

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ОЧИЩЕННЯ ВНУТРІШНЬОЇ ПОРОЖНИНИ ТРУБОПРОВОДІВ ПОРШНЯМИ ІЗ ГІПЕРПРУЖНИХ МАТЕРІАЛІВ

С. М. Стецюк

УкрНДІгаз; 61125, м. Харків, Гімназійна набережна, 20; тел. (057) 7304585;
e-mail: stetsyuk.sergey@ugv.com.ua

Розглянуто проблемні питання, які виникають під час очищення систем збору газу газових родовищ очисними поршнями. Наведено вимоги, яким повинен відповідати матеріал поршнів призначених для очищення внутрішньої порожнини шлейфів свердловин від рідинних забруднень. Обґрунтовано доцільність поршні для очищення складних трубопровідних систем виготовляти із гіперпружних матеріалів. Виготовлено циліндричні очисні поршні з гіперпружних матеріалів із різними фізико-механічними характеристиками (пінополіуретан різної щільності, пінополіуретан покритий уретаном, саморуйнівна пружно-полімерна композиція, силіконовий герметик, силіконовий компаунд). Розроблено і змонтовано лабораторні експериментальні установки із скляних труб і відводів для оцінювання ефективності очищення поршнями із гіперпружних матеріалів горизонтальних і понижених ділянок трубопроводів, дослідження динаміки руху поршнів. Запропоновано технічне рішення з зміни аверсного напрямку руху поршня на реверсний після проходження поршнем усього експериментального трубопроводу. Експериментально досліджено динаміку руху поршнів із гіперпружних матеріалів трубопроводами, визначено чинники які впливають на ефективність очищення. Встановлено при якій швидкості руху поршнів ефективність очищення горизонтальних прямолінійних ділянок трубопроводу є максимальною. Описано сили, які діють на поршень під час початку його руху трубопроводом, руху із сталою швидкістю, тимчасової зупинки в місці застрягання. Розглянуто основні чинники, які чинять вплив на силу тертя між поршнем і внутрішньою стінкою трубопроводу. Встановлено можливі місця і причини тимчасової зупинки поршнів із гіперпружних матеріалів у трубопроводах та негативні наслідки до яких це може призвести. Експериментально виявлено, що через усі досліджувані поршні із гіперпружних матеріалів відбувається перетікання повітря, яке подається у запоршневий простір. Таке перетікання сприяло підвищенню якості очищення трубопроводу. Надано рекомендації щодо сфери застосування поршнів із різних гіперпружних матеріалів.

Ключові слова: шлейф свердловини; очисний поршень; пінополіуретан; силікон; рідинні забруднення; швидкість руху.

Problematic issues that arise during the cleaning of gas gathering systems of gas fields with cleaning pigs are considered. The requirements that must be met by the pig's material intended for cleaning the inner cavity of well plumes from liquid pollution are given. The expediency of making pigs for cleaning complex pipeline systems from hyperelastic materials is substantiated. Cylindrical cleaning pistons made of hyperelastic materials with different physical and mechanical characteristics (polyurethane foam of different densities, urethane-coated polyurethane foam, self-destructive elastic-polymer composition, silicone sealant, silicone compound) were manufactured. Laboratory experimental installations made of glass pipes and branches were developed and installed to evaluate the efficiency of cleaning horizontal and low-lying sections of pipelines with pistons made of hyperelastic materials and to study the pig movement dynamics. A technical solution to change the forward direction of the pig movement to the reverse direction after the pig passes through the entire experimental pipeline is proposed. The pig movement dynamics of hyperelastic materials in pipelines was experimentally investigated, and the factors that affect the cleaning efficiency were determined. It is established at what speed of pig movement the cleaning efficiency of horizontal straight sections of the pipeline is maximized. The forces acting on the pig at the beginning of its movement through the pipeline, movement at a constant speed, and temporary stopping at the point of jamming are described. The main factors affecting the friction force between the pig and the inner wall of the pipeline are considered. The possible places and reasons for the temporary stoppage of pigs made of hyperelastic materials in pipelines and the negative consequences that this can lead to are established. Experimentally, it was found that through all investigated pigs made of hyperelastic materials, air flow occurs, which is fed into the pig space. Such overflow contributed to the improvement of the pipeline cleaning quality. Recommendations are provided for the application scope of various hyperelastic pigs.

Key words: well pipeline, cleaning pig, polyurethane foam, silicone, liquid contamination, movement speed.

Вступ

Експлуатація газових свердловин на стадії зменшення видобування супроводжується зниженням тиску, дебіту та температури газу, збільшенням вмісту пластової води, конденсату в його складі, залповими викидами рідини. Ці чинники призводять до накопичення рідинних та твердих забруднень у понижених ділянках шлейфів свердловин, що зумовлює виникнення ряду експлуатаційних проблем – збільшення втрат тиску, зниження пропускної здатності трубопроводу, зменшення робочого тиску свердловин, пульсацій тиску та залпових викидів до сепараторів на вході установок комплексної підготовки газу, підвищення ризику утворення льоду та гідратів, збільшення витрати інгібітору, посилення процесів внутрішньотрубно́ї корозії. Чим більший об'єм рідинних накопичень у шлейфі, тим більші втрати тиску на збирання продукції. Тому для зменшення втрати тиску в системах збору газу газових родовищ треба їх очищувати. Такі заходи забезпечують зменшення величини робочого тиску свердловин, що призводить до збільшення різниці між пластовим тиском та тиском на гирлі свердловини і дає змогу отримати додатковий приплив газу [1-5].

Очисні поршні, які застосовують для очищення шлейфів свердловин, можуть бути різної конструкції, з різних матеріалів, різної форми тощо. В основному застосовують очисні кулі, циліндричні очисні поршні із гіперпружних матеріалів (силікон, пінополіуретан тощо) та манжетні чи дискові очисні поршні. Очисні кулі не є достатньо ефективними через перетікання через них під час руху газопроводом, що зумовленою малою площею контакту. Манжетні та дискові очисні поршні мають металевий корпус і є жорсткими, а тому ускладнене, доволі часто взагалі неможливе їх проходження відводами, трійниками і перехідниками трубопроводних систем збору газу газових родовищ.

Перспективним є використання поршнів із гіперпружних матеріалів, які вирізняються спроможністю проходити різноманітні трубопроводні елементи складної геометричної форми. Крім того саморуйнівні поршні із гіперпружних матеріалів не потрібно видаляти з внутрішньої порожнини трубопроводів, що усуває потребу влаштування вузлів приймання.

