

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІКИ РУХУ ОЧИСНИХ ПОРШНІВ ІЗ ГІПЕРПРУЖНИХ МАТЕРІАЛІВ ВІДВОДАМИ І ПЕРЕХІДНИКАМИ ТРУБОПРОВОДІВ

С. М. Стецюк

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

Розглянуто труднощі, які часто виникають під час планування застосування поршнів для очищення внутрішньої порожнини різноманітних трубопроводних систем від рідинних і твердих забруднень. Виготовлено циліндричні очисні поршні із різних гіперпружних матеріалів (пінополіуретан різної густини, пружно-полімерна композиція, силіконовий герметик та силіконовий компаунд). Визначено значення модуля пружності на згин та розтяг матеріалів, із яких виготовлено поршні. З метою оцінювання ризиків щодо застрягання, руйнування поршнів із різних гіперпружних матеріалів у фасонних елементах трубопроводів розроблено і змонтовано лабораторні експериментальні установки із скляних, металевих труб, відводів різних радіусів і кутів вигину та перехідників із більшого на менший діаметр труб. Експериментально досліджено динаміку руху поршнів із гіперпружних матеріалів відводами, перехідниками трубопроводів. Описано сили, які діють на поршень під час його руху такими елементами трубопроводів. У відводах, перехідниках трубопроводів динаміку руху поршнів визначає сила тертя між бічною поверхнею циліндричних поршнів і внутрішньою стінкою та сила інерції. Рух поршня у відводі, перехіднику сповільнювався, припинявся більшою силою тертя, яка зумовлена вигинанням, стисканням поршня. На основі аналізу динаміки руху поршнів відводами, перехідниками, аналізу сил, які на них діють, описано причини тимчасової зупинки, застрягання, механізми руйнування поршнів. Визначено можливі негативні наслідки, до яких може призвести тимчасова зупинка поршнів із гіперпружних матеріалів у відводах, перехідниках трубопроводів. Одержані результати дають змогу зрозуміти закономірності руху очисних поршнів із різних гіперпружних матеріалів відводами, перехідниками трубопроводів, зрозуміти причини їх застрягання, руйнування в таких елементах.

Ключові слова: пінополіуретан; силікон; модуль пружності; сила тертя; застрягання; руйнування.

Difficulties that often arise when planning the use of pigs for cleaning the internal cavity of various pipeline systems from liquid and solid contamination are considered. Cylindrical cleaning pigs are made from various hyperelastic materials (polyurethane foam of different densities, elastic polymer composition, silicone sealant and silicone compound). The value of the modulus of elasticity for bending and stretching of the materials from which the pigs are made is determined. In order to assess the risks of jamming and destruction of pigs made of various hyperelastic materials in shaped elements of pipelines, laboratory experimental installations of glass and metal pipes, bends of different radii and bend angles, and reducers from larger to smaller pipe diameters were developed and assembled. The dynamics of the movement of pigs made of hyperelastic materials through bends and pipeline reducers were experimentally studied. The forces acting on the pig during its movement by such pipeline elements are described. In bends, pipeline reducers, the dynamics of pig movement is determined by the force of friction between the side surface of the cylindrical pigs and the inner wall and the force of inertia. The movement of the pig in the bend, the reducer slowed down, stopped due to the greater force of friction, which is caused by the bending and compression of the pig. On the basis of the analysis of the dynamics of the movement of the pigs by bends, reducers, the analysis of the forces acting on them, the causes of temporary stoppage, jamming, and the mechanisms of the destruction of the pigs are described. The possible negative consequences that can be caused by the temporary stoppage of pigs made of hyperelastic materials in bends, reducers of pipelines have been determined. The obtained results make it possible to understand the patterns of movement of cleaning pigs made of various hyperelastic materials through bends, pipeline reducers, to understand the reasons for their jamming and destruction in such elements.

Key words: polyurethane foam; silicone; modulus of elasticity; force of friction; jamming; destruction.

Вступ

Під час будівництва та експлуатації у внутрішній порожнині трубопроводів неминує накопичуються значна кількість різноманітних твердих і рідких забруднень. Твердими забрудненнями можуть бути, наприклад, пісок чи

продукти внутрішньотрубної корозії, які накопичилися в трубопроводі, парафін або накіп, що прилипають до внутрішньої стінки трубопроводу.

