

ДЕФОРМАЦІЇ ТА ЗАКОНОМІРНОСТІ РУХУ ОЧИСНИХ ПОРШНІВ ІЗ ГІПЕРПРУЖНИХ МАТЕРІАЛІВ РІВНОПРОХІДНИМИ ТРІЙНИКАМИ ТРУБОПРОВОДІВ

С. М. Стецюк

ІФНТУНГ; 76019, Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15; тел. (0342) 242157,
e-mail: sstetsuk@gmail.com

Щоб збільшити обсяги видобування газу, підвищити енергоефективність трубопроводів та зменшити втрати енергоносіїв через аварії системи збирання та транспортування газу виснажених газових родовищ, газові, водопровідні та теплові мережі треба регулярно очищувати від накопичених забруднень у внутрішній порожнині. Якісно очищувати такі трубопровідні системи без втрат транспортованого продукту можна суцільнолитими очисними поршнями із гіперпружних матеріалів. Виготовлено дослідні зразки очисних поршнів із силіконового компаунда твердістю 30 одиниць за шкалою Шор А та поліуретану твердістю 80 одиниць за шкалою Шор А різної геометричної форми (манжетно-чашковий, багатодисковий, циліндрично-дводисковий та гантельно-дисковий). Для експериментальних досліджень розроблено і змонтовано установки із скляних і металевих труб, між якими поміщено рівнопрохідні трійники. Дослідження виконано для двох схем руху потоків у трійнику. За першою схемою потік повітря входить у відгалуження трійника та в одну зі сторін його магістралі, а поршень входить у відгалуження трійника. За другою схемою потік повітря і поршень входять у відгалуження трійника і виходять в одну із сторін магістралі трійника. Експериментально встановлено, що найменший тиск у запоршневому просторі для проходження трійників потрібний манжетно-чашковому очисному поршню із силіконового компаунда. Сприяє цьому легке вигинання його осердя та відсутність суттєвого опору цьому ущільнювальних елементів поршня (манжет та чашок). Натомість найбільший тиск у запоршневому просторі для проходження трійників потрібний циліндрично-дводисковому поршню із силіконового компаунда. Порші із поліуретану застрягають у трійниках через мінімальне вигинання їх середньої частини та виникнення зазору між їх задньою частиною і внутрішньою стінкою відгалуження трійника.

Ключові слова: силіконовий компаунд, поліуретан, запоршневий тиск, геометрична форма, застрягання.

In order to increase the volume of gas production, increase the energy efficiency of pipelines and reduce losses of energy carriers due to breakdowns of the gas collection and transportation system of exhausted gas fields, gas, water and heat networks must be regularly cleaned of accumulated impurities in the internal cavity. High-quality cleaning of such pipeline systems without loss of the transported product is possible with one-piece cleaning pigs made of hyperelastic materials. Test samples of cleaning pigs were made from a silicone compound with a hardness of 30 units on the Shore A scale and polyurethane with a hardness of 80 units on the Shore A scale of different geometric shapes (cuff-cup, multi-disc, cylindrical-double-disc and dumbbell-disc). For experimental studies, installations made of glass and metal pipes, between which equal passage tees are placed, have been developed and assembled. The study was carried out for two flow patterns in the tee. According to the first scheme, the air stream entered the branch of the tee and into one of the sides of its trunk, and the pig entered the branch of the tee. According to the second scheme, the flow of air and the pig entered the branch of the tee and went out to one of the sides of the main line of the tee. It was experimentally established that the cuff-cup cleaning pig made of silicone compound needs the lowest pressure in the behind-pig space to pass the tees. This is facilitated by the slight bending of its core and the lack of significant resistance to it from the sealing elements of the pig (cuffs and cups). Instead, the cylindrical-double-disc pig made of silicone compound needs the highest pressure in the behind-pig space to pass the tees. Polyurethane pistons get stuck in the tees due to the minimal curvature of their middle part and the appearance of a gap between their rear part and the inner wall of the tee branch.

Keywords: silicone compound, polyurethane, pig pressure, geometric shape, pig stuck.

Вступ

Переважаюча більшість газових родовищ в Україні перебуває на завершальній стадії розробки. На такій стадії значна кількість свердловин відноситься до категорії малодобітних і працюють в умовах низьких пластових тисків [1, 2], винесення великих об'ємів пластової во-

ди та конденсату із свердловин [3]. Зменшення дебіту свердловин призводить до зменшення швидкості газового потоку в шлейфах свердловин і накопичення рідини в понижених їх ділянках. Такі накопичення призводять до ще більшого зменшення обсягів видобування та робочого тиску свердловин. До того ж підвищується

ризик утворення льоду та гідратів [4], посилюються процеси внутрішньотрубної корозії.

У внутрішній порожнині газопроводів газових мереж низького тиску накопичуються продукти внутрішньотрубної корозії, вода. Основними забрудненнями у внутрішній порожнині трубопроводів теплових, водопровідних мереж є продукти внутрішньотрубної корозії, відклади шламу, мінеральні домішки, пісок, ґрунт тощо. Забруднення таких трубопроводів призводять до посилення процесів корозії і збільшення кількості аварій та втрат енергоносіїв, підвищення енерговитрат на транспортування. [5]

В умовах енергетичної кризи в Україні до технічного обслуговування трубопровідних систем, якими транспортуються енергоносії, повинна бути приділена особлива увага. Необхідні рішення, які б забезпечили збільшення обсягів видобування газу, підвищили енергоефективність трубопроводів в умовах недовантаженості, зменшили втрати енергоносіїв через аварії.

Аналіз сучасних закордонних і вітчизняних досліджень і публікацій

Щоб відновити пропускну спроможність трубопроводів, їх очищують від забруднень за допомогою:

- пристроїв постійної дії (стаціонарних);
- пристроїв періодичної дії (очисних поршнів);
- поверхнево-активних речовин;
- переведення газопроводу в режим самоочищення (продування) [6].

Суттєвою перевагою очисних поршнів над іншими методами, які на сьогодні широко застосовують, є якісне очищення без втрат газу [7]. Це підсилює актуальність розширення сфери застосування очисних поршнів, оскільки газовими компаніями взято курс на мінімізацію виробничо-технологічних втрат та декарбонізацію, а метан створює в рази більший парниковий ефект, ніж вуглекислий газ.

Проблемою є те, що під час проектування систем збирання та транспортування газу газових родовищ, газових, водопровідних і теплових мереж не передбачалось очищувати такі трубопроводи поршнями. Тому вони не містять вузлів запускання-приймання поршнів [8] і є розгалуженими мережами трубопроводів, які характеризуються різноманітністю технологічних схем, мають велику кількість фасонних елементів (крутовигнутих відводів, трійників, перехідників з більшого на менший діаметр труб). Часто зустрічаються напливи в місці зварних швів, зміщення кромки [7]. Все це робить

застосування поршнів непередбачуваним, з огляду на можливість їх застрягання, і спричинення ними руйнування труб [9, 10], що вимагає досліджень динаміки їх руху трубопроводами, які містять такі елементи. Ускладнює такі дослідження те, що поршні виготовляють із різних матеріалів, і що вони можуть мати різні конструкції [11] та геометричні форми [7].

Що стосується трійників трубопроводів, то у [12] розглянуто питання проектування та розробки Y-подібного з'єднання двох підводних трубопроводів однакового діаметру, через яке забезпечено можливість проходу поршнів. Внутрішня геометрія спроектованого трійника забезпечує безперешкодний прохід поршнів, аналіз конструкції та вибір матеріалу. За даними [13] під час очищення трубопроводів поршнем із пінополіуретану були випадки, коли 16-дюймовий поршень входив в 8-дюйомове відгалуження. Щоб запобігти цьому, на початку відгалужень рійників приварюють ґратку [14].