Різні гіперпружні матеріали мають різну механічну міцність, різні модулі пружності, різну густину. Тому поршні з таких матеріалів із різною ефективністю очищують трубопроводи, можуть застрягати, пошкоджуватись, руйнуватись під час проходження фасонних еле-

ментів газопроводів. На сьогодні практично відсутні вказівки щодо підбору поршнів із гіперпружних матеріалів для очищення газопроводів. Тому для успішного планування операцій з очищення шлейфів свердловин необхідно визначити сферу застосування поршня із кожного гіперпружного матеріалу. Неправильно підібраний матеріал може призвести до застрягання або руйнування поршня. Тому необхідні ґрунтовні лабораторні експериментальні дослідження, промислова апробація, щоб зрозуміти динаміку руху поршнів фасонними елементами трубопроводів. Такі дослідженнями є надзвичайно складною комплексною задачею, оскільки необхідно враховувати багато чинників, а саме криволінійну геометричну форму фасонного елемента, складні газодинамічні процеси зумовлені зміною напрямку потоку, сили інерції, які залежать від густини і швидкості руху поршня, нерівномірне притискання поршня до стінки у різних місцях фасонного елемента, що впливає на коефіцієнт тертя, нелінійність зміни характеристик матеріалу поршня під дією навантаження. Чим більше буде отримано знань про сферу застосування, особливості запускання, приймання, динаміку руху поршнів із гіперпружних матеріалів системами збору газу газових родовищ тим меншою буде вартість і час їх внутрішньотрубно́го очищення. Важливо визначити необхідні розміри, матеріал і форму поршня щоб він проходив усі фасонні елементи трубопроводної системи без застрягання, руйнування.

Аналіз сучасних закордонних і вітчизняних досліджень і публікацій

На ефективність очищення газопроводів поршнями впливає швидкість їх руху. Якщо вона занадто мала або занадто велика то це призводить до незадовільної якості очищення трубопроводів [6]. Через стисливість природного газу швидкість поршнів, перепад тиску на них можуть бути непостійними. Бувають різні випадки, коли швидкість поршня набагато більша допустимих значень, що призводить до зниження якості очищення внутрішньої порожнини газопроводу [7]. У разі тимчасової зупинки поршня в трубопроводі він відновлює свій рух тільки тоді, коли на нього діє достатній тиск. У результаті після старту його швидкість неконтрольовано зростає. Цей ефект називається "швидкісною екскурсією" [8]. Зміна швидкості поршнів більше гаситься в газопроводі вищого тиску. У міру збільшення тиску газу, такі зміни стають все меншими, оскільки збільшується густина газу. Зрештою, якщо густина стає

дуже великою, наприклад, рівною густині рідини, тоді зміна швидкості поршнів практично відсутня [9].

В [10] розроблено і змонтовано унікальну експериментальну установку для досліджень фізичного процесу видалення парафіну із внутрішньої стінки горизонтального трубопроводу внутрішнім діаметром 50 мм, довжиною 600 мм. Встановлено, що під час видалення парафіну манжетами поршня напруження його руйнування перевищує границю плинності парафінового відкладення, а залежність між цими величинами є лінійною. Якщо поршень дисковий то на нього діють більші сили опору ніж на манжетний. Сила необхідна для розриву парафінового відкладення зменшується зі збільшенням температури стінки труби.

Також треба враховувати зношення поршнів. У міру руху поршня трубопроводом все більше зношуються його ущільнення в результаті чого коефіцієнт тертя і перепад тиску на поршні зменшуються [11].

Висвітлення невирішених раніше частин загальної проблеми

Технологічні схеми трубопровідних систем збирання газу газових родовищ характеризуються різноманіттям. Під час проектування і спорудження таких систем не було передбачено можливості очищення шлейфів свердловин газопроводів очисними поршнями. Шлейфи свердловин не містять вузлів запускання і вузлів приймання поршнів, мають велику кількість нерівнопрохідної арматури, встановленої в різних місцях, штуцерів регулювальних, в яких прохідний переріз значно менший, ніж внутрішній діаметр трубопроводу, перехідників із більшого на менший діаметр труб і навпаки, різноманітних трійників (штампованих, зварних), відводів малого радіусу вигину, понижених, висхідних ділянок тощо. Тому проблемними питаннями, які часто виникають під час очищення шлейфів свердловин поршнями із різних матеріалів є недостатність інформації для прогнозування ризиків під час виконання таких операцій. Також недостатньо інформації щодо ефективності очищення різноманітних ділянок шлейфів свердловин поршнями. Тому достатньо складно вибрати найкращий поршень, який б і ефективно очищував трубопроводу і проходили усі складні трубопровідні елементи не руйнуючись.

Переваги і недоліки поршня суттєво залежать від матеріалу з якого він виготовлений, а тому необхідно виконати лабораторні експериментальні дослідження, які дадуть змогу краще

зрозуміти фізичні процеси, які відбуваються під час руху поршнів трубопроводом, визначити міцність матеріалу з якого вони виготовлені, оцінити з якою ефективністю вони очищують трубопроводу на основі чого встановити сферу застосування поршнів із різних матеріалів.

Також важливо знати місця можливих ускладнень під час руху поршня трубопроводом, що дало б змогу у разі виникнення непередбачуваних ситуацій (застрягання поршня тощо) вживати ефективні заходи. Є багато причин, чому поршні можуть застрягнути або пошкодитися під час руху трубопроводом, але з правильним плануванням, аналізом та тестуванням цього можна уникнути.

Мета та завдання досліджень

Мета роботи – оцінювання ефективності застосування поршнів із різних гіперпружних матеріалів для очищення систем збору газу газових родовищ від рідинних забруднень шляхом лабораторних експериментальних досліджень їх руху горизонтальними і пониженими ділянками трубопроводів.

Для досягнення мети були поставлені такі завдання:

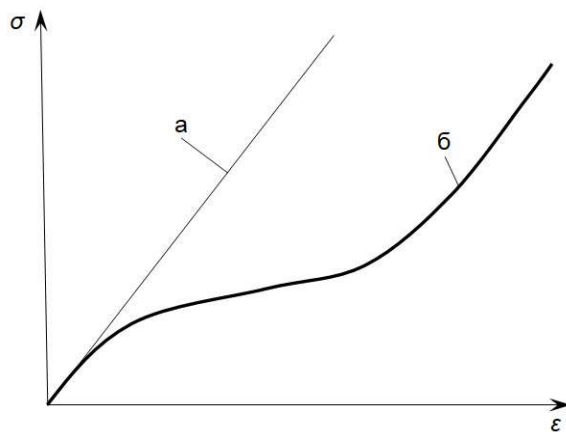
- виготовити очисні поршні з гіперпружних матеріалів із різними фізико-механічними характеристиками;
- розробити і змонтувати лабораторні експериментальні установки для дослідження ефективності очищення поршнями із гіперпружних матеріалів горизонтальних і понижених ділянок трубопроводів;
- експериментально дослідити процеси очищення поршнями з гіперпружних матеріалів горизонтальних і понижених ділянок трубопроводів;
- надати рекомендації щодо сфери застосування поршнів із гіперпружних матеріалів.