У внутрішній порожнині промислових газопроводів накопичується значна кількість вуг-

леводневого конденсату, пластової води, пісок, окиси заліза [1-3]. У магістральних газопроводах через термодинамічні та гідродинамічні процес може конденсуватись рідина. У нафтопроводах парафіни прилипають до внутрішньої стінки труби [4-6].

Забруднення, як правило, накопичуються в понижених ділянках трубопроводів і призводять до зниження їх гідравлічної ефективності (зменшення пропускної здатності і збільшення втрат тиску) та посилення процесів внутрішньотрубною корозії. Зниження гідравлічної ефективності промислових газопроводів призводить до нестабільності роботи газових і газоконденсатних свердловин [7, 8]. Якщо швидкість потоку в трубопроводі достатньо велика, то забруднення можуть рухатись, що призводить до виникнення двофазних потоків і ерозійного зношування фасонних елементів. В осінньо-зимовий період накопичення води і конденсату в газопроводах може призвести до формування гідратів, що стає причиною значного зменшення пропускної здатності газопроводу [9, 10]. Також гідрати можуть легко перекрити трубопровід. У такому випадку метанол для їх розчинення неможливо закачати.

Для забезпечення безпеки і ефективності процесу транспортування і видобування трубопроводів треба регулярно технічно обслуговувати. Одним із найкращих засобів для внутрішньотрубною обслуговування трубопроводів є поршні. Очисні поршні, якими очищують трубопроводи, бувають різних конструкцій, різної форми і їх виготовляють із різних матеріалів. В основному застосовують очисні кулі, очисні поршні із гіперпружних матеріалів (силікон, пінополіуретан тощо) та манжетні чи дискові очисні поршні. Очисні кулі не є достатньо ефективними через перетікання під час їх руху газопроводом, що зумовлено малою площею контакту. Манжетні та дискові очисні поршні мають металевий корпус і є жорсткими, а тому ускладнене, доволі часто взагалі неможливе їх проходження відводами з малим радіусом вигину і перехідниками складних трубопровідних систем.

Ускладненням є те, що промислові, міжпромислові газопроводи та газові мережі спроектовані і побудовані без передбачення їх очищення і діагностування поршнями. Вони не містять вузлів запускання і приймання поршнів, мають велику кількість різноманітних фасонних елементів (відводи малого радіусу вигину, трійники, перехідники з більшого на менший діаметр і навпаки). Більше того, оскільки трубопровідні системи збирання газу газових ро-

довищ та газові мережі міст з часом розвивалися, розширювалися, багато таких трубопровідних систем є надзвичайно розгалуженими і складними. Все це суттєво ускладнює застосування поршнів.

Для вирішення цього ускладнення перспективним є використання поршнів із гіперпружних матеріалів, які вирізняються спроможністю проходити різноманітні трубопровідні елементи складної геометричної форми.

Труднощами, які часто виникають під час планування застосування поршнів із гіперпружних матеріалів, є відсутність достовірної інформації для прогнозування їх руху відводами, перехідниками і іншими елементами трубопроводів. Найбільшою проблемою є ризик застрягання поршнів, оскільки складні трубопровідні системи містять велику кількість різноманітних фасонних елементів. Фасонні елементи мають складну геометричну форму, що створює велику кількість невизначеностей. Такими фасонними елементами є відводи, трійники, перехідники з більшого на менший діаметр труб. Застрягання поршня в трубопроводі є найгіршим сценарієм і може призвести до великих витрат, пов'язаних з пошуком і видаленням поршня, зупинкою транспортування продукту, спорожненням трубопроводу. Також наслідком застрягання поршня може бути його руйнування.

Аналіз сучасних закордонних і вітчизняних досліджень і публікацій

Неправильно підібраний матеріал або форма поршня можуть бути причиною його застрягання під час руху трубопроводом. Одними з елементів трубопровідних систем, у внутрішній порожнині яких це можливо, є відводи, перехідники з більшого на менший діаметр труб [11]. Застрягання може призвести до виникнення великого перепаду тиску на поршні і, як наслідок, дії на поршень значної сили, що може його пошкодити або зруйнувати.

Динаміка руху поршнів відводами, перехідниками залежить від їх геометричних параметрів (довжина, діаметр), фізико-механічних властивостей матеріалу, з якого вони виготовлені. Максимально допустиму довжину жорсткого циліндричного поршня, який може проходити відвід, можна визначити, застосовуючи аналітичну геометрію [12]. Такий підхід дає можливість встановити функціональну залежність між геометричними параметрами жорсткого циліндричного поршня і геометричними параметрами відводу. Іншим широко розповсюдженим підходом є математичне моделювання динаміки руху різноманітних поршнів

відводами. В [13, 14] на основі аналізу сил, які діють на поршень під час його переміщення відводом, отримано рівняння руху. Такі рівняння дають змогу визначити сили, які діють на поршень, швидкість руху поршня в місці його входу у відвід, в середній частині відводу та в місці виходу поршня з відводу. Недоліком такого підходу є те, що під час руху поршня відводом занадто багато змінних параметрів, тому математичним, аналітичним моделюванням не можливо виконати аналіз повною мірою. Ще одним підходом є чисельне моделювання руху поршнів відводами трубопроводів у різноманітних програмних комплексах. Таке моделювання дає змогу врахувати більше параметрів і отримати чіткішу фізичну картину руху поршня відводом. У [15, 16] чисельним моделюванням досліджено динаміку руху манжетного, пінополіуретанового (середньої щільності) поршнів відводом. За результатами моделювання отримано розподіл еквівалентних напружень у манжетах поршня, пінополіуретані для різних положень поршня у відводі. Встановлено, що розподіл еквівалентних напружень у поршні, деформації поршня постійно змінюються під час його руху відводом.

У [17], щоб описати здатність поршнів проходити відводи трубопроводів, запропоновано наступні критерії:

- ефективність ущільнень поршня, яка визначається площею перетікань;
- характеристики руху, які визначаються тиском на поршень;
- можливість зштовхування, яка визначається мінімальною відстанню між передньою або задньою частиною поршня і внутрішньою стінкою трубопроводу.

Здатність поршнів проходити відводи трубопроводів послаблюється зі збільшенням коефіцієнта тертя. Встановлено, що у разі збільшення коефіцієнта тертя від 0,1 до 0,5 ефективність ущільнення поршня знижується на 27,7 %, характеристики руху збільшуються на 80 %, а ймовірність зштовхування збільшується на 94 %.

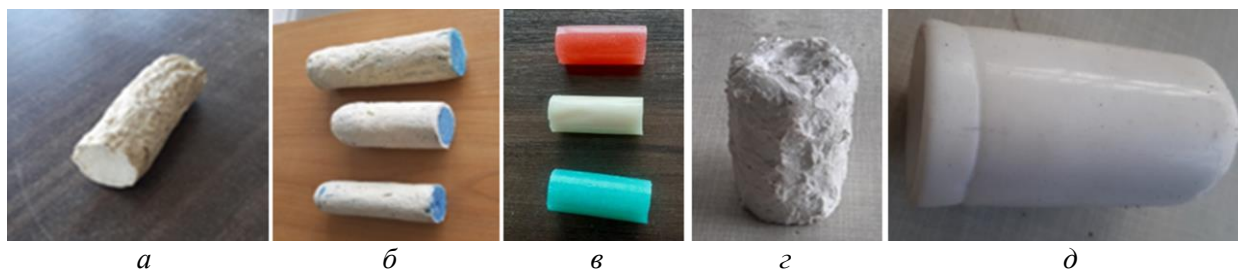
Натомість у [18] виділено наступні чинники, які впливають на здатність манжетних поршнів проходити відводи трубопроводів: довжина металевого корпусу, максимальна та мінімальна довжина ущільнення, діаметр манжет, радіус вигину ліктя, швидкість поршня, коефіцієнт тертя.

Висвітлення невирішених раніше частин загальної проблеми, якій присвячується дана стаття

Відводи, перехідники трубопроводів є більшим опором руху поршнів порівняно з прямими ділянками, що обумовлено їх геометричною формою. Коли поршень рухається у таких фасонних елементах трубопроводів, то відбувається вигинання, стискання поршня і збільшення контактних сил і, як наслідок, збільшення сил тертя. Такі зміни призводять до великої кількості невизначеностей, значно ускладнюють прогнозування без теоретичних, експериментальних досліджень.

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 елементів трубопроводів. На сьогодні практично відсутні вказівки щодо підбору поршнів із гіперпружних матеріалів для очищення трубопроводів, які містять різноманітні фасонні елементи. Неправильно підібраний матеріал може призвести до застрягання і закупорення трубопроводу або руйнування поршня. Тому, щоб цього уникнути, необхідні ґрунтовні лабораторні експериментальні дослідження, промислова апробація, тестування поршнів із різних матеріалів. Це дасть змогу переконатися, що поршень плавно проходитиме фасонні елементи трубопроводів, зокрема відводи, перехідники, а також зрозуміти динаміку руху поршнів цими елементами. Такі дослідження 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 динаміку руху поршнів із різних гіперпружних матеріалів фасонними елементами, тим меншою буде вартість і час внутрішньотрубного очищення трубопроводів. Важливо визначити необхідні розміри, матеріал і форму поршня, щоб він проходив усі фасонні елементи складних трубопровідних систем.



а) пінополіуретан більшої густини; б) пінополіуретан меншої густини;
в) пружно-полімерна композиція; г) силіконовий герметик; д) силіконовий компаунд

Рисунок 1 – Поршні із гіперпружних матеріалів

Формулювання мети та завдань статті

Мета роботи – оцінювання ризиків щодо застрягання, руйнування поршнів із різних гіперпружних матеріалів у відводах і перехідниках трубопроводів шляхом експериментальних досліджень динаміки їх руху такими елементами.

Для досягнення мети були поставлені такі завдання:

- виготовлення очисних поршнів із різних гіперпружних матеріалів та визначення їх фізико-механічних характеристик;
- розроблення лабораторних експериментальних установок для дослідження динаміки руху поршнів із гіперпружних матеріалів відводами, перехідниками трубопроводів;
- експериментальні дослідження динаміки руху поршнів із різних гіперпружних матеріалів відводами, перехідниками трубопроводів;
- аналіз результатів експериментальних досліджень та визначення сил, які діють на поршні із гіперпружних матеріалів під час їх руху відводами, перехідниками трубопроводів.

Виклад основного матеріалу

Підбір матеріалу для виготовлення поршнів, призначених для очищення внутрішньої порожнини трубопроводів, є надзвичайно важливим. Різні матеріали мають різну механічну міцність, різні модулі пружності, різну густину, еластичність, гнучкість тощо. Неправильно підібраний матеріал поршня може призвести до застрягання, пошкодження, руйнування поршня під час проходження фасонних елементів трубопроводів, зокрема, відводів, перехідників із більшого на менший діаметр труб. Тому для виготовлення поршнів підібрано декілька різних матеріалів, які мають різні характеристики. Це пінополіуретан різної густини, пінополіуретан, покритий уретаном, пружно-полімерна композиція, силіконовий герметик та силіконовий компаунд. Такі матеріали називають гіперпружними, оскільки, вони зазнають великих

деформацій під навантаженням і практично не змінюють при цьому об'єм [19].

Виготовлені з гіперпружних матеріалів поршні є надзвичайно цікавими щодо досліджень динаміки їх руху відводами, перехідниками. Оскільки в таких елементах трубопроводів на поршні діють великі навантаження, вони зазнають значних деформацій – згинання у відводах, стискання у перехідниках.

Пінополіуретан (поліуретанова піна) є синтетичним пористим високоеластичним спіненим полімером на основі поліуретану, який на 85-90 % складається з газової фази. Поршні виготовлено із піни монтажною більшої густини (150-160 кг/м³) (рис. 1, а) та піни монтажною еластичною меншої густини (20-30 кг/м³) (рис. 1, б)). Чим більша густина пінополіуретану, тим поршень міцніший. Поршні із пінополіуретану меншої густини надзвичайно гнучкі, еластичні. Піна меншої густини гнучка, еластична і здатна повернутися до початкової форми після стиснення навіть до 75 % або розтягування до 45 %. Щоб підвищити міцність і зносостійкість поршнів, на них наносили уретанову піну. Недоліком такого покриття є те, що воно суттєво погіршує пружні характеристики поршня. Поршень стає жорстким і його здатність проходити відводи, перехідники погіршується.

Також поршні було виготовлено з пружно-полімерної композиції (рис. 1, в), яка є гуаровою каