5 (рис. 4) понижених ділянок трубопроводу вздовж експериментальної установки, змонтовано П-подібну понижену ділянку 6, в яку закачували воду (рис. 6). Для цього демонтовано одну з труб горизонтального скляного трубопроводу. Тоді з труб, відводів і приклеєних до них епоксидним клеєм друкованих на 3D принтері фланців із буртами змонтовано монтажні вузли, з яких виконано понижену ділянку. Понижена ділянка містить дві вертикальні скляні труби довжиною 0,6 м, одну горизонтальну трубу довжиною 3,2 м і чотири скляних відводи з кутом вигину 90° і радіусом вигину, рівним 1,5DN. Загальна довжина пониженої ділянки трубопроводу – 5,1 м.

На початку скляного трубопроводу змонтовано камеру запускання очисних поршнів (рис. 7, а), яку виконано у вигляді скляного трійника 7 (рис. 4) до магістралі і відгалуження якого епоксидним клеєм приклеєно надруковані на 3D принтері фланці з буртами. До фланця, приклеєного до однієї із сторін магістралі трійника (на вході трубопроводу), прикріплено надруковану на 3D принтері заглушку 8 з двома патрубками. До одного з патрубків приєднано шланг лінії подавання повітря 9 з ресивера



1 – скляна труба 65×5; 2 – відвід 90°; 3 – відвід 180°; 4 – фланець; 5 – очисний поршень; 6 – понижена ділянка; 7, 17 – скляний трійник; 8, 13, 18, 23 – заглушка; 9, 21 – лінія подавання повітря; 10 – компресор; 11, 15, 20, 22, 27, 28, 31, 37, 38, 39 – кран; 12, 24 – давач тиску; 14 – манометр; 16 – лінія подавання води; 19, 25, 26, 35, 36 – лінія відведення води з передпоршневого простору; 29, 30 – універсальний лічильник імпульсів; 32 – дренажний водяний насос; 33 – ємність з водою; 34 – скляна мірна ємність; 40 – запобіжний клапан; 41 – газовий лічильник

**Рисунок 4 – Схема установки для тестування дослідних зразків очисних поршнів**



**Рисунок 5 – Установка для тестування дослідних зразків очисних поршнів**

компресора 10 в запоршневий простір та кран 11, а до іншого – давач тиску 12. У свою чергу, до фланця, приклеєного до відгалуження скляного трійника 7, прикріплено надруковану на 3D принтері заглушку 13 із патрубком, до якого приєднано манометр 14, призначений для візуального контролю тиску в трубопроводі, кран 15 та шланг лінії подавання води 16 (рис. 4).

У кінці скляного трубопроводу змонтовано камеру приймання очисних поршнів (рис. 7, б),

яку виконано у вигляді скляного трійника 17 (рис. 4), до магістралі і відгалуження якого епоксидним клеєм приклеєно надруковані на 3D принтері фланці з буртами. До фланця, приклеєного до однієї із сторін магістралі трійника (на виході трубопроводу), прикріплено надруковану на 3D принтері заглушку 18 з двома патрубками. До одного з патрубків приєднано шланг лінії відведення води з передпоршневого простору 19 з краном 20, а до іншого – шланг

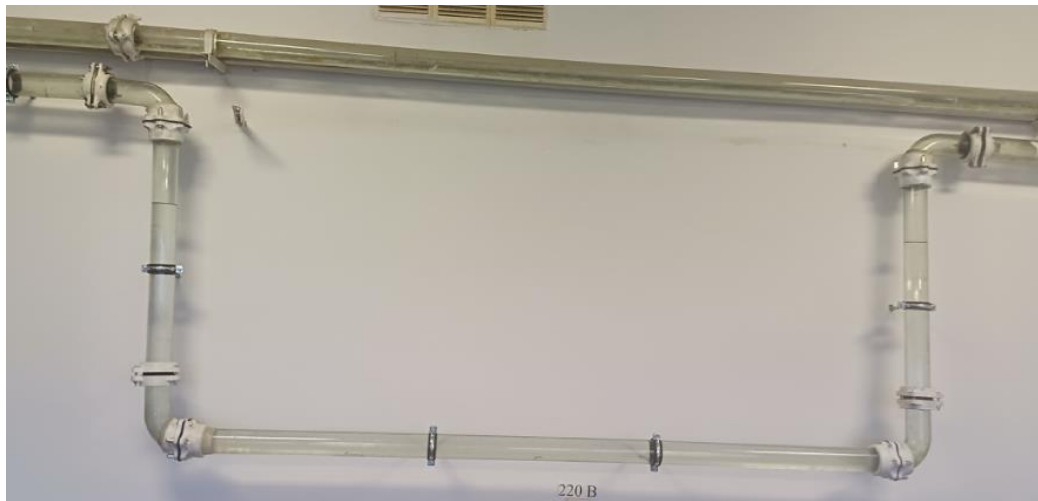


Рисунок 6 – Понижена ділянка трубопроводу



а)