Висвітлення основного матеріалу дослідження

Підбір матеріалу для виготовлення поршнів призначених для очищення внутрішньої порожнини систем збору газу газових родовищ від рідинних забруднень є надзвичайно важливим. Такий матеріал повинен забезпечити ефективне очищення внутрішньої порожнини трубопроводів, проходження поршнями різних елементів трубопровідної системи. При цьому матеріал поршнів повинен бути достатньо міцним щоб витримувати усі навантаження, особливо у момент тимчасової зупинки поршня у фасонному елементі трубопроводу, коли за ним відбувається значне збільшення тиску. Тому

для експериментальних досліджень поршні виготовлено з різних матеріалів, які мають різні фізико-механічні характеристики. Це еластомери (пінополіуретан, пінополіуретан покритий уретаном), саморуйнівна пружно-полімерна композиція, силікон. При цьому поршні виготовлені із пінополіуретану, силікону різної густини.

Еластомери, пружно-полімерна композиція, силікон є матеріалами з нелінійною, надпружною та великою деформацією під навантаженням і практично відсутньою зміною об'єму при цьому. Такі матеріали називають гіперпружними. Гіперпружний матеріал це матеріал для якого механічні властивості, а саме співвідношення напруження–деформації виражаються та аналізуються функцією густини енергії деформації. Залежність напружень σ від деформації ϵ для таких матеріалів можна охарактеризувати як нелінійнопружну (рис. 1, б) та ізотропну [12]. На відміну від гіперпружних для пружних матеріалів (сталь, деревина, пластмаси тощо) залежність напружень від деформації є лінійною (рис. 1, а).



а – пружний матеріал;
б – гіперпружний матеріал

Рисунок 1 – Залежність напружень σ від деформації ϵ для пружних і гіперпружних матеріалів

Оскільки, гіперпружні матеріали здатні завдати великих деформацій під навантаженням і при цьому майже не змінюють свій об'єм (циліндричні взірці видовжуються у разі стискання їх бічної поверхні, розширюються у разі прикладання вертикального навантаження), швидко повністю відновлюють свою форму після зняття навантажень то вони є надзвичайно цікавими щодо виготовлення поршнів для очищення систем збору газу газових родовищ, які містять велику кількість трубопровідних елементів із складною геометричною фор-

мою. Це зумовлено тим, що в таких елементах поршні зазнають значних навантажень, деформацій – згинання (відводи, трійники), стискання (перехідники, арматура) тощо. Особливо зростають навантаження на поршень коли відбувається тимчасова його зупинка у фасонному елементі і збільшення тиску за ним.

Чим простіша форма поршня тим його легше виготовити, він є міцніший і надійніший. Тому усі поршні виготовлено циліндричної форми.

Поршні виготовлено із пінополіуретанів різної щільності. Піни монтажною високої щільності (150-160 кг/м³) (рис. 2, а) та піни монтажною еластичною FLEXIFOAM Soudal низької щільності (20-30 кг/м³) (рис. 2, б)). Чим вища щільність пінополіуретану, тим поршень міцніший, а чим нижча щільність, тим поршень м'якший. Поршні із пінополіуретану низької щільності надзвичайно гнучкі, еластичні. Для підвищення міцності, зносостійкості та довговічності поршні із пінополіуретану покрито уретановою піною.



а)



б)

а – високої щільності; б – низької щільності

Рисунок 2 – Поршні із пінополіуретану

Пружно-полімерна композиція з якої виготовлено очисні поршні (рисунок 3) є загущеною боратовим зшивачем гуаровою каміддо. Такі поршні є саморуйнівні (здатні розчинитись у трубопроводі через деякий час (більший ніж час необхідний для проходження поршнем усієї ділянки трубопроводу) після контакту із конденсатом або водою) і містять 1,5 % полімеру.



Рисунок 3 – Саморуйнівні поршні із пружно-полімерної композиції

Також поршні виготовлено із силіконового герметика холодного твердіння густиною 1020 кг/м^3 (рис. 4, а) та силіконового компаунду холодного твердіння густиною 1450 кг/м^3 (силікону для лиття) (рис. 4, б). Силіконові компаунди мають унікальні фізичні властивості. Вони мають добрі показники міцності, гнучкості, еластичності та добре розтягуються, бездоганні характеристики плинності, зносостійкості та довговічності, точно повторюють форму в яку заливаються під час виготовлення виробу незалежно від його розміру та складності.



а)



б)

а – герметик; б – компаунд

Рисунок 4 – Поршні із силікону

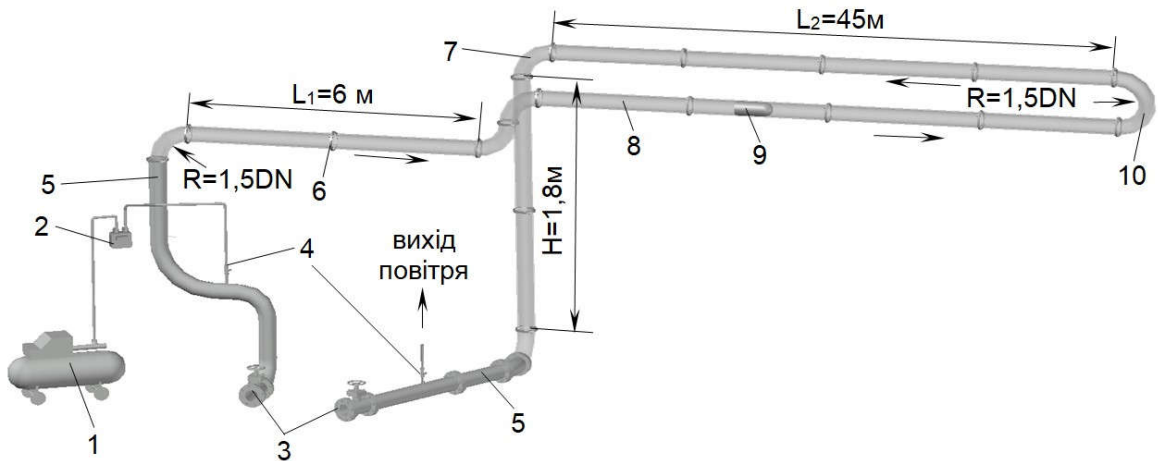
Гіперпружні матеріали з яких виготовлені очисні поршні мають різні фізико-механічні характеристики (різну густину, різні модулі пружності тощо). Ці характеристики чинять вплив на динаміку руху поршнів трубопроводами, ефективність очищення їх внутрішньої порожнини. Тому експериментально випробувано кожен із виготовлених поршнів, досліджено динаміку їх руху, визначено наскільки кожен із них ефективний для очищення різних ділянок трубопроводів (горизонтальних, понижених).