У [15] експериментально встановлено, що на динаміку руху циліндричних поршнів із гіперпружних матеріалів рівнопрохідними трійниками трубопроводів впливає значна кількість різноманітних чинників, зокрема, напрямок руху потоків трійником, густина та модуль пружності на згин матеріалу, з якого виготовлений поршень, довжина поршня та витрата транспортованого продукту. Цікавими є виявлені закономірності впливу напрямів руху потоків трійниками, довжини і матеріалу поршня та витрати повітря на динаміку руху циліндричних поршнів рівнопрохідними трійниками, міцність поршнів.

Висвітлення невирішених раніше частин загальної проблеми

Крім циліндричних поршнів для очищення трубопроводів застосовують манжетні, дискові, гантельні та поршні інших геометричних форм. Однак, на сьогодні відсутня інформація щодо закономірностей руху поршнів нециліндричних форм рівнопрохідними трійниками трубопроводів. До того ж їх виготовляють із різних гіперпружних матеріалів, які мають різну твердість, модуль пружності, густину та інші характеристики. Все це впливає на динаміку руху, деформації очисних поршнів у трійниках, величину необхідного запоршневого тиску для їх проходження. Відсутність такої інформації ускладнює оцінювання придатності трубопроводу до застосування того чи іншого поршня, визначення маршруту, яким він буде рухатись у трубопроводі, що ускладнює планування. Тому треба дослідити динаміку руху поршнів різної

геометричної форми із різних гіперпружних матеріалів рівнопрохідними трійниками трубопроводів. Ускладнює задачу те, що у трійниках можливі різні напрями руху потоку:

- потік входить у відгалуження трійника та в одну зі сторін його магістралі і виходить з іншої;

- потік входить у відгалуження трійника і повністю перетікає в одну із сторін його магістралі;

- потік входить у одну із сторін магістралі трійника і повністю перетікає в його відгалуження;

- потік з двох сторін входить у магістраль трійника і виходить із його відгалуження.

Отже, треба дослідити динаміку руху поршнів кожним із цих можливих напрямів руху потоку трійниками.

Мета та завдання досліджень

Метою досліджень є експериментальне дослідження деформації та динаміку руху очисних поршнів різної геометричної форми із різних гіперпружних матеріалів рівнопрохідними трійниками трубопроводів; оцінка ризиків щодо застрягання поршнів у таких елементах; визначення необхідного запоршневого тиску, необхідного для проходження дослідними зразками поршнів трійників трубопроводів.

Завданнями досліджень є:

- експериментальні дослідження деформацій та динаміки руху дослідних зразків очисних поршнів трійниками трубопроводів;

- вимірювання тиск у запоршневому просторі під час руху дослідних зразків очисних поршнів трійниками трубопроводу.

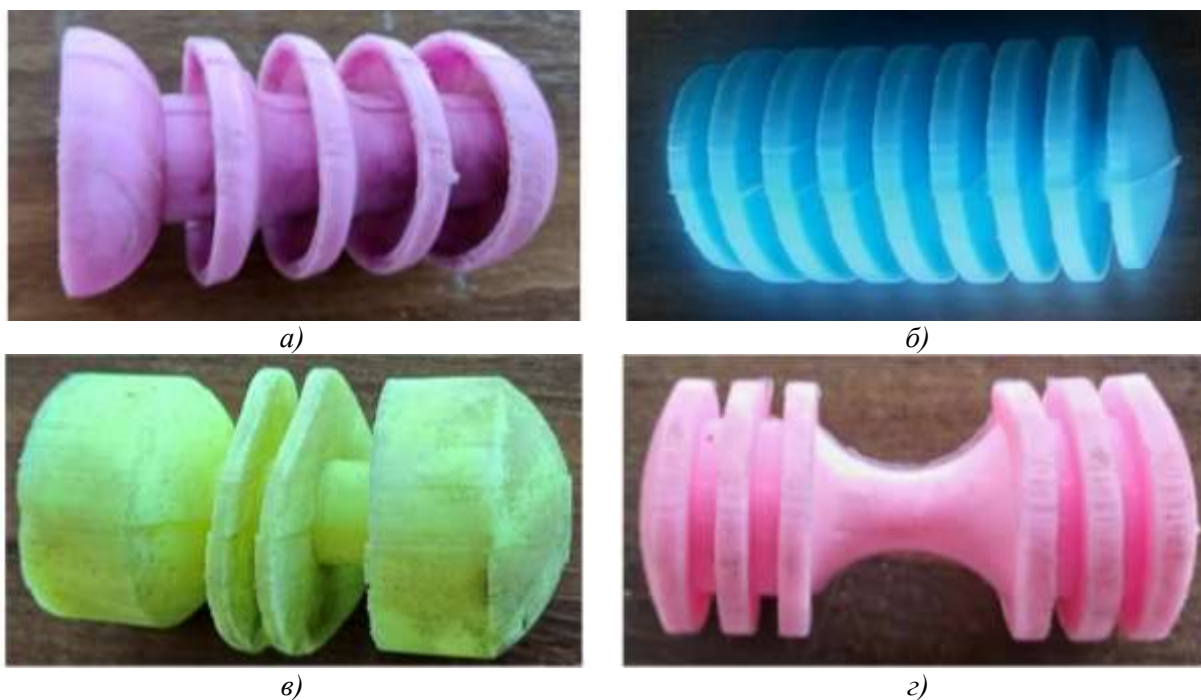
Виклад основного матеріалу

Трійники, в яких потік перетікає з відгалуження у магістраль, або навпаки, є значно більшим опором руху поршнів порівняно з прямолінійними та криволінійними ділянками трубопроводів. Причиною цього є вигинання поршнів у таких трійниках, що призводить до збільшення контактних сил та сил тертя. Суттєве збільшення контактних сил може призвести до застрягання поршнів. Щоб цього уникнути, поршні для очищення трубопроводів, які містять трійники, якими потік перетікає з відгалуження у магістраль чи навпаки, доцільно виготовляти із гіперпружних матеріалів. Такі матеріали є надзвичайно гнучкими та еластичними і здатні зазнавати великих деформацій під навантаженням. Також суттєвий вплив на прохідну здатність очисного поршня має його геометрична форма. Тому для експериментальних дослі-

джен виготовлено дослідні зразки очисних поршнів із різних гіперпружних матеріалів різної геометричної форми. Для виготовлення поршнів підібрано два гіперпружних матеріали. Це силіконовий компаунд твердістю 30 одиниць за шкалою Шор А – еластичний і гнучкий, та поліуретан твердістю 80 одиниць за шкалою Шор А – жорсткий та міцний. Також перевагою підібраних матеріалів є можливість виготовлення дослідних зразків очисних поршнів будь-якої геометричної форми. Для цього їх змішували з каталізатором та заливали у надруковані на 3D принтері ливарні форми. Приклади виготовлених дослідних зразків очисних поршнів наведено на рис. 1.