а) – камера запускання поршнів; б) – камера приймання поршнів



б)

Рисунок 7 – Камери запускання та приймання поршнів

лінії подавання повітря 21 з ресивера компресора 10 в запоршневий простір з краном 22. Лінію подавання повітря 21 з ресивера компресора 10 в запоршневий простір приєднували до заглушки 18 для скерування очисного поршня 5 в реверсному напрямі з камери приймання та з місць його застрягання в трубопроводі. До фланця, приклеєного до відгалуження скляного трійника 17, прикріплено надруковану на 3D принтері заглушку 23 з трьома патрубками, до одного з яких приєднано давач тиску 24, а до двох інших – шланги ліній відведення води з передпоршневого простору 25 та 26 з кранами 27 та 28 відповідно. Така кількість ліній відведення води з передпоршневого простору необхідна для запобігання виникненню гідравлічного удару, який може відбутись у результаті виведення у камеру приймання очисним поршнем 5 великої кількості рідинних забруднень.

Для моніторингу та аналізу зміни тиску під час руху дослідних зразків очисних поршнів

установка обладнана двома давачами тиску 12 та 24 для води, газу, повітря G1/4, які закріплені в патрубках заглушок 8 та 23 камер запускання та приймання поршнів (рис. 4). Давачі тиску 12 та 24 під'єднано до універсальних лічильників імпульсів 29 та 30 (smart-MAC D105) відповідно, які, в свою чергу, під'єднано до бездротової мережі WiFi. Через бездротову мережу WiFi лічильників імпульсів передають результати вимірювань на «хмарний» сервер даних, де здійснювалась візуалізація та аналіз даних.

Обв'язку експериментальної установки зроблено таким чином, щоб після відкриття кранів 31 та 15 була можливість закачувати воду дренажним водяним насосом 32 з ємності 33 або мережі водопостачання в понижену ділянку трубопроводу 6 до запускання очисного поршня 5, а після проходження поршнем усієї довжини трубопроводу, змінювати його напрям руху з аверсного на реверсний (рис. 4). При



Рисунок 8 – Обв'язка експериментальної установки

цьому видалена поршнем 5 вода зливалась лініями відведення води з передпоршневого простору в скляну мірну ємність 34. Для цього обв'язка містить лінії подавання повітря в запоршневий простір 9, 21, лінії відведення води з передпоршневого простору 19, 25, 26, 35, 36, крани 20, 27, 28, 37, 38, 39 (рис. 4, рис. 8).

Для зміни напрямку руху очисного поршня 5 змонтовано вузол переключення, який містить крани 11 та 22 на лініях подавання повітря в запоршневий простір 9 та 21 відповідно, кран 37 на зливній лінії 35 (рис. 4). Також на вході вузла перемикачів напряму руху очисного поршня 5 змонтовано запобіжний клапан 40 та роторний газовий лічильник 41. Запобіжний клапан 40 призначений для скидання тиску з системи, якщо він буде більший 0,2 МПа, щоб запобігти зриву приклеєних до скляних труб фланців з буртами, розриву скляного трубопроводу.

Експериментальна установка комплектувана компресором 10 (модель Dnipro-M AC-100 VG потужністю 2,2 кВт і об'ємом ресивера 100 л (рис. 4). Такого об'єму ресивера достатньо, щоб поршень пройшов усім трубопроводом без зупинок і підкачувань.

Перед запасуванням кожного дослідного зразка очисного поршня 5 в камеру запускання установки визначали його матеріал, геометричну форму, довжину і масу. Тоді демонтували заглушку 8 камери запускання (рис. 4) та запасували очисний поршень 5 у магістраль скляного трійника 7. Після монтажу заглушки 8 камери запускання дренажним водяним насосом 32 або з водопровідної мережі заливали воду в понижену ділянку 6 експериментальної установки до відміток рівня.

Щоб визначити обсяг забруднень, який кожен очисний поршень 5 виносить із скляного трубопроводу в кінцеву точку, відкривали крани 20, 27, 28 та 39 лінії відведення води з передпоршневого простору 19, 25, 26 та 36 відповідно, і вода з повітрям із передпоршневого простору потрапляла в мірну зливну ємність 34 (рис. 4, рис. 8). Тоді визначали об'єм води в мірній зливній ємності 34 (рис. 4), вимірювали рівень води в пониженій ділянці трубопроводу 6 та розраховували об'єм води в ній. Під час руху кожного дослідного зразка очисного поршня 5 виконували відеозапис та запис даних давачів тиску 12 і 24.

### Результати та обговорення

Динаміка руху дослідних зразків очисних поршнів залежала від величини тиску в запоршневому просторі, витрати повітря та сили тертя між бічною поверхнею поршня і внутрішньою стінкою трубопроводу. У свою чергу, на величину сили тертя впливали форма та матеріал очисного поршня, стан у якому перебував поршень (спокій, рух), наявності перешкод вздовж трубопроводу (відводів, виступів резинових ущільнень у місці з'єднань скляних труб у внутрішню порожнину).

Тому рух дослідних зразків очисних поршнів експериментальною установкою розбито на чотири окремі етапи:

- старт у камері запускання;
- рух горизонтальною ділянкою трубопроводу;
- рух пониженою ділянкою трубопроводу;
- тимчасова зупинка в місцях гумових ущільнень.



Після подавання повітря з ресивера компресора у запоршневий простір розміщеного в камері запускання поршня (рис. 7, а) тиск збільшувався до того моменту, коли зумовлена ним сила не ставала більшою сили тертя спокою між бічною поверхнею поршня і внутрішньою стінкою трубопроводу. У цей момент відбувався старт руху поршня, і він набував значного прискорення, оскільки сила тертя спокою змінювалась на силу тертя ковзання, яка є суттєво меншою від неї. Також у результаті швидкого старту очисного поршня відбувалось різке зменшення тиску в запоршневому просторі, а під час подальшого руху він зменшувався поступово. У результаті різкого зменшення тиску поршень сповільнювався, і далі його швидкість ставала практично незмінною.

Сила, під дією якої поршень рухався горизонтальною прямолінійною ділянкою трубопроводу, зумовлена різницею тиску у запоршневому просторі і тиску перед поршнем. Протидіє цій силі сила тертя ковзання між бічною поверхнею поршня та внутрішньою стінкою трубопроводу. Коли поршень рівномірно рухається горизонтальною прямолінійною ділянкою з постійною швидкістю, сила тиску та сила тертя ковзання між бічною поверхнею поршня та внутрішньою стінкою трубопроводу врівноважені. Тому найбільший тиск у запоршневому просторі потрібен був, щоб рухались циліндричні поршні із силіконового компаунда, силіконового герметика, оскільки їх маса є найбільшою (біля 300 г). Такий тиск складав від 0,025 до 0,030 МПа. Натомість найменшу масу мають поршні із пінополіуретану (від 10 до 40 г), і тому, щоб забезпечити їх рух, потрібен був невеликий тиск у запоршневому просторі, який складав від 0,003 до 0,006 МПа.

Поршні із силіконового компаунда складної геометричної форми (гантелеподібний (дво- і три кулевий, дисковий, циліндричний), багатодисковий, циліндрично-односторонній, циліндрично-двосторонній, манжетний, чашковий, манжетно-чашковий) мають масу від 100 г до 250 г, і для їх руху потрібний тиск від 0,010 МПа до 0,025 МПа. Причиною того, що для поршнів складної геометричної форми меншої маси потрібен наближено такий ж тиск, як для циліндричних поршнів більшої маси, є те, що на величину сили тертя і, відповідно, тиску в запоршневому просторі має вплив контактна сила між бічною поверхнею поршнів і внутрішньою стінкою труб. У свою чергу, контактна сила залежить від геометричної форми очисного поршня. Оскільки диски, манжети та чашки очисних поршнів мають діаметр більший, ніж

внутрішній діаметр трубопроводу, вони з більшою силою притискаються до внутрішньої стінки, що покращує ефективність очищення, але призводить до збільшення сили тертя.