Експериментальна установка змонтована зі скляних труб загальною довжиною 100 м (рис. 5). Внутрішній діаметр скляних труб 54 мм. Трубопровід містить чотири відводи кутром вигину 90° та один відвід кутром вигину 180° . Радіус вигину усіх відводів рівний $1,5DN$. Скляні труби в місцях фланцевих з'єднань ущільнені резиновими прокладками, які в деяких місцях незначно виступають у внутрішню порожнину трубопроводу. Перевагою такого скляного трубопроводу є можливість візуального спостереження за динамікою руху поршня, можна наглядно бачити ефективність виконуваних операцій з очищення внутрішньої порожнини трубопроводу, що є важливим для оцінювання ефективності процесу очищення.

Для подавання повітря в запоршневий простір та випускання повітря з рідиною, яке рухається перед поршнем, до лабораторної установки під'єднано патрубки з вентилями 4 (рис. 5). Поршні рухались під тиском сухого стисненого повітря, яке подавалось із ресивера двох компресорів. У ресивері компресора відбувалось стабілізування тиску. Витрату повітря вимірювали лічильником 2. У місці випускання повітря з рідиною з експериментальної установки тиск був рівний атмосферному.

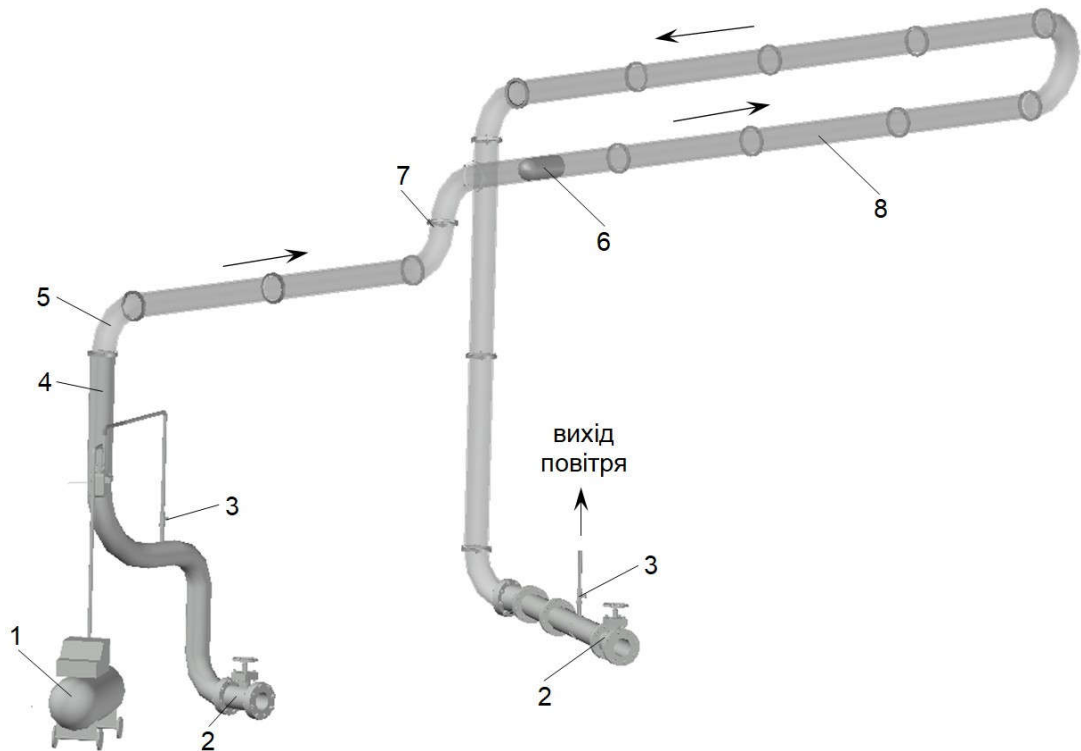
Через складність герметизації фланців у місці з'єднання скляних труб виникла ідея не влаштувати камеру приймання, а після проходження поршнем усього трубопроводу змінювати напрям його руху з аверсного (рис. 6) на реверсний (рис. 8) і повертати назад у місце, де поршень був запасований в трубопровід. Для такої зміни напрямку руху поршня після його проходження усім трубопроводом компресори під'єднували до парубка (рис. 9) з якого під час аверсного руху поршня випускали повітря з рідиною (рис. 7), а повітря з рідиною випускали через патрубок (рис. 9) до якого під'єднували компресори (рис. 7).

Експериментально встановлено, що на ефективність очищення горизонтальних ділянок трубопроводів поршнями із гіперпружних



1 – компресор; 2 – лічильник; 3 – засув; 4 – вентиль; 5 – сталева труба 66×6;
6 – фланець із резиновою ущільненням; 7 – відвід 90°; 8 – скляна труба 66×6;
9 – поршень із гіперпружного матеріалу; 10 – відвід 180°

Рисунок 5 – Схема експериментальної установки для дослідження руху поршнів горизонтальними ділянками трубопроводу



1 – компресор; 2 – засув; 3 – вентиль; 4 – сталева труба 66×6; 5 – відвід 90°; 6 – поршень;
7 – фланець; 8 – скляна труба 66×6; 9 – відвід 180°

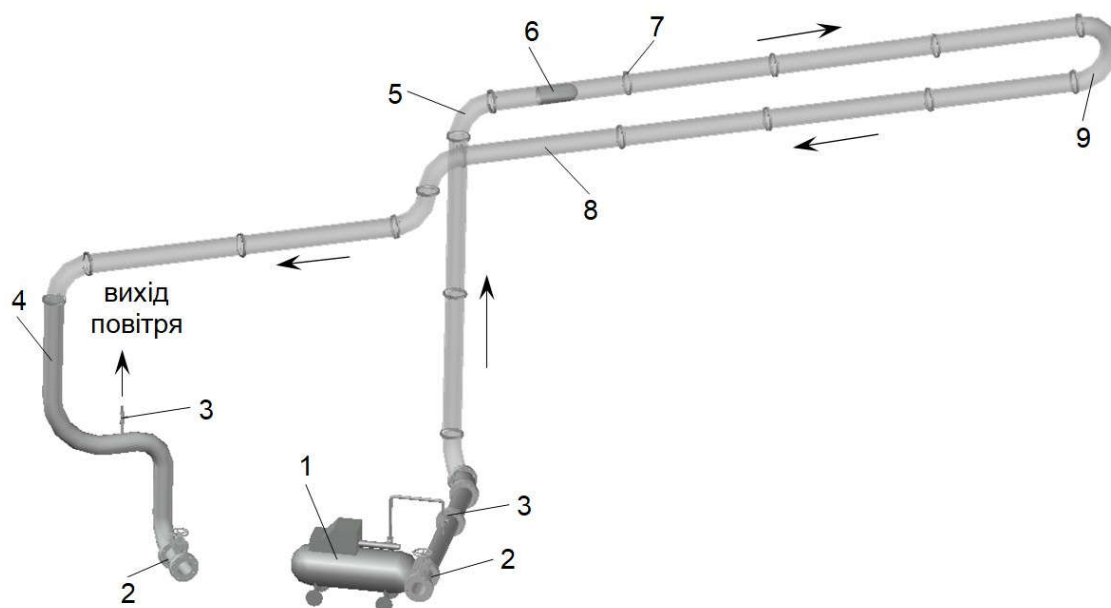
Рисунок 6 – Схема руху поршня в аверсному напрямку

матеріалів впливає швидкість їх руху. Швидкість руху поршнів змінювали шляхом зміни вентилем розташованим на вході в трубопровід витрати повітря, яке подавали із ресивера компресора. Визначення швидкості руху очисних поршнів здійснювалось шляхом визначення за відеозаписом часу за який поршень проходив віддалі між з'єднаннями скляних труб.

Очищення горизонтальних прямолінійних ділянок трубопроводу усіма виготовленими поршнями із гіперпружних матеріалів було найефективнішим, коли поршні рухались із майже постійною швидкістю 2-5 м/с. Рідинні забруднення у запоршневому просторі у такому разі були відсутні (рис. 10). Якщо швидкість руху поршнів була меншою або більшою за-



Рисунок 7 – Підготовлена експериментальна установка до запускання поршня в аверсному напрямку



1 – компресор; 2 – засув; 3 – вентиль; 4 – сталевая труба 66×6; 5 – відвід 90°; 6 – поршень; 7 – фланець; 8 – скляна труба 66×6°; 9 – відвід 180°

Рисунок 8 – Схема руху поршня в реверсному напрямку

зазначеного діапазону ефективність очищення горизонтальних ділянок трубопроводу понижувалася (у запоршневому просторі під час руху поршня можна було побачити рідинні забруднення (рисунок 11)). При чому чим менше 2 м/с і більше 5 м/с була швидкість поршня тим більшим було перетікання рідинних забруднень трубопроводу в запоршневий простір. Отже, щоб забезпечити ефективне очищення трубо-

проводів поршнями із гіперпружних матеріалів треба забезпечити постійну подачу робочого середовища в запоршневий простір із такою витратою, щоб швидкість руху поршня була в межах 2-5 м/с. Для цього треба розрахувати величину необхідної витрати газу. Що ж до динаміки руху поршнів із гіперпружних матеріалів горизонтальними прямолінійними ділянками трубопроводів то її визначає сила тертя між



Рисунок 9 – Підготовлена експериментальна установка до запускання поршня в реверсному напрямку



Рисунок 10 – Очищення горизонтальної прямолінійної ділянки трубопроводу поршнем із гіперпружного матеріалу, який рухається із постійною швидкістю 3,2 м/с

бічною поверхнею циліндричних поршнів і внутрішньою стінкою трубопроводу. Сила тертя є визначальним чинником, який впливає на тиск у запоршневому просторі.

За результатами досліджень виділено три окремі етапи руху поршнів із гіперпружних ма-

теріалів горизонтальними прямолінійними ділянками трубопроводів:

- запускання;
- рух із постійною швидкістю;
- тимчасова зупинка в місцях резинових ущільнень.



Рисунок 11 – Очищення горизонтальної прямолінійної ділянки трубопроводу поршнем із гіперпружного матеріалу, який рухається із постійною швидкістю 0,8 м/с

На першому етапі після запуску поршня в трубопровід і подавання повітря тиск у запоршневому просторі починав збільшуватись до тих пір, поки сила тиску, яка діяла на поршень, не ставала більшою сили тертя спокою між бічною поверхнею поршня і внутрішньою стінкою трубопроводу. У цей момент відбувалось зрушення поршня. Можна було побачити, що у момент зрушення поршня він набуває значного прискорення, що обумовлено подоланням сили тертя спокою і дією між бічною поверхнею поршня і внутрішньою стінкою трубопроводу сили тертя ковзання. Сила тертя ковзання суттєво менша сили тертя спокою. Також ці процеси призводять до поступового падіння тиску в запоршневому просторі і його стабілізування. Після стабілізування тиску в запоршневому просторі поршень дещо сповільнювався і швидкість його руху також стабілізувалась.

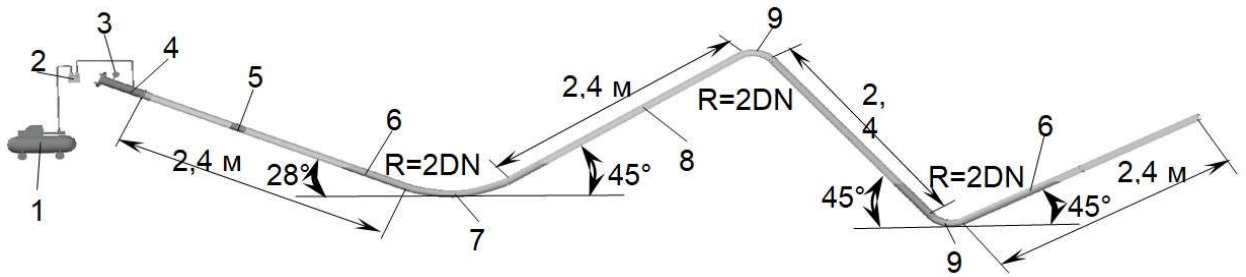
Тиск у запоршневому просторі на другому етапі визначається силою тертя ковзання між бічною поверхнею поршня і внутрішньою стінкою трубопроводу, оскільки сила тиску та сила тертя ковзання врівноважуються під час руху поршня з постійною швидкістю. У свою чергу, швидкість руху поршня залежала від витрати повітря.

Основними чинниками, які впливатимуть на силу тертя, є матеріал поршня, стан внутрішньої стінки трубопроводу (шорсткість, вологість тощо) та контактна сила між бічною поверхнею поршня і внутрішньою стінкою труб. У свою чергу контактна сила залежить від того наскільки діаметр поршня більший від внутрішнього діаметра трубопроводу. Також коефіцієнт

тертя дещо зменшується зі збільшенням швидкості руху поршня.

Суттєва зміна динаміки руху поршнів спостерігалась на третьому етапі – у разі їх тимчасової зупинки в місцях резинових ущільнень з'єднання скляних труб, які дещо виступали у внутрішню порожнину трубопроводу. Тимчасова зупинка поршня в місцях резинових ущільнень відбувалась тоді, коли швидкість руху поршня була незначною. При чому це також залежало від густини поршня. Поршні з незначною густиною (із пінополіуретану) зупинялись в місцях резинових ущільнень при значно більшій швидкості їх руху, ніж поршні із силікону, пружно-полімерної композиції.

Виступи резинових ущільнень у внутрішню порожнину трубопроводу спричинювали незначне деформування (стискання) поршня і, як наслідок, збільшення контактних сил. У свою чергу збільшення контактних сил призводило до збільшення сил тертя. Тому якщо сума сил, зумовлених тиском повітря в запоршневому просторі і силою інерції, яка діє на рухомий поршень, були менші ніж сума сили тертя в резинових ущільненнях труб і сили тертя між бічною поверхнею поршня і внутрішньою стінкою скляних труб то відбувалась тимчасова зупинка поршня. Сила інерції, яка діє на рухомий поршень залежить від швидкості його руху та маси поршня (густина при однаковій довжині поршнів із різних матеріалів). Після зупинки поршня в місці резинових прокладок спостерігалось збільшення тиску в запоршневому просторі. Коли тиск за поршнем досягав таких значень, що зумовлена ним сила, яка діяла на поршень, ставала більшою ніж сила тертя спокою



1 – компресор; 2 – лічильник; 3 – манометр; 4 – вузол запускання поршнів;
5 – поршень із гіперпружного матеріалу; 6 – рідинні забруднення; 7 – відвід 120°;
8 – скляна труба 44×3; 9 – відвід 90°

Рисунок 12 – Схема експериментальної установки з двома пониженими ділянками трубопроводу

бічної поверхні поршня до резинових ущільнень і внутрішньої стінки скляних труб відбувалось зрушення поршня і суттєве його прискорення, в результаті чого досягалась дуже велика швидкість руху поршня за дуже короткий час. Причинами такого прискорення є суттєве раптове зменшення сили тертя, оскільки поршень виходив з резинових ущільнень, а тертя спокою його бічної поверхні до внутрішньої стінки труби змінювалось на тертя ковзання, яке є суттєво менше тертя спокою. Оскільки, тиск необхідний для підтримування руху поршня (долання тільки тертя ковзання) суттєво менший тиску необхідного для зрушення тимчасово зупиненого поршня в резинових ущільненнях, то після зрушення поршня відбувалось зменшення тиску до тих пір поки він не досяг рівня, необхідного для подолання тертя ковзання, що в свою чергу призводило до поступового сповільнення поршня після його суттєвого прискорення. Раптове суттєве збільшення швидкості поршня призводило до збільшення величини перегіткань рідинних забруднень через поршень і зменшення ефективності очищення. Також суттєве збільшення швидкості поршня може призвести до його пошкодження якщо на шляху поршня зустрічаються наприклад, відводи, трійники, інші місця різних виступів у внутрішній порожнині трубопроводу тощо.

Описані процеси можуть спостерігатись у місцях різних виступів у внутрішній порожнині газопроводів систем збору газу газових родовищ, деформацій труб (вм'ятини, овальність), сильної внутрішньотрубної корозії. Також у внутрішній порожнині шлейфів свердловин зустрічаються значні виступи у місці зварних швів зумовлені наплавленням металу, зміщенням зварних кромок. Тому, якщо шлейф свердловини може містити значні виступи у внутрішній порожнині, щоб уникнути тимчасових зупинок і значних пришвидшень поршня, як

наслідок, зменшення ефективності очищення, доцільно збільшити силу інерції, яка діє на поршень. Це можна здійснити застосовуючи поршні із гіперпружних матеріалів найбільшої маси (найбільшу густину має силіконовий компаунд холодного твердіння) та підтримуючи більшу швидкість руху поршня але в рекомендованих межах (до 5 м/с). Поршні із пінополіуретанових матеріалів мають надзвичайно малу густину тому вони в такому випадку не рекомендовані.

Для експериментальних досліджень ефективності очищення понижених ділянок трубопроводу поршнями із гіперпружних матеріалів, дослідження динаміки руху поршнів такими ділянками розроблено і змонтовано експериментальну установку із скляних труб (рис. 12, 13).

Експериментальна установка містить дві низхідні ділянки та дві висхідні і складається із чотирьох скляних труб 6 довжиною 2,4 м і внутрішнім діаметром 38 мм (рис. 12). Загальна довжина трубопроводу 10 м. Трубопровід містить один відвід 7 кутом вигину 120° та два відводи 9 кутом вигину 90°. Радіус вигину усіх відводів рівний 2DN. Кут нахилу першої низхідної ділянки до горизонту складає 28°, другої низхідної, висхідних ділянок – 45°. Скляні труби і відводи з'єднано липкою стрічкою, яка також виконувала роль запобіжника тиску у разі застрягання поршня. Перевагою такого скляного трубопроводу є можливість візуального спостереження за динамікою руху поршня, наглядно бачити ефективність виконуваних операцій з очищення внутрішньої порожнини трубопроводу, що є важливим для оцінювання ефективності процесу очищення трубопроводу поршнями із різних гіперпружних матеріалів.

Під час руху поршнів трубопроводом виконано відеозапис.

Перед запусканням поршня в обидві понижених ділянки експериментальної установки бу-



Рисунок 13 – Експериментальна установка з двома пониженими ділянками трубопроводу

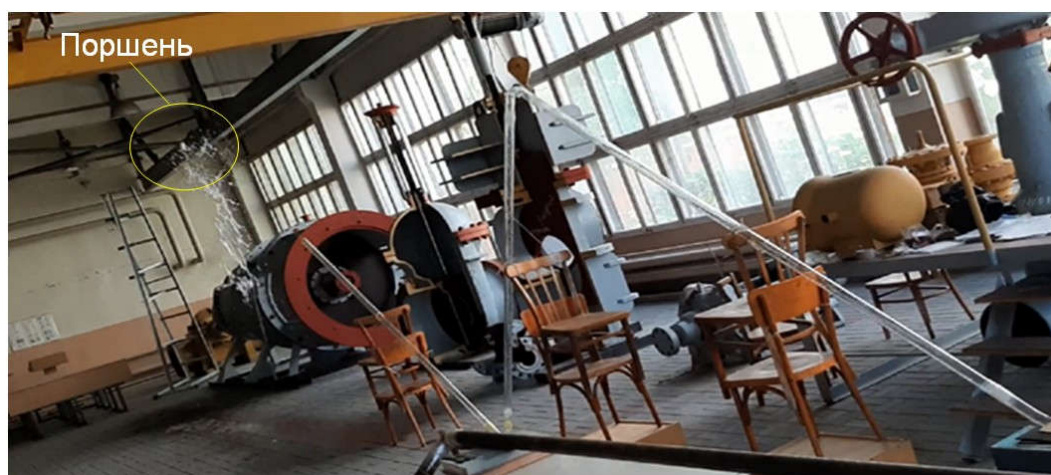


Рисунок 14 – Вилітання поршня з рідиною із експериментальної установки з двома пониженими ділянками трубопроводу

ла залита вода в обсязі 3л. Під час експериментальних досліджень контролювали витрату повітря, тиск у камері запускання поршнів, об'єм рідинних забруднень, які залишилися після проходження поршня.

Витрату повітря встановлювали такою, щоб швидкість руху поршнів знаходилась в межах 2-5 м/с, оскільки під час досліджень ефективності очищення горизонтальних ділянок трубопроводів поршнями із гіперпружних матеріалів встановлено, що при такій швидкості результати є найкращі.

У місці випускання повітря з рідиною з експериментальної установки тиск був рівний атмосферному. Поршень із водою перед ним вилітав із відкритого торця останньої скляної труби експериментальної установки (рис. 14).

Найефективніше внутрішню порожнину понижених ділянок експериментального трубопроводу від води очищували поршні із силіко-

нового компаунду, силіконового герметика та пінополіуретану високої щільності. Після їх проходження трубопроводом залишку рідинних забруднень у відводах понижених ділянок не було. Натомість після проходження експериментального трубопроводу поршнями із пружно-полімерної композиції, пінополіуретану низької щільності у відводах понижених ділянок був залишок води. Об'єм залишку води вимірювали мірною ємністю. У разі очищення трубопроводу поршнями із пружно-полімерної композиції об'єм залишку води складав 0,13 л, а у разі поршнями із пінополіуретану низької щільності – 0,15 л.

Експериментально встановлено, що через усі досліджувані поршні із гіперпружних матеріалів відбувається перетікання повітря, яке подається у запоршневий простір. Причому таке перетікання спостерігалось і під час запускання поршня до його зрушення, коли тиск у



Рисунок 15 – Рух поршня пониженою ділянкою трубопроводу



Рисунок 16 – Рух поршня висхідною ділянкою трубопроводу

запоршневому просторі збільшувався до тих пір, поки сила тиску не була більшою сили тертя спокою, і під час руху поршня трубопроводом. Цікавим є те, що таке перетікання спостерігалось навіть коли діаметр поршня із пружно-полімерної композиції є на 5 мм більший ніж внутрішній діаметр експериментального трубопроводу. Ще до зрушення поршня перетікання повітря через нього призводило до того, що вода починала зміщуватись із пониженої ділянки на висхідну.

Перетікання повітря через поршень сприяло підвищенню якості очищення трубопроводу, оскільки призводило до того, що перед підходом поршня до пониженої ділянки значний об'єм води зміщується на висхідну ділянку (рис. 15). Таке зміщення мінімізує гідравлічний удар поршня з водою. На висхідній ділянці поршень поступово підхоплює воду і переміщує перед собою. При цьому за рахунок перетікання повітря через поршень вода перед ним насичена повітрям (рис. 16), що покращує якість очищення трубопроводу.

Лабораторні експериментальні дослідження дали можливість встановити переваги і недоліки поршнів із різних гіперпружних матеріалів.

Поршні із пінополіуретану не є достатньо міцні, мають надзвичайно малу густину тому на них діє мала сила інерції під час руху трубопроводом. Якщо пінополіуретан високої щільності то поршні досить жорсткі, мають великий модуль пружності на згин, здатні повернутися до початкової форми після стиснення до 10 %. Через жорсткість, малу густину поршні із пінополіуретану високої щільності за певних умов застрягають у трубопроводах.

Перевагами поршнів із пінополіуретану є низька їх вартість. Поршні із пінополіуретану низької щільності м'які, надзвичайно гнучкі, еластичні, мають малий модуль пружності на згин, здатні повернутися до початкової форми після стиснення навіть до 75 % або розтягування до 45 %, без пошкодження, а тому легко проходять трубопроводи але при цьому можуть зруйнуватись через недостатню міцність. Під час експериментальних досліджень встановлено, що поршні із пружно-полімерної композиції неефективно застосовувати для очищення газопроводів, які мають протяжні висхідні ділянки. Перевагами поршнів із пружно-полімерної композиції є здатність їх розчинятись у трубопроводі після деякого часу контакту із конденсатом або водою, гнучкість.

Перевагами поршнів із силіконового герметика є велика гнучкість, еластичність, здатність добре розтягуватися, що забезпечує проходження трубопроводів. Вони здатні ефективно очищувати внутрішню порожнину трубопроводів, які містять як горизонтальні, так і понижені ділянки.

Перевагами поршнів із силіконового компаунда є надзвичайно велика міцність і при цьому гнучкість, еластичність та здатність добре розтягуватись, велика густина, а тому вони легко проходять трубопроводи. Також вони ефективно очищують внутрішню порожнину трубопроводів, які містять, як горизонтальні, так і понижені ділянки. Вони мають бездоганні характеристики зносостійкості та довговічності. Силіконовий компаунд точно повторює форму в яку він заливається під час виготовлення виробу незалежно від його розміру та складності.

Висновки

Переваги і недоліки поршня суттєво залежать від матеріалу, з якого він виготовлений, а тому встановлено сферу застосування поршнів із кожного матеріалу. Виконані лабораторні експериментальні дослідження дали можливість це здійснити.

Сфера застосування поршнів із пінополіуретану це трубопроводи в яких повинна бути забезпечена можливість прийняти або скерувати поршень в зворотному напрямку, після проходження всієї довжини трубопроводу. Також це трубопроводи, які містять горизонтальні, низхідні і висхідні ділянки (протяжні висхідні ділянки не ефективно очищують поршні із пінополіуретану низької щільності). Поршні із пінополіуретану можуть бути поршнями для тестування прохідності трубопроводів, оскільки вони мають малу міцність і у разі застрягання руйнуються під великим тиском (за умови що через поршень нема значного перетікання).

Сфера застосування поршнів із пружнополімерної композиції це трубопроводи з яких неможливо видалити поршні, неможливо скерувати поршень у зворотному напрямку після проходження всієї довжини трубопроводу, трубопроводи де пошук застряглих поршнів може бути проблемою і були випадки застрягання поршнів. Також це трубопроводи, які містять горизонтальні і низхідні ділянки, але не містять протяжних висхідних ділянок.

Сфера застосування поршнів із силікону це трубопроводи в яких повинна бути забезпечена можливість прийняти або скерувати поршень в зворотному напрямку після проходження всієї

довжини трубопроводу. Також це трубопроводи, які містять горизонтальні, низхідні і висхідні ділянки.

Експериментально встановлено, що через усі досліджувані поршні із гіперпружних матеріалів відбувається перетікання повітря, яке подається у запоршневий простір. Причому таке перетікання спостерігалось і під час запускання поршня до його зрушення, коли тиск у запоршневому просторі збільшувався до тих пір, поки сила тиску не була більшою сили тертя спокою, і під час руху поршня трубопроводом, навіть коли діаметр поршня із пружнополімерної композиції був на 5 мм більший ніж внутрішній діаметр експериментального трубопроводу. Встановлено, що перетікання повітря через поршень сприяє підвищенню якості очищення трубопроводу, оскільки мінімізує гідравлічний удар поршня з рідинними забрудненнями, призводить до того, що перед підходом поршня до пониженої ділянки значний об'єм води зміщується на висхідну ділянку на якій поршень поступово підхоплює і переміщує перед собою забруднення.