Експериментальні установки для досліджень змонтовано зі скляних та металевих труб і трійників. Установка із скляних труб і скляного трійника призначена для візуального спостереження за рухом поршнів трійником, фотофіксування його деформацій. Вона складається із трьох скляних труб 1, 2 та 3 (рис. 2) зовнішнім діаметром 65 мм, товщиною стінки 5 мм і довжиною 3,4 м, між якими поміщено скляний рівнопрохідний трійник 4. Скляні труби 1, 2 та 3 і трійник 4 з'єднані між собою надрукованими на 3D принтері фланцями 5. Експериментальна установка укомплектована камерою запускання очисних поршнів 6, яка містить манометр 7 та газовий лічильник 8. Камера запускання очисних поршнів 6 приєднана до скляної труби 1. Скляна труба 2 закрита заглушкою 9, яка містить патрубок, до якого приєднано шланг 10 від компресора 11. Поршень 12 запасовували в камеру запускання очисних поршнів 6, після чого відкривали крани 13 і 14, після чого із ресивера компресора 11 сухе стиснене повітря шлангом 15 через газовий лічильник 8 подавали в запоршневий простір, а шлангом 10 через газовий лічильник 16 – в трубу 2. У результаті дії тиску очисний поршень 12 починав рухатись трубопроводом. Під час руху поршня 12 прямими трубами 1 і 3 та трійником 4 експериментальної установки фіксували тиск у запоршневому просторі манометром 7. Витрату повітря, яке подавали у запоршневий простір, фіксували газовими лічильником 8, а в трубу 2 – газовими лічильником 16. Через відкритий торець скляної труби 3 відбувався вільний вихід повітря і очисного поршня 12.

При цьому в одних випадках до заглушки 9 приєднували шланг 10 від компресора 11, а в інших – ні. Коли шланг 10 не був приєднаний до заглушки 9, потік у трійнику 4 входив у відгалуження трійника і повністю виходив тільки у відкриту сторону його магістралі.



а) – манжетно-чашковий; б) – багатодисковий; в) – циліндрично-дводисковий;
г) – гантельно-дисковий

Рисунок 1 – Дослідні зразки очисних поршнів

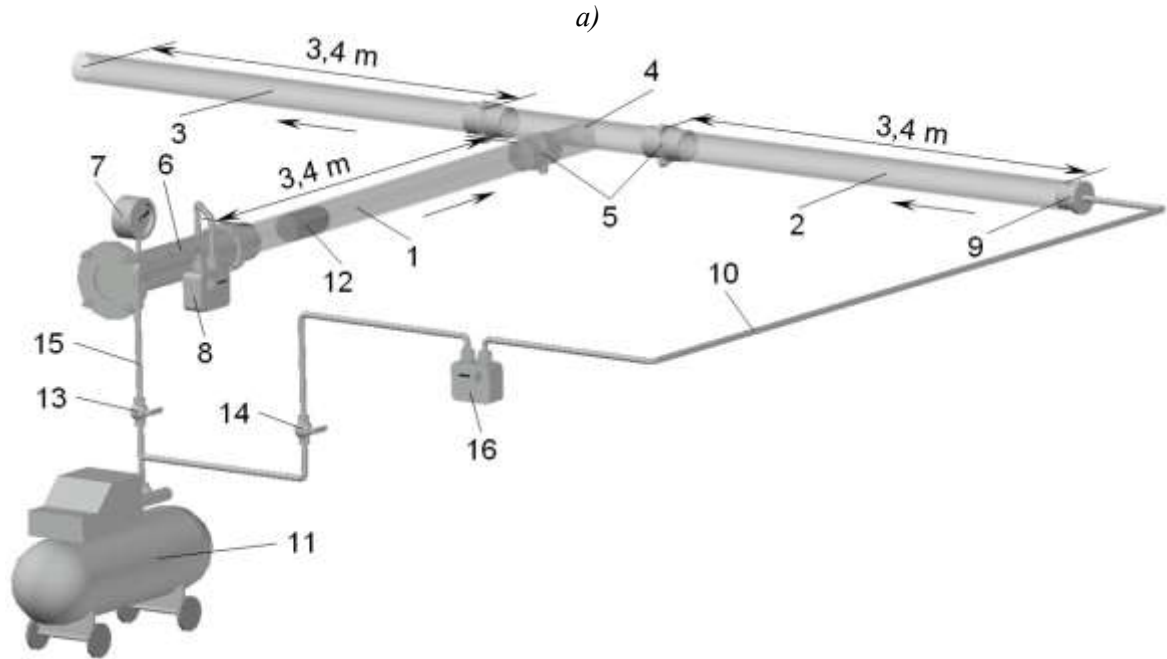
Виконано відеозапис руху поршня 12 скляним трійником 4.

Крім досліджень динаміки руху очисних поршнів трійниками, треба визначити величину тиску у запоршневому просторі, необхідну, щоб поршень пройшов трійник без застрягання. Це необхідно зробити, оскільки для виснажених газових родовищ характерним є значне зменшення робочого тиску, і він може складати тільки декілька атмосфер. Такого тиску може бути недостатньо, щоб поршень пройшов трійник трубопроводу.

Експериментальну установку для вимірювання тиску у запоршневому просторі під час руху поршнів трійником змонтовано з металевих труб і металевого трійника. Установка складається із трьох металевих труб (1, 2 та 3), між якими поміщений металевий рівнопрохідний трійник 4 (рис. 3). Довжина труби 1 рівна 4 м, а труб 2 та 3 – 1,2 м. Внутрішній діаметр труб 1, 2 та 3 і рівнопрохідного трійника 4 складає 49 мм. Труби 1, 2 та 3 з трійником 4 з'єднані різьбовими муфтами. Експериментальна установка обладнана виконаною у вигляді трійника камерою запускання поршнів 5, яка містить рівнопрохідні крани 6 та 7. До заглушки 8 камери запускання поршнів 5 приєднано манометр 9. Відгалуження трійника камери запускання поршнів 5 шлангом 10 приєднано до газового лічильника 11 та компресора 12. Трубу 2 закривали заглушкою 13, яка містить пат-

рубок, до якого приєднано шланг 14 від компресора 12. Поршні запасували в камеру запускання очисних поршнів 5, тоді відкривали крани 15 і 16 та рівнопрохідні крани 6 і 7 і із ресивера компресора 12 сухе стиснене повітря шлангом 14 подавали в трубу 2, а шлагом 10 - в запоршневий простір. У результаті дії тиску очисний поршень починав рухатись трубопроводом. Під час руху поршня прямими трубами 1 та 2 і трійником 4 експериментальної установки фіксували тиск у запоршневому просторі манометром 9 та витрату повітря, яке подавали у запоршневий простір – газовими лічильником 11, а в трубу 2 – газовими лічильником 9. Через відкритий торець труби 3 відбувався вільний вихід очисного поршня і повітря. Виконано відеозапис показів вимірюваних приладів під час руху поршня.

Щоб описати динаміку руху очисних поршнів трійником трубопроводу, виконано серію експериментальних запускань дослідних зразків поршнів. Під час руху суцільнолитих манжетно-чашкових поршнів із силіконового компаунда скляним трійником (рис. 2) відбувалися суттєві деформації поршня (рис. 4). Такі деформації обумовлені надзвичайною пружністю, гнучкістю матеріалу, із якого виготовлено поршень, та силою тертя між передньою чашкою поршня і внутрішньою стінкою магістралі трійника.