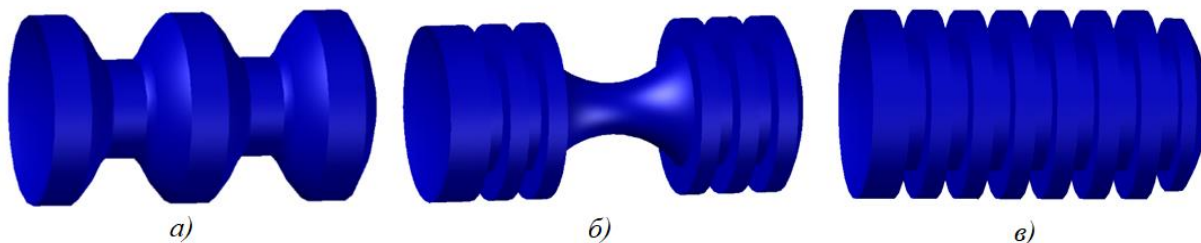
Швидкість руху очисних поршнів горизонтальними прямолінійними ділянками трубопроводу залежала від витрати повітря. Щоб поршні рухались з швидкістю від 2 до 5 м/с, за якої очищення трубопроводів є найефективнішим, витрата повітря на вході трубопроводу повинна складати від 0,0005 до 0,0010 м<sup>3</sup>/с.

Скляні труби та відводи експериментальної установки з'єднані між собою фланцями, ущільненими гумовими кільцями та прокладками між скляними трубами. У деяких з'єднаннях прокладки незначно виступають у внутрішню порожнину трубопроводу. Такі виступи у внутрішню порожнину трубопроводу зустрічаються в місці зварних з'єднань трубопроводів систем збирання газу газових родовищ, мереж теплогазопостачання, що зумовлено зміщенням кромки і напливами металу у внутрішню порожнину трубопроводу. Виступи гумових прокладок у внутрішню порожнину трубопроводу призводили до незначного деформування (стискання) поршня і збільшення контактних сил, величина яких залежала від різниці діаметрів дисків, манжет, чашок та внутрішнього діаметра трубопроводу, а також твердості за шкалою Шор А матеріалу, з якого виготовлено поршень. У свою чергу, збільшення контактних сил призводило до збільшення сили тертя. Тому, коли сума сили тиску в запоршневому просторі і сили інерції ставала меншою, ніж сила тертя між бічною поверхнею поршня та гумовими ущільненнями труб і внутрішньою стінкою скляних труб, відбувалась зупинка руху поршня, і виникало перегітання повітря через нього (рис. 9). Найчастіше такі процеси спостерігались під час досліджень прохідної здатності гантелеподібних (двокулевих, трикулевих, дискових) (рис. 1, б, в, г) та багатодискових очисних поршнів (рис. 1, д) із силіконового компаунда та поліуретану, які мають опуклий задній торець та циліндричних з силіконового герметика (рис. 2, е), поліуретану і пінополіуретану великої густини (рис. 2, ж).

Найкраще місця виступів гумових прокладок у внутрішню порожнину трубопроводу проходили чашкові (рис. 1, к) та манжетно-чашкові (рис. 1, з) дослідні зразки очисних поршнів із силіконового компаунда, зупинки яких не спостерігались навіть при мінімальній швидкості їх руху. Поодинокі випадки зупинки у місцях виступів прокладок у внутрішню порожнину трубопроводу спостерігались під час



**Рисунок 9 – Застрягання гантелеподібного трикулевого очисного поршня зі силіконового компаунда в місці резинового ущільнення з'єднання скляних труб і перетікання через нього повітря**



*а) – гантелеподібна трикулева; б) – гантелеподібна дискова; в) – багатодискова*

**Рисунок 10 – Удосконалені 3D моделі очисних поршнів**

руху чашкових та манжетно-чашкових дослідних зразків очисних поршнів із поліуретану та циліндричних із пінополіуретану малої густини.

Коли дослідні зразки очисних поршнів зупинялись у місці виступів гумових ущільнень у внутрішню порожнину трубопроводу, тиск у запоршневому просторі збільшувався. Величина цього тиску залежала від величини перетікання повітря через поршень. Якщо сила тиску ставала більшою сили тертя спокою між бічною поверхнею поршня та гумовими прокладками і внутрішньою стінкою скляних труб, поршень зрушувався і суттєво прискорювався, оскільки відбувалось раптове зменшення значних сил тертя. Також після виходу очисного поршня з гумових прокладок відбувалось зменшення тиску в запоршневому просторі до величини, необхідної, щоб долати сили тертя ковзання, що призводило до сповільнення руху поршня після прискорення. Оскільки через поршні з опуклим заднім торцем було значне перетікання повітря під час їх зупинки у місці виступів гумових ущільнень у внутрішню порожнину трубопроводу, то суттєвого збільшення тиску в запоршневому просторі не відбувалось. І тому такі очисні поршні застрягали в трубо-

проводі. Щоб зрушити застряглий поршень у трубопроводі, подавали воду. Якщо це не давало результату, то до потоку води компресором додавали потік повітря, що розганяло воду і створювало гідроудар в запоршневому просторі. У результаті гідроудару відбувалось суттєве збільшення тиску в запоршневому просторі і зрушення поршня.

Щоб збільшити прохідну здатність гантелеподібних (двокулевих, трикулевих, дискових) та багатодискових очисних поршнів, їх геометричну форму, а саме опуклий задній торець було змінено на увігнутий (рис. 10), що мінімізувало випадки їх застрягання в місцях виступів гумових прокладок у внутрішню порожнину трубопроводу.

Ефективність очищення дослідними зразками очисних поршнів пониженої ділянки трубопроводу визначали шляхом порівняння об'єму залишку води в ній після проходження кожного поршня. Встановлено, що найефективнішими є очисні поршні манжетно-чашкової і манжетної геометричної форми: після їх проходження у внутрішній порожнині пониженої ділянки трубопроводу води не залишалось (рис. 11). Також ефективними є гантелеподібні, багатодисковий, чашковий, циліндричний із





а)



б)

а) – понижена ділянка трубопроводу; б) – горизонтальна ділянка трубопроводу

**Рисунок 11 – Очищення трубопроводу манжетно-чашковим поршнем із силіконового компаунда**

силіконового компаунда та поліуретану і циліндричний із пінополіуретану, після проходження яких пониженою ділянкою трубопроводу об'єм залишку води був мінімальним. Найменш ефективним для очищення пониженої ділянки трубопроводу виявився очисний поршень із силіконового герметика. Причиною цього є неякісна бічна поверхня таких поршнів, яка містить борозни, впадини (рис. 3, е).

Щоб оцінити ефективність очищення горизонтальних ділянок трубопроводу дослідними зразками очисних поршнів, визначали об'єм залишку води у їх внутрішній порожнині після проходження кожного очисного поршня. Для цього визначали об'єм винесеної поршнем води із пониженої ділянки трубопроводу та об'єм води в мірній зливній ємності після того, як поршень зупинявся в камері приймання. Різниця між цими об'ємами є залишком води в горизонтальних ділянках трубопроводу після проходження очисного поршня.

Порівнянням об'єму залишку води в горизонтальних ділянках трубопроводу після проходження дослідних взірців очисних поршнів встановлено, що найефективнішими є поршні манжетно-чашкової, манжетної геометричної форми із поліуретану. Після їх проходження у внутрішній порожнині горизонтальних ділянок трубопроводу об'єм залишку води був найменшим і складав від 0,0006 до 0,0007 м<sup>3</sup>. Найменш ефективним для очищення горизонтальної ділянки трубопроводу є циліндричний очисний поршень із силіконового герметика: об'єм залишку рідких забруднень після його проходження складав 0,0191 м<sup>3</sup>.

Наступним кроком після лабораторного тестування очисних поршнів має бути прогресивна верифікація очисного поршня в умовах трубопроводів систем збирання газу газових

родовищ, мереж тепло- та газопостачання. Необхідність такого підходу обумовлена тим, що переважна більшість трубопроводів таких систем є унікальними, що вимагає індивідуального підбору поршня.

Оскільки очищення кожного трубопроводу буде виконуватись вперше, то потрібно скласти план прогресивної верифікації. Такий план мінімізує ризик застрягання поршнів та дасть змогу підібрати поршень для ефективного очищення газопроводу. Прогресивну верифікацію очисного поршня треба виконати з урахуванням стану кожного трубопроводу (наявність рідких, твердих забруднень у внутрішній порожнині, твердих відкладів на внутрішній стінці), його прохідності (наявність фітингів (крутовигнутих відводів, трійників, перехідників із більшого на менший діаметр труб і навпаки), значних напливів чи зміщень кромки у місці зварних з'єднань, вм'ятин тощо), режимів роботи (витрата, тиск) серією запускань тестових поршнів. Такий підхід дасть можливість переконатись у прохідності трубопроводу, підібрати геометричну форму і матеріал поршнів для максимально ефективного очищення, визначити, чи правильно налаштоване все обладнання, зокрема вузли запускання-приймання поршнів.

Особливо детально план верифікації треба опрацьовувати, якщо трубопроводи містять перехідники з одного діаметра на інший, трійники, значні відкладення на внутрішній стінці, малий тиск на вході та немає достатньої інформації про стан внутрішньої порожнини, можливу наявність механічних перешкод у трубопроводі, конструктивні особливості трубопроводу (радіуси вигину відводів, параметри трійників тощо).

Найперше доцільно запускати саморуйнівні тестові поршні з матеріалу найменшої твер-

дості за шкалою Шор А, розроблені Р. Кондра- том [8], Українським науково-дослідним інсти- тутом природних газів (С. Стецюк [6]). Також такі тестові запускання дадуть змогу визначи- ти, чи вистачає тиску для проходження порш- нем усього газопроводу і видалення при цьому забруднень. У разі, якщо пропусканням само- руйнівних поршнів не буде видалено більшої частини забруднень із внутрішньої порожнини трубопроводу, їх стан буде надавати розуміння того, які тестові поршні можуть бути наступ- ними. Найдоцільніше, щоб наступний поршень був циліндричний із пінополіуретану малої гу- стини, який сильно деформується під тиском у разі застрягання, а для його руху потрібен не- великий тиск у запоршневому просторі.

Результати огляду літературних джерел, виконаних експериментальних досліджень дали змогу скласти рекомендований план прогреси- вної верифікації очисних поршнів для трубоп- роводів систем збирання газу газових родовищ, мереж тепло- та газопостачання, який полягає в наступному:

- запускання саморуйнівного очисного поршня;
- запускання пінополіуретанового поршня малої густини (20-30 кг/м<sup>3</sup>);
- запускання манжетно-чашкового поршня із силіконового компаунда з твердістю за шка- лою Шор А від 5 до 40 одиниць;
- запускання манжетно-чашкового поршня із поліуретану з твердістю за шкалою Шор А від 50 до 90 одиниць;
- прогресивне запускання поршнів із силі- конового компаунда, поліуретану різної геоме- тричної форми (дискові, циліндричні, гантеле- подібні тощо різної твердості за шкалою Шор А) до моменту повного видалення усіх забруд- нень (рідинних чи твердих накопичень, відкла- дів на стінці тощо).

Поступово збільшувати твердість та/або діаметр елементів очисних поршнів треба до тих пір, поки усі забруднення не буде видалено з трубопроводу (під час виходу поршня із не- пошкодженими ущільнювальними елементами перед і за ним не буде забруднень, а перепад тиску в трубопроводі буде мінімальним). Для очищення внутрішньої порожнини газопроводу від твердих забруднень твердість ущільнюва- льних елементів поршня має бути більшою, ніж від рідинних забруднень. Для таких очищень рекомендовано останніми запускати дискові очисні поршні із поліуретану.

## Висновки

Найкращими з досліджуваних матеріалів для виготовлення очисних поршнів складної геометричної форми виявилися силіконовий компаунд на олов'яному каталізаторі (полікон- денсаційний) твердістю від 5 до 30 одиниць за шкалою Шор А та поліуретан з твердістю від 60 до 90 одиниць за шкалою Шор А, які прості у використанні, добре обтікають внутрішню поверхню ливарної форми, є міцними і пруж- ними. Ливарну форму для таких очисних пор- шнів доцільно виготовляти 3D друком. Очисні поршні із пінополіуретану найлегше виготов- ляти, і вони є найдешевшими. Бічна поверхня очисних поршнів із силіконового герметика містить глибокі борозни, впадини, а тому вони мають низьку прохідну здатність та неефектив- но очищують трубопровід.

Перевагами розробленої і змонтованої екс- периментальної установки для тестування дос- лідних зразків очисних поршнів є те, що вона виготовлена з прозорих труб та містить протя- жні горизонтальні і понижену ділянку трубоп- роводу, крутовигнуті відводи, камери запус- кання та приймання поршнів, обв'язку, яка за- безпечує можливість закачувати воду в перед- поршневий простір та рухати очисні поршні як в аверсному, так і в реверсному напрямі, пере- шкоди у внутрішній порожнині, які імітують різні ускладнення, що можуть зустрітись у реал- ьних умовах. Також експериментальна уста- новка обладнана давачами тиску, лічильником витрати повітря, запобіжним клапаном для зменшення тиску у критичних ситуаціях.

Найкращу прохідну здатність мають чаш- кові та манжетно-чашкові очисні поршні із си- ліконового компаунда та поліуретану, цилін- дричні із пінополіуретану малої густини. Поршні для очищення трубопроводів систем збирання газу газових родовищ, мереж тепло- та газопо- стачання повинні мати увігнутий задній торець, що суттєво збільшує їх прохідну здатність. Од- ним з ефективних способів видалення застряг- лого у трубопроводі поршня є закачування води з додаванням до неї потоку повітря, що ство- рює гідрудар в запоршневому просторі.

Найефективнішими поршнями для очи- щення горизонтальних і понижених ділянок трубопроводів від рідинних забруднень є ман- жетно-чашкові і манжетні ущільнювальні, еле- менти яких притискаються до внутрішньої сті- нки трубопроводу. Після їх проходження у вну- трішній порожнині пониженої ділянки експе- риментальної установки води не було, а у про- тяжній горизонтальній ділянці її був най-

менший об'єм, порівняно з об'ємом, який залишався після проходження інших поршнів.

Відсутність повної інформації про стан внутрішньої порожнини трубопроводів систем збирання газу газових родовищ, мереж теплогазопостачання вимагає виконання прогресивної верифікації поршня, що дасть змогу мінімізувати випадки їх застрягань та підібрати максимально ефективний поршень для очищення трубопроводу залежно від складу забруднень у його внутрішній порожнині, наявності різних ускладнень для руху поршня (крутовигнутих відводів, перехідників із більшого на менший діаметр труб, зміщень кромки та напливів у місці зварних швів тощо), профілю траси тощо. Одержані результати експериментальних досліджень можуть бути основою для такої верифікації.

Перспективи подальшої роботи в даному напрямку полягають у оптимізації геометричних розмірів, твердості чашкових та манжетно-чашкових та дискових очисних поршнів, дослідженні динаміки руху поршнів із різних гіперпружних матеріалів різної геометричної форми фасонними елементами трубопроводів (крутовигнутими відводами, перехідниками з більшого на менший діаметр труб та трійниками).

### References

1. Doroshenko Ya. V., Karpash M. O., Hozhaiev B. N. Study of the composition of pipeline gas-liquid flows and the influence of harmful impurities present in them on pumping modes, energy consumption for transportation. *Prospecting and Development of Oil and Gas Fields*. 2019. Vol. 4(73). P. 35-45. doi: [10.31471/1993-9973-2019-4\(73\)-35-45](https://doi.org/10.31471/1993-9973-2019-4(73)-35-45). [in Ukrainian]
2. Volovetskyi V. B., Doroshenko Ya. V., Kogut G. M., Dzhus A. P., Rybitskyi I. V., Doroshenko J. I., Shchyrbay O. M. Investigation of gas gathering pipelines operation efficiency and selection of improvement methods. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*. 2021. Vol. 107(2). P. 59-74. doi: [10.5604/01.3001.0015.3585](https://doi.org/10.5604/01.3001.0015.3585).
3. Volovetskyi V. B., Doroshenko Ya. V., Bugai A. O., Kogut G. M., Raiter P. M., Femiak Y. M., Bondarenko R. V. Developing measures to eliminate of hydrate formation in underground gas storages. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 2022. Vol. 111(2). P. 64-77. doi: [10.5604/01.3001.0015.9996](https://doi.org/10.5604/01.3001.0015.9996).
4. Lie R., Craig S. Operational pigging programs and stuck pig recovery from gas export pipeline. *Materials of the PPSA Seminar Aberdeen: Pigging Products & Services Association*. 2009. P. 1-9.
5. Zhou J., Deng T., Peng J., Liang G., Zhou X., Gong J. Experimental study on pressure pulses in longdistance gas pipeline during the pigging process. *Science Progress*. 2020. Vol. 103 (1). P. 1-23. doi: [10.1177/0036850419884452](https://doi.org/10.1177/0036850419884452).
6. Stetsiuk S. Experimental studies of the effectiveness of cleaning the internal cavity of pipelines with pistons made of hyperelastic materials. *Oil and Gas Power Engineering*. 2022. Vol. 2(38). P. 62-75. doi: [10.31471/1993-9868-2022-2\(38\)-62-75](https://doi.org/10.31471/1993-9868-2022-2(38)-62-75). [in Ukrainian]
7. Liang Z., Jiawei Z., He H. Modeling and Simulation of Pigging for a Gas Pipeline Using a Bypass Pig. *Mathematical Problems in Engineering*. 2020. Vol. 1-12. doi: [10.1155/2020/2047352](https://doi.org/10.1155/2020/2047352).
8. Kondrat R. M., Uhrynovskiy A. V., Petryshak V. S., Sapozhkova T. S. Characteristics and selection of cleaning devices for cleaning the internal cavity of pipelines. *Prospecting and Development of Oil and Gas Fields*. 2013. Vol. 3(48). P. 48-61. doi: [10.31471/1993-9868-2022-2\(38\)-62-75](https://doi.org/10.31471/1993-9868-2022-2(38)-62-75). [in Ukrainian]
9. Winters B. Cleaning Pig Designs and Applications. *2011 Nace Central Area Conference*. Houston, Texas: Williams, 2011. P. 1-24.
10. Nieckele A., Braga M., Azevedo L. Transient Pig Motion Through Non-Isothermal Gas and Liquid Pipelines. In *3rd International Pipeline Conference*. Calgary, Alberta: ASME, 2000. P. 611-618. doi: [10.1115/IPC2000-175](https://doi.org/10.1115/IPC2000-175)
11. Borregales M., Ensalsado R., Asuaje M. CFD Analysis of Phenomena Attributed to Pigging Run in a Straight Pipeline. *Proceedings of the ASME 2014 International Mechanical Engineering Congress & Exposition IMECE 2014*. Montreal: ASME, 2014. P. 1-9. doi: [10.1115/IMECE2014-37452](https://doi.org/10.1115/IMECE2014-37452)
12. Hrudz Ya. V., Melnytska L. I. Unstationary processes in a gas pipeline during the movement of mechanical devices. *Prospecting and Development of Oil and Gas Fields*. 2016. Vol. 1(58). P. 69-81. [in Ukrainian]
13. Hrudz Ya. V., Slobodian N. B. Increasing the efficiency of cleaning gas pipes by adjusting the movement speed of cleaning devices. *Oil and Gas Power Engineering*. 2020. Vol. 1(33). P. 29-35. doi: [10.31471/1993-9868-2020-1\(33\)-29-35](https://doi.org/10.31471/1993-9868-2020-1(33)-29-35). [in Ukrainian]
14. Kim S., Jongyeon J., Yoo K., Yoo H., Seo Y. Experimental investigation on speed excursion of PIG due to friction variation in natural

gas pipeline. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. 2022. Vol. 104, August. P. 46-59. doi: [10.1016/j.jngse.2022.104659](https://doi.org/10.1016/j.jngse.2022.104659).

15. Wang W., Huang Q., Liu Y., Sepehrnoori K. Experimental Study on Mechanisms of Wax Removal During Pipeline Pigging. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition held in Houston*. Texas: Society of Petroleum Engineers, 2015. P. 1-25. doi: [10.2118/174827-MS](https://doi.org/10.2118/174827-MS).

16. Chen Z., Qiu X., Yang L. Deformation and stress analysis of cup on pipeline inspection gauge based on reverse measurement. *Energy Science & Engineering*. 2022. Vol. 10(7). P. 2509-2526. doi: [10.1002/ese3.1241](https://doi.org/10.1002/ese3.1241).

17. Cao Y., Zhen Y., Shi Y., Zhang S., Sun Y., Nie W. Stress Distribution of the Power Section Cup of Pipeline Inspection Gauges by Finite Element Method. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*. 2018. Vol. 9(2). P. 1-11. doi: [10.1061/\(ASCE\)PS.1949-1204.0000308](https://doi.org/10.1061/(ASCE)PS.1949-1204.0000308).

18. Molyneux D. Dewatering unpiggable gas gathering line with elastomeric pig. *Materials of the PPSA Seminar*. Aberdeen: Pigging Products & Services Association, 2017. P. 1-4.

19. O'Donoghue A. Why Pigs get Stuck, and how to avoid it. In *Pipeline Pigging, Integrity Assessment, and Repair Conference*. Amsterdam: Pipeline Research Limited, 2002. P. 1-16.

20. Ward P., Cockfield D. Development of the pathfinder foam caliper pig. *Materials of the PPSA Seminar*. Aberdeen: Pigging Products & Services Association, 2018. P. 1-10.

21. Matta L. Pipe explosion during pigging procedure. *Pipeline and Gas Journal*. 2008. Vol. 235(10). P. 84-86.

22. Solghar A., Davoudian, M. Analysis of transient PIG motion in natural gas pipeline. *Mechanics & Industry*. 2012. Vol. 13. P. 293-300. doi: [10.1051/meca/2012039](https://doi.org/10.1051/meca/2012039).

23. Lesani M., Rafeeyan M., Sohankar A. Dynamic Analysis of Small Pig through Two and Three-Dimensional Liquid Pipeline. *Journal of Applied Fluid Mechanics*. 2012. Vol. 5(2). P. 75-83. doi: [10.36884/jafm.5.02.12170](https://doi.org/10.36884/jafm.5.02.12170).

24. Zhu X., Fu C., Wang Y., Zhang S. Experimental research on the contact force of the bi-directional pig in oil and gas pipeline. *Petroleum Science*. 2023. Vol. 20(1). P. 474-481. doi: [10.1016/j.petsci.2022.08.021](https://doi.org/10.1016/j.petsci.2022.08.021).

25. Heijer A. *Frictional behaviour of pigs in motion*. (Report number: 2732, Technische Universiteit Delft, Delft, Netherlands). 2016.