Перспективи подальшої роботи в даному напрямку полягають у дослідженні впливу форми поршнів із гіперпружних матеріалів на ефективність процесу очищення трубопроводу, впливу об'єму перетікань через поршень на швидкість його руху, дослідженні динаміки руху поршнів із гіперпружних матеріалів фасонними елементами трубопроводів (відводами, перехідниками, трійниками).

Література

1. Volovetskyi V., Uhrynovskyi A., Doroshenko Ya., Shchyrba O., Stakhmych Yu. Developing a set of measures to provide maximum hydraulic efficiency of gas gathering pipelines. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*. 2020. Vol. 101. Issue 1. P. 27-41. <http://doi.org/10.5604/01.3001.0014.4088>.
2. Doroshenko Ya., Rybitskyi I. Investigation of the influence of the gas pipeline tee geometry on hydraulic energy loss of gas pipeline systems. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. Vol. 1. No 8 (103). P. 28-34. <http://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.192828>.
3. Воловецький В. Б., Щирба О. М., Витязь О. Ю., Дорошенко Я. В. Збільшення обсягів відбору газу в умовах періодичної експлуатації з газоконденсатних свердловин. *Науковий вісник*. 2013. № 2 (35). С. 111-121.
4. Воловецький В. Б., Щирба О. М., Витязь О. Ю., Дорошенко Я. В. Аналіз причин зни-

ження гідравлічної ефективності міжпромислових газопроводів та вибір способів її підвищення. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2013. № 3 (48). С. 147-156.

5. Дорошенко Я. В., Карпаш О. М., Гожаєв Б. Н. Дослідження складу трубопровідних газорідних потоків та впливу наявних у них шкідливих домішок на режими перекачування, енерговитрати на транспортування. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2019. № 4 (73). С. 35-45. [http://doi.org/10.31471/1993-9973-2019-4\(73\)-35-45](http://doi.org/10.31471/1993-9973-2019-4(73)-35-45)

6. Jian-feng Y., Wen-wen W., Feng A. Pigging technology of long-distance pipeline. *Pipeline Technique and Equipment*. 2013. № 3. P. 48-49.

7. He H., Liang Z. Simulation of pigging with a brake unit in hilly gas pipeline. *Journal of applied fluid mechanics*. 2019. Vol. 12 No. 5. P. 1497-1509. <http://doi.org/10.29252/jafm.12.05.29869>.

8. Tiratsoo J.N. Pipeline Pigging Technology. 2nd ed. Houston, TX, USA: Gulf Publishing Company, 1992. 480 p.

9. O'Donoghue A. Modelling pig train dynamics in natural gas pipelines. UK: Pigging Products & Services Association, 2012. 13 p.

10. Wang W., Huang Q., Liu Y., Sepehrnoor K. Experimental study on mechanisms of wax removal during pipeline pigging. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, September 2015, SPE-174827-MS. <http://doi.org/10.2118/174827-MS>.

11. Zhang H., Sanchez C., Liu S., Zhang S., Liang H. Wear of a polyurethane rubber used in dry gas pipeline as inspection gauges. *J. Nat. Gas Sci. Eng.* 2017. Vol. 41. P. 40-48. <http://doi.org/10.1016/j.jngse.2017.02.035>.

12. Elgström E. Practical implementation of hyperelastic material methods in FEA models. *Master of Science thesis in Mechanical Engineering*. Karlskrona. Sweden, 2014. 49 p.

References

1. Volovetskiy V., Uhrynovskiy A., Doroshenko Ya., Shchyrba O., Stakhmych Yu. Developing a set of measures to provide maximum hydraulic efficiency of gas gathering pipelines. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*. 2020. Vol. 101. Issue 1. P. 27-41. <http://doi.org/10.5604/01.3001.0014.4088>.

2. Doroshenko Ya., Rybitskiy I. Investigation of the influence of the gas pipeline tee geometry on hydraulic energy loss of gas pipeline systems. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. Vol. 1. No 8 (103). P. 28-34. <http://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.192828>.

3. Volovets'kyu V. B., Shchyrba O. M., Vytyaz' O. Yu., Doroshenko Ya. V. Zbilshennya obsyahiv vidboru hazu v umovakh periodychnoyi ekspluatatsiyi z hazokondensatnykh sverdlovyh. *Naukovyy visnyk*. 2013. No 2 (35). P. 111-121. [in Ukrainian]

4. Volovets'kyu V. B., Shchyrba O. M., Vytyaz' O. Yu., Doroshenko Ya. V. Analiz prychnyn znyzhennya hidravlichnoyi efektyvnosti mizhpromyslovykh hazoprovodiv ta vybir sposobiv yiyi pidvyshchennya. *Rozvidka ta rozrobka naftovykh i hazovykh rodovyshch*. 2013. No 3 (48). P. 147-156. [in Ukrainian]

5. Doroshenko Ya. V., Karpash O. M., Hozhayev B. N. Doslidzhennya skladu truboprovodnykh hazoridnykh potokiv ta vplyvu nayavnykh u nykh shkidlyvykh domishok na rezhymy perekachuvannya, enerhovytraty na transportuvannya. *Rozvidka ta rozrobka naftovykh i hazovykh rodovyshch*. 2019. No 4 (73). P. 35-45. [http://doi.org/10.31471/1993-9973-2019-4\(73\)-35-45](http://doi.org/10.31471/1993-9973-2019-4(73)-35-45) [in Ukrainian]

6. Jian-feng Y., Wen-wen W., Feng A. Pigging technology of long-distance pipeline. *Pipeline Technique and Equipment*. 2013. No 3. P. 48-49.

7. He H., Liang Z. Simulation of pigging with a brake unit in hilly gas pipeline. *Journal of applied fluid mechanics*. 2019. Vol. 12 No. 5. P. 1497-1509. <http://doi.org/10.29252/jafm.12.05.29869>.

8. Tiratsoo J.N. Pipeline Pigging Technology. 2nd ed. Houston, TX, USA: Gulf Publishing Company, 1992. 480 p.

9. O'Donoghue A. Modelling pig train dynamics in natural gas pipelines. UK: Pigging Products & Services Association, 2012. 13 p.

10. Wang W., Huang Q., Liu Y., Sepehrnoor K. Experimental study on mechanisms of wax removal during pipeline pigging. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, September 2015, SPE-174827-MS. <http://doi.org/10.2118/174827-MS>.

11. Zhang H., Sanchez C., Liu S., Zhang S., Liang H. Wear of a polyurethane rubber used in dry gas pipeline as inspection gauges. *J. Nat. Gas Sci. Eng.* 2017. Vol. 41. P. 40-48. <http://doi.org/10.1016/j.jngse.2017.02.035>.

12. Elgström E. Practical implementation of hyperelastic material methods in FEA models. *Master of Science thesis in Mechanical Engineering*. Karlskrona. Sweden, 2014. 49 p.