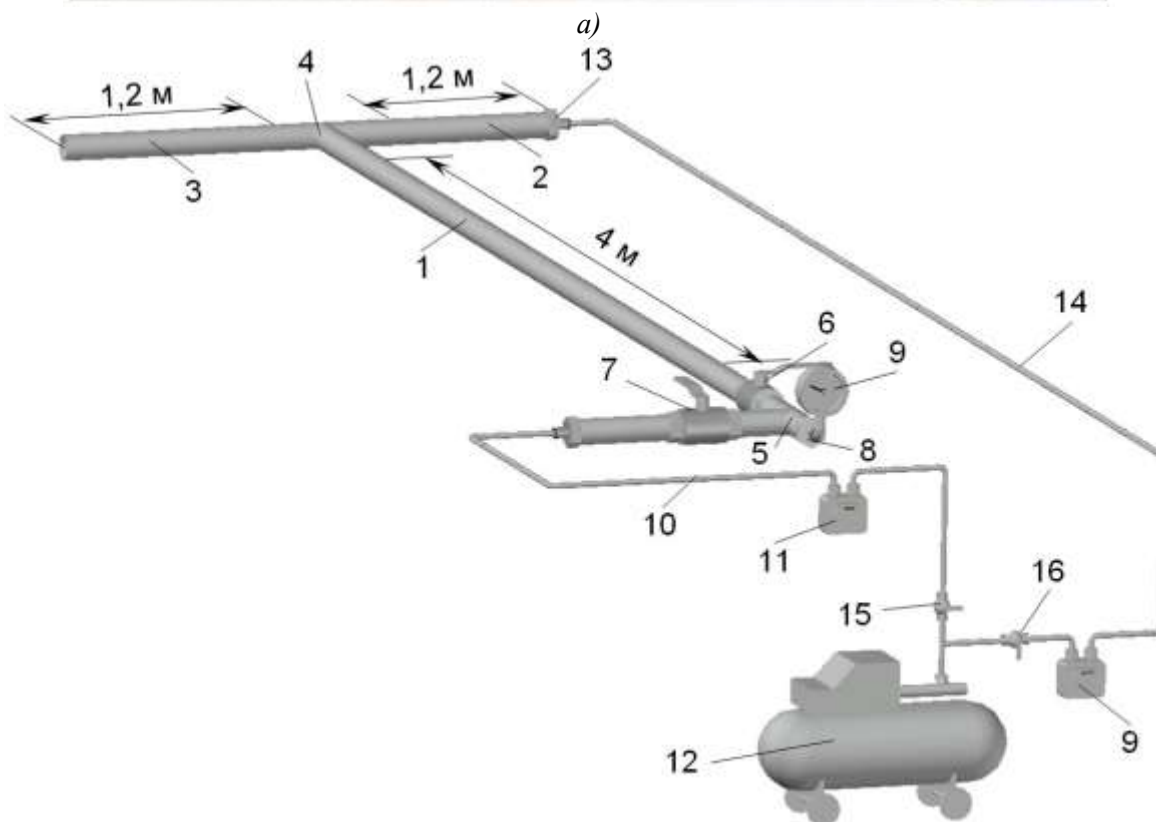
а) – фото; б) – схема; 1, 2, 3 – скляна труба; 4 – трійник; 5 – фланець;
6 – камера запускання очисних поршнів; 7 – манометр; 8, 16 – газовий лічильник;
9 – заглушка; 10, 15 – шланг; 11 – компресор; 12 – поршень; 13, 14 – кран

Рисунок 2 – Експериментальна установка для дослідження динаміки руху дослідних зразків очисних поршнів скляним трійником трубопроводу (потік повітря входить у відгалуження трійника та в одну зі сторін його магістралі, а поршень входить у відгалуження трійника)

Коли манжетно-чашковий очисний поршень із силіконового компаунда виходить із відгалуження у магістраль трійника, він передньою чашкою ударяється до внутрішньої стінки магістралі навпроти відгалуження трійника (рис. 4, а). Тоді запоршневим тиском передня чашка притискається до внутрішньої стінки магістралі трійника в місці ударяння. У результаті цього суттєво збільшуються контактні сили в місці притискання і, відповідно, сила тертя. Тому зміщень у бік руху потоку передньої чашки поршня після її ударяння до внутрішньої стінки магістралі трійника не відбувається, а вона деякий час залишається у місці ударяння. Під дією запоршневого тиску поршень все більше стискається (рис. 4, б). У результаті такого стискання осердя поршня вигинається в напрямку потоку (рис. 4, в). Посиліє вигинання

осердя та задає йому напрямок дія потоків, один з яких рухається магістраллю трійника, а другий перетікає через задню чашку поршня із запоршневого простору. У результаті вигинання осердя поршня передня чашка поршня все більше перекочується у напрямі, протилежному до напрямку вигинання осердя.

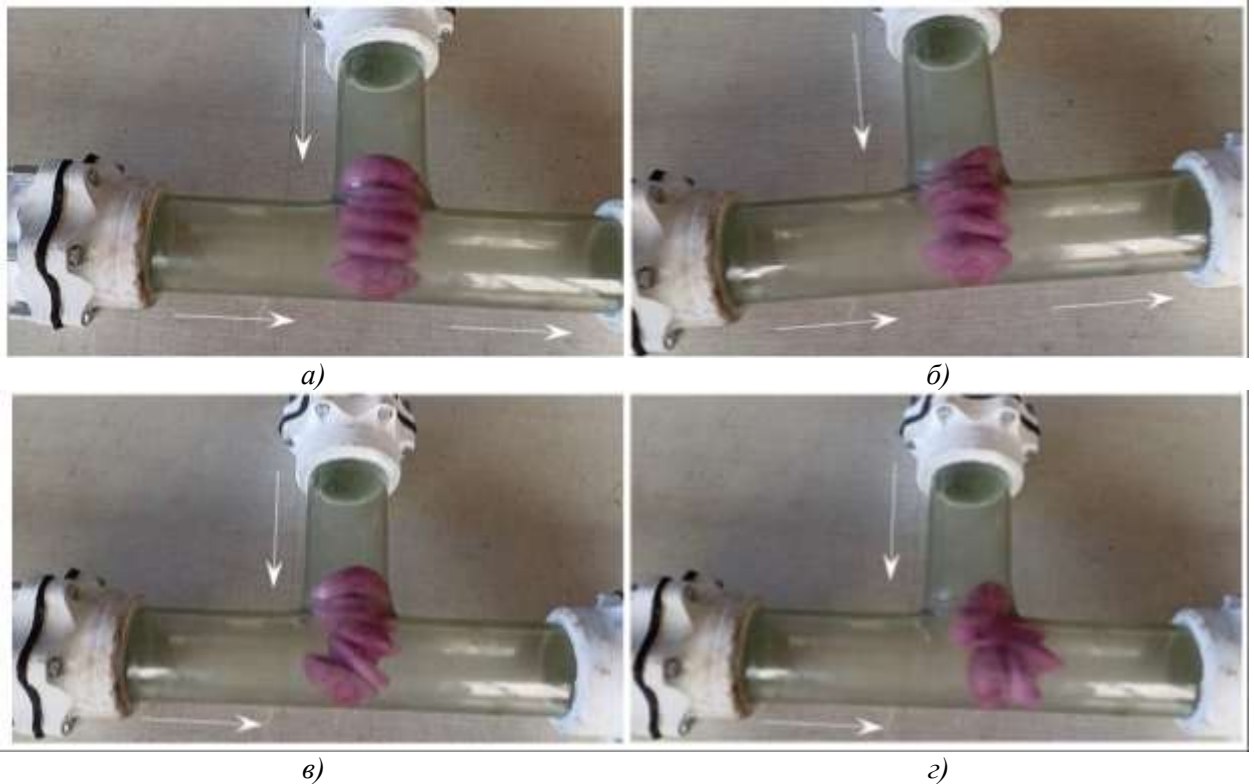
Вигинання осердя поршня і перекочування передньої чашки поршня продовжується до тих пір, поки передня чашка майже повністю не відійде від внутрішньої стінки магістралі трійника (рис. 4, г). У результаті тертя передньої чашки поршня до внутрішньої стінки магістралі трійника мінімізується, і тоді потік розвертає передню чашку. Поршень набуває початкової геометричної форми та продовжує рухатись трубопроводом.



б)

а) – фото; б) – схема; 1, 2, 3 – труба; 4 – трійник; 5 – камера запускання очисних поршнів;
6, 7 – рівнопрохідний сферичний кран; 8 – заглушка; 9 – манометр; 10, 14 – шланг;
11 – газовий лічильник; 12 – компресор; 13 – заглушка; 15, 16 – кран

Рисунок 3 – Експериментальна установка для вимірювання тиску у запоршневому просторі під час руху дослідних зразків поршнів металевим трійником трубопроводу (потік входить у відгалуження трійника та в одну з сторін його магістралі, а поршень входить у відгалуження трійника)



а) – вхід поршня у магістраль трійника; б) – позовжне стискання поршня у магістралі трійника; в), г) – вигинання поршня у магістралі трійника

Рисунок 4 – Рух манжетно-чашкового очисного поршня із силіконового компаунда скляним трійником трубопроводу (потік входить у відгалуження трійника та в одну зі сторін його магістралі, а поршень входить у відгалуження трійника)



Рисунок 5 – Застрягання манжетно-чашкового очисного поршня із поліуретану у скляному трійнику трубопроводу (потік входить у відгалуження трійника та в одну із сторін його магістралі, а поршень входить у відгалуження трійника)

Манжетно-чашковий очисний поршень із поліуретану має більшу жорсткість, ніж поршень із силіконового компаунда, тому, коли він ударяється до внутрішньої стінки магістралі навпроти відгалуження (рис. 5), його деформація і вигинання осердя є невеликими. Сила тер-

тя утримує передню чашку у місці її притискування запоршневим тиском до внутрішньої стінки магістралі трійника. Усе це призводить до застрягання манжетно-чашкового поршня у трійнику. Сприяє застряганню такого поршня у трійнику зазор, який виникає між задньою ча-

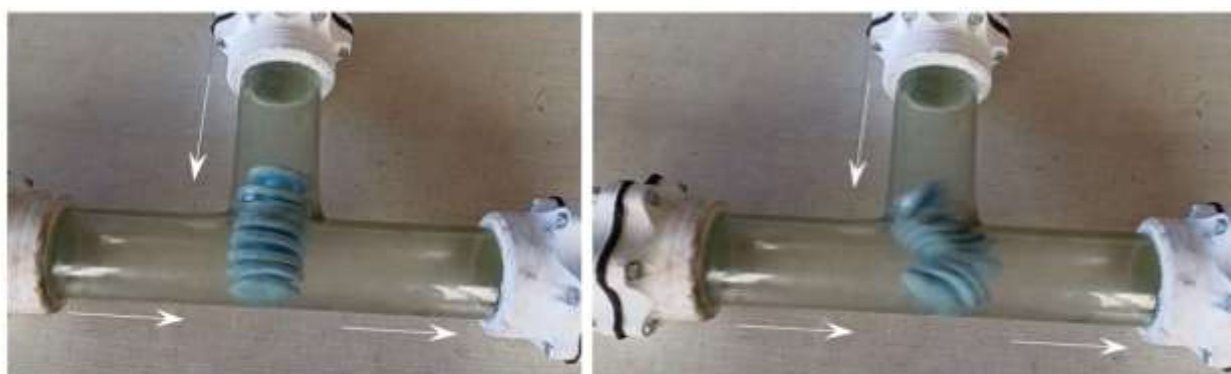


а)

б)

а) – вигляд із сторони відгалуження; б) – вигляд із сторони магістралі

Рисунок 6 – Застрягання манжетно-чашкового очисного поршня із поліуретану в металевому трійнику трубопроводу (потік входить у відгалуження трійника та в одну із сторін його магістралі, а поршень входить у відгалуження трійника)



а)

б)

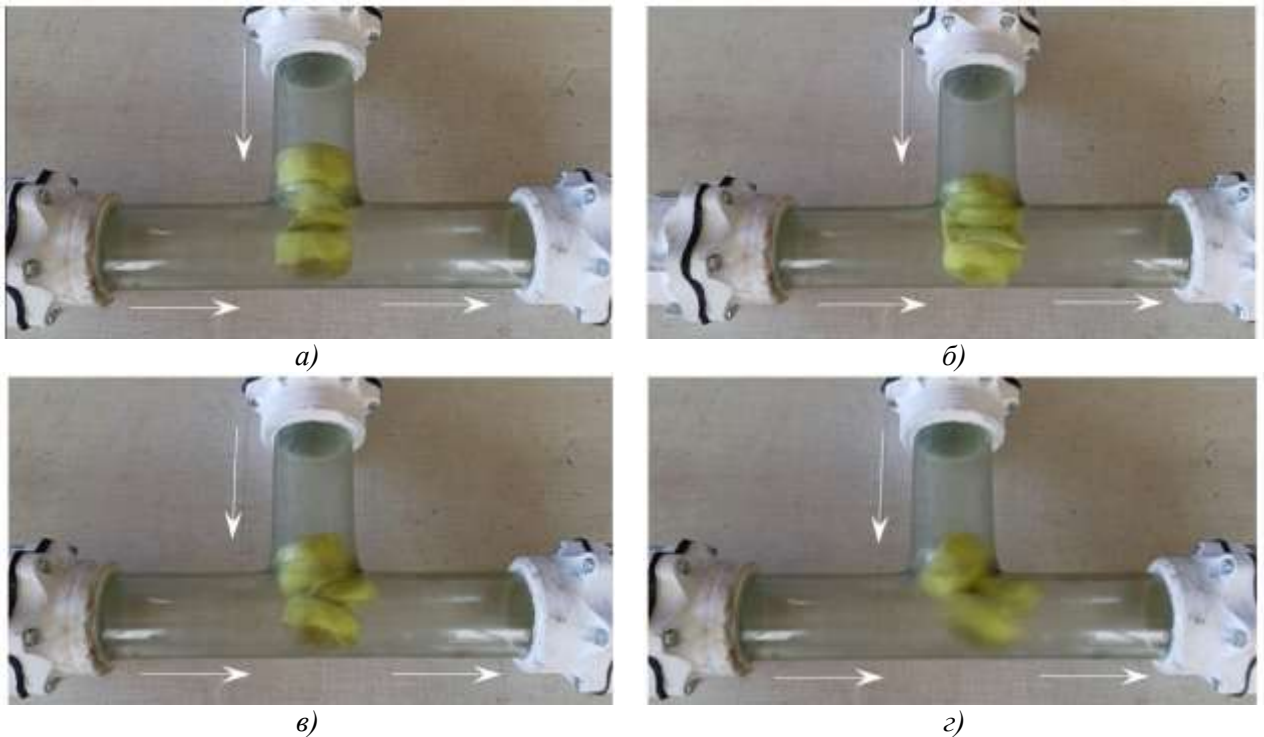
а) – вхід поршня у магістраль трійника; б) – вигинання поршня у магістралі трійника

Рисунок 7 – Рух багатодискового очисного поршня із силіконового компаунда скляним трійником трубопроводу (потік входить у відгалуження трійника та в одну із сторін його магістралі, а поршень входить у відгалуження трійника)

шкою і внутрішньою стінкою відгалуження трійника (рис. 6, а), через який перетікає потік із запоршневого простору. Такий зазор виникає внаслідок незначного вигинання осердя поршня і перекошування задньої чашки. Також до виникнення зазору призводить притискання потоком задньої чашки та манжет поршня до внутрішньої стінки відгалуження трійника із сторони, протилежної місцю виникнення зазору (рис. 8, а). Зазори наявні і між частиною поршня, яка знаходиться у магістралі трійника, та внутрішньою стінкою магістралі (рис. 6, б). Через ці зазори проходить потік, який рухається магістраллю трійника.

Багатодискові очисні поршні із силіконового компаунда також зазнають суттєвих деформацій у трійниках трубопроводу, у яких потік входить у відгалуження та в одну з сторін магістралі, а поршень входить у відгалуження трійника (рис. 7). Після виходу багатодискового

поршня із силіконового компаунда із відгалуження у магістраль трійника він переднім торцем ударяється до внутрішньої стінки магістралі навпроти відгалуження трійника (рис. 7, а). Тоді передній торець поршня запоршневим тиском притискається до внутрішньої стінки магістралі трійника в місці ударяння, що призводить до збільшення сили тертя, і він деякий час залишається у місці ударяння. Після цього у результаті дії потоків, які рухаються магістраллю та відгалуженням трійника, відбувається вигинання осердя поршня, і передній торець поршня відходить від внутрішньої стінки магістралі трійника (рис. 7, б). Тертя переднього торця поршня до внутрішньої стінки магістралі трійника мінімізується, потік розвертає передню частину поршня, і той набуває початкової геометричної форми та продовжує рухатись трубопроводом.



a) – вхід поршня у магістраль трійника; б) – поздовжнє стискання поршня у магістралі трійника; в), з) – вигинання поршня у магістралі трійника

Рисунок 8 – Рух циліндрично-двотискового очисного поршня із силіконового компаунда скляним трійником трубопроводу (потік входить у відгалуження трійника та в одну із сторін його магістралі, а поршень входить у відгалуження трійника)

Циліндрично-двотисковий очисний поршень із силіконового компаунда також після виходу із відгалуження у магістраль трійника переднім торцем ударяться до внутрішньої стінки магістралі, навпроти відгалуження трійника (рис. 8, а). Тоді передній торець поршня запоршневим тиском притискається до внутрішньої стінки магістралі трійника в місці ударяння, що призводить до збільшення сили тертя, і він на деякий час залишається у місці ударяння. Під дією запоршневого тиску поршень поздовжньо стискається (рис. 8, б). Після чого потік вигинає середню частину поршня, і передній його торець відходить від внутрішньої стінки магістралі трійника (рис. 8, в, г). У результаті тертя переднього торця поршня до внутрішньої стінки магістралі трійника мінімізується, потік розвертає передню частину поршня, після чого він повертається до вихідної геометричної форми та продовжує рух трубопроводом.

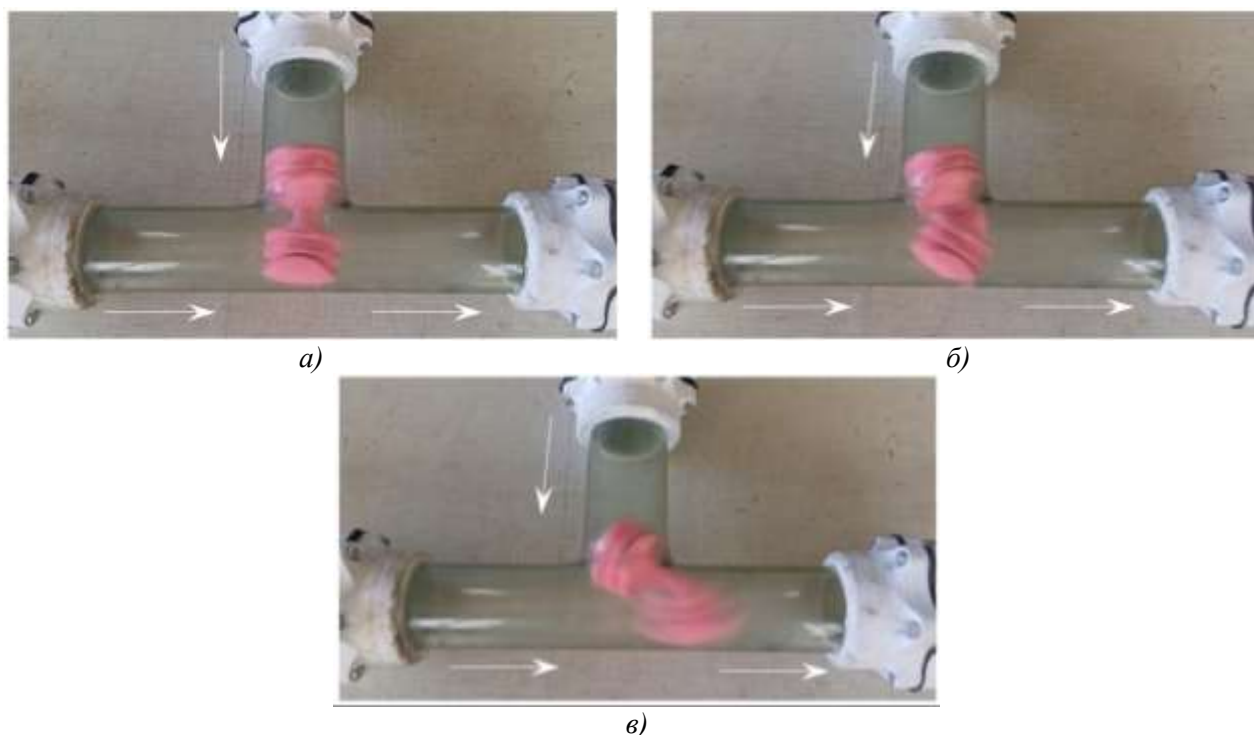
Гантельно-дискотисковий очисний поршень із силіконового компаунда після виходу із відгалуження у магістраль трійника переднім торцем ударяться до внутрішньої стінки магістралі, навпроти відгалуження трійника (рис. 9, а). Тоді потік вигинає осердя поршня, і передній його торець відходить від внутрішньої стінки магістралі трійника (рис. 9, б). У результаті те-

ртя переднього торця поршня до внутрішньої стінки магістралі трійника мінімізується, потік розвертає передню частину поршня (рис. 9, в), і той, повернувши свою вихідну геометричну форму, продовжує рухатись трубопроводом.

Закономірності руху усіх дослідних зразків очисних поршнів скляним трійником, в якому потік входить тільки у відгалуження і виходить із однієї з сторін магістралі, а поршень входить у відгалуження трійника, такі ж, як у розглянутому трійнику, в якому потік входить у трійник і з відгалуження і з однієї сторони магістралі.

Що стосується руху скляним трійником багатодискотискового, гантельно-двотискового та гантельно-багатодискотискового очисних поршнів із поліуретану, то вони, як і манжетно-чашковий поршень, застрягали, оскільки поліуретан має більшу твердість, ніж силіконовий компаунд, і поршні мають більшу жорсткість.

Для вимірювання тиску у запоршневому просторі під час руху поршнів трійником трубопроводу виконано серію експериментальних запускань дослідних зразків поршнів із силіконового компаунда у трубопровід, змонтований із металевих прямих труб 1, 2 та 3 і рівнопрохідного трійника 4 (рис. 3). Результати вимірювання тиску на вході трубопроводу манометром 9 під час руху дослідних зразків очисних



а) – вхід поршня у магістраль трійника; б), в) – вигинання поршня у магістралі трійника
Рисунок 9 – Рух гантельно-дискового очисного поршня із силіконового компаунда скляним трійником трубопроводу (потік входить у відгалуження трійника та в одну із сторін його магістралі, а поршень входить у відгалуження трійника)

Таблиця 1 – Результати вимірювання тиску у запоршневому просторі під час руху дослідних зразків очисних поршнів із силіконового компаунда прямолінійними ділянками та трійником трубопроводу

№	Геометрична форма поршня	Тиск на вході, МПа		
		рух поршня прямолінійною ділянкою трубопроводу	рух поршня трійником (потік входить у відгалуження трійника та в одну із сторін його магістралі, а поршень входить у відгалуження трійника)	рух поршня трійником (потік і поршень входять у відгалуження трійника і виходять в одну із сторін його магістралі)
1	Манжетно-чашкова	0,021	0,046	0,055
2	Багатодискова	0,035	0,091	0,108
3	Циліндрично-дводискова	0,042	0,193	0,228
4	Гантельно-дискова	0,028	0,063	0,078

поршнів із силіконового компаунда прямолінійними ділянками 1, 3 та трійником 4 експериментальної установки подано в табл. 1. Дослідження виконано для двох схем руху потоків повітря трійником. За першою схемою потік входив у відгалуження трійника та в одну з сторін його магістралі, а поршень входив у відгалуження трійника (рис. 3). За другою схемою потік і поршень входили у відгалуження трій-

ника і виходили в одну з сторін його магістралі. Після виходу з камери запускання прямою трубою 1 усі дослідні зразки поршнів рухалися з постійною швидкістю і постійним тиском у запоршневому просторі. Якщо поршень рухається з постійною швидкістю, то сила тиску, яка діє на нього, та сила тертя ковзання врівноважені. Під час входу поршнів у трійник і руху його середньою частиною запоршневий тиск

збільшувався. Коли поршні виходили із трійника і рухалися прилеглою до нього прямою трубою 3, запоршневий тиск зменшувався. Причиною збільшення запоршневого тиску є збільшення сил тертя через вигинання поршнів у трійнику (рис. 4 – рис. 9) та притискання ущільнювальних елементів поршнів до внутрішньої стінки трійника і збільшення контактних сил.

Дослідні зразки однакової геометричної форми запускали декілька разів за різної витрати повітря на вході трубопроводу, яку змінювали в межах від $0,005 \text{ м}^3/\text{с}$ до $0,05 \text{ м}^3/\text{с}$. Суттєвого впливу на величину запоршневого тиску витрата повітря не чинила.

Найменший тиск у запоршневому просторі, щоб поршень пройшов трійник, потрібний для манжетно-чашкового поршня із силіконового компаунда (табл. 1). Причиною цього є те, що під дією запоршневого тиску його осердя легко вигинається у трійнику, а гнучкі ущільнювальні елементи (манжети та чашки) не чинять цьому суттєвого опору (рис. 4). Натомість найбільший у запоршневому просторі тиск потрібний для руху циліндрично-двостороннього поршня із силіконового компаунда трійником (табл. 1). Причиною цього є те, що жорстка задня циліндрична частина чинить опір вигинанню поршня у трійнику, після його ударяння до внутрішньої стінки магістралі трійника. Тому його у трійнику спочатку запоршневим тиском стискає, а тоді вигинає середню частину стиснутого поршня, для чого потрібен великий тиск.

Під час впровадження технології очищення поршнями із гіперпружних матеріалів промислових газопроводів виснажених газових родовищ, трубопроводів газових, водопровідних та теплових мереж, які експлуатуються під низьким тиском, найперше треба запускати тестові очисні поршні, які здатні проходити прямолінійні ділянки, трійники за найменшого запоршневого тиску. Такими поршнями є манжетно-чашкові із силіконового компаунда. Якщо цими поршнями не буде досягнуто необхідної якості очищення трубопроводу, а тиск у запоршневому просторі достатній, щоб поршень пройшов увесь трубопровід із трійником, то доцільно запускати гантельно-дисківий тестовий поршень. Якщо потрібно здійснювати подальше очищення трубопроводу тоді потрібно запускати ще жорсткіші поршні – багатодисківий і циліндрично-двосторонній.

Висновки

Здатність очисних поршнів проходити трійники трубопроводів, в яких потік із відгалуження перетікає у магістраль, визначається характеристиками матеріалу, з якого виготовлений поршень, геометричною формою поршня та запоршневим тиском.

Експериментально встановлено, що, коли поршні із силіконового компаунда виходять із відгалуження у магістраль трійника, вони переднім торцем ударяється до внутрішньої стінки магістралі навпроти відгалуження трійника. Тоді вигинається їх середня частина, у результаті чого передній торець поршня відходить від внутрішньої стінки магістралі трійника, тертя мінімізується, і потік розвертає передню частину поршня та рухає його далі трубопроводом.

За найменшого тиску у запоршневому просторі (від $0,46$ до $0,55 \text{ кгс}/\text{см}^2$ залежно від схеми руху потоків) трійник проходить манжетно-чашковий очисний поршень із силіконового компаунда. Сприяє цьому легке вигинання його осердя та відсутність суттєвого опору цьому ущільнювальних елементів поршня (манжет та чашок). Найбільший тиск у запоршневому просторі (від $1,93$ до $2,28 \text{ кгс}/\text{см}^2$ залежно від схеми руху потоків) потрібний для руху циліндрично-двостороннього поршня із силіконового компаунда трійником. Причиною цього є те, що після ударяння такого поршня до внутрішньої стінки магістралі трійника жорстка задня циліндрична частина поршня чинить опір вигинанню його середньої частини. Тому його у трійнику спочатку запоршневим тиском стискає, а тоді вигинає середню частину стиснутого поршня, для чого потрібен великий тиск.

Руйнувань, пошкоджень дослідних зразків очисних поршнів із силіконового компаунда під час руху трійниками не відбувається.

Поршні із поліуретану мають більшу жорсткість, ніж із силіконового компаунда, тому після їх виходу із відгалуження трійника і ударяння переднім торцем до внутрішньої стінки магістралі середня частина поршня вигинається мінімально. У результаті такі поршні застрягають у трійниках. Сприяє їх застряганню зазор, який виникає між задньою частиною і внутрішньою стінкою відгалуження трійника.

Література

1. Kondrat R., Matiishyn L. Improving the efficiency of production wells at the final stage of gas field development. *Mining of Mineral Deposits*. 2022. No 16(2). P. 1-6. DOI: <https://doi.org/10.33271/mining16.02.001>
2. Воловецький В. Б., Щирба О. М., Витязь О. Ю., Дорошенко Я. В. Збільшення обсягів відбору газу в умовах періодичної експлуатації газоконденсатних свердловин. *Науковий вісник ІФНТУНГ*. 2013. № 2 (35). С. 111-120.
3. Matkivskiy S., Khaidarova L. Increasing the Productivity of Gas Wells in Conditions of High Water Factors. *Proceedings of the SPE Eastern Europe Subsurface Conference "EESC 2021"*, 23-24 Nov. 2021, Kyiv. DOI: <https://doi.org/10.2118/208564-MS>
4. Volovetskyi V.B., Doroshenko Ya.V., Matkivskiy S.V., Raiter P.M., Shchyrba O.M., Stetsiuk S.M., Protsiuk H.Ya. Development of methods for predicting hydrate formation in gas storage facilities and measures for their prevention and elimination. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*. 2023. Vol. 111, Iss. 2. P. 25-41. <https://doi.org/10.5604/01.3001.0053.5955>
5. Дорошенко Я. В., Карпаш О. М., Гожаєв Б. Н. Дослідження складу трубопровідних газорідинних 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. DOI: [https://doi.org/10.31471/1993-9973-2019-4\(73\)-35-45](https://doi.org/10.31471/1993-9973-2019-4(73)-35-45)
6. Воловецький В. Б., Щирба О. М., Витязь О. Ю., Дорошенко Я. В. Аналіз причин зниження гідравлічної ефективності міжпромислових газопроводів та вибір способів її підвищення. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2013. № 3 (48). С. 147-155.
7. Стецюк С. М., Дорошенко Я. В., Бондаренко Р. В., Філіпчук О. О., Дорошенко Ю. І. Дослідження впливу геометричної форми та матеріалу поршнів на ефективність очищення трубопроводів. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2023. № 4 (89). С. 26-43. DOI: [https://doi.org/10.31471/1993-9973-2023-4\(89\)-26-43](https://doi.org/10.31471/1993-9973-2023-4(89)-26-43)
8. Стецюк С. М. Розроблення конструктивних рішень із обладнання трубопровідних систем вузлами запускання та приймання очисних поршнів. *Нафтогазова енергетика*. 2023. № 2 (40). С. 53-65. DOI: [https://doi.org/10.31471/1993-9868-2023-2\(40\)-53-65](https://doi.org/10.31471/1993-9868-2023-2(40)-53-65)
9. Donoghue A. O. Why Pigs get Stuck, and how to avoid it. *Proceedings of the Pipeline Pigging, Integrity Assessment, and Repair Conference*, 30 Oct. 2002, Amsterdam, Netherlands. P. 1-16.
10. Ward P., Cockfield D. Development of the pathfinder foam caliper pig. *Scripta Materialia*. 2006. No 54/2. P. 251-256. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2005.09.028>
11. Кондрат Р.М., Угриновський А.В., Петришак В.С., Сапожкова Т.С. Характеристика та вибір очисних пристроїв для очищення внутрішньої порожнини трубопроводів. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2013. № 3 (48). С. 48-61.
12. Brown P., Ritchie J., McKay K., Kenny J., Grass A. Piggable Pipeline Wye Connection – Development And Design. *Proceedings of ASPECT '90*, 30 May 1990, Aberdeen.
13. https://www.researchgate.net/publication/297270105_Difficult_to_pig_pipelines
14. <https://www.sunnysteel.com/barred-tee.php>
15. Stetsiuk S., Bondarenko R., Doroshenko Y., Holubenko V. Experimental studies on the dynamics of the movement of cleaning pigs through tee pipe fittings. *Strojnický časopis – Journal of Mechanical Engineering*. 2024. Vol. 74, No 1. P. 9–24. DOI: <https://doi.org/10.2478/scjme-2024-0002>

References

1. Kondrat R., Matiishyn L. Improving the efficiency of production wells at the final stage of gas field development. *Mining of Mineral Deposits*. 2022. No 16(2). P. 1-6. DOI: <https://doi.org/10.33271/mining16.02.001>
2. Volovetskyi V. B., Shchyrba O. M., Vytiaz O. Yu., Doroshenko Ya. V. Zbilshennia obsiahiv vidboru hazu v umovakh periodychnoi ekspluatatsii hazokondensatnykh sverdlovyn. *Naukovyi visnyk IFNTUNH*. 2013. No 2 (35). P. 111-120. [in Ukrainian]
3. Matkivskiy S., Khaidarova L. Increasing the Productivity of Gas Wells in Conditions of High Water Factors. *Proceedings of the SPE Eastern Europe Subsurface Conference "EESC 2021"*, 23-24 Nov. 2021, Kyiv. DOI: <https://doi.org/10.2118/208564-MS>
4. Volovetskyi V.B., Doroshenko Ya.V., Matkivskiy S.V., Raiter P.M., Shchyrba O.M., Stetsiuk S.M., Protsiuk H.Ya. Development of methods for predicting hydrate formation in gas storage facilities and measures for their prevention and elimination. *Journal of Achievements in*

Materials and Manufacturing Engineering. 2023. Vol. 111, Iss. 2. P. 25-41. <https://doi.org/10.5604/01.3001.0053.5955>

5. Doroshenko Ya. V., Karpash O. M., Hozhaiev B. N. Doslidzhennia skladu trubovozrovidnykh hazoridnykh potokiv ta vplyvu naiavnykh u nykh shkidlyvykh domishok na rezhymy perekachuvannia, enerhovytraty na transportuvannia. *Rozvidka ta rozrobka naftovykh i hazovykh rodovyshch*. 2019. No 4 (73). P. 35-45. DOI: [https://doi.org/10.31471/1993-9973-2019-4\(73\)-35-45](https://doi.org/10.31471/1993-9973-2019-4(73)-35-45) [in Ukrainian]

6. Volovetskyi V. B., Shchyrba O. M., Vytiaz O. Yu., Doroshenko Ya. V. Analiz prychnyn znyzhennia hidravlichnoi efektyvnosti mizhpomyshovykh hazoprovodiv ta vybir sposobiv yii pidvyshchennia. *Rozvidka ta rozrobka naftovykh i hazovykh rodovyshch*. 2013. No 3 (48). P. 147-155. [in Ukrainian]

7. Stetsiuk S. M., Doroshenko Ya. V., Bondarenko R. V., Filipchuk O. O., Doroshenko Yu. I. Doslidzhennia vplyvu heometrychnoi formy ta materialu porshniv na efektyvnist ochyshchennia truboprovodiv. *Rozvidka ta rozrobka naftovykh i hazovykh rodovyshch*. 2023. No 4 (89). P. 26-43. DOI: [https://doi.org/10.31471/1993-9973-2023-4\(89\)-26-43](https://doi.org/10.31471/1993-9973-2023-4(89)-26-43) [in Ukrainian]

8. Stetsiuk S. M. Rozroblennia konstruktyvnykh rishen iz obladnannia truboprovodnykh system vuzlamy zapuskannia ta pryimannia ochysnykh porshniv. *Naftohazova enerhetyka*. 2023. No 2 (40). P. 53-65. DOI: [https://doi.org/10.31471/1993-9868-2023-2\(40\)-53-65](https://doi.org/10.31471/1993-9868-2023-2(40)-53-65) [in Ukrainian]

9. Donoghue A. O. Why Pigs get Stuck, and how to avoid it. *Proceedings of the Pipeline Pigging, Integrity Assessment, and Repair Conference*, 30 Oct. 2002, Amsterdam, Netherlands. P. 1-16.

10. Ward P., Cockfield D. Development of the pathfinder foam caliper pig. *Scripta Materialia*. 2006. No 54/2. P. 251-256. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2005.09.028>

11. Kondrat R.M., Uhrynovskiy A.V., Petryshak V.S., Sapozhkova T.S. Kharakterystyka ta vybir ochysnykh prystroiv dlia ochyshchennia vnutrishnoi porozhnyny truboprovodiv. *Rozvidka ta rozrobka naftovykh i hazovykh rodovyshch*. 2013. No 3 (48). P. 48-61. [in Ukrainian]

12. Brown P., Ritchie J., McKay K., Kenny J., Grass A. Piggable Pipeline Wye Connection – Development And Design. *Proceedings of ASPECT '90*, 30 May 1990, Aberdeen.

13. https://www.researchgate.net/publication/297270105_Difficult_to_pig_pipelines

14. <https://www.sunnysteel.com/barred-tee.php>

15. Stetsiuk S., Bondarenko R., Doroshenko Y., Holubenko V. Experimental studies on the dynamics of the movement of cleaning pigs through tee pipe fittings. *Strojnícky časopis – Journal of Mechanical Engineering*. 2024. Vol. 74, No 1. P. 9–24. DOI: <https://doi.org/10.2478/scjme-2024-0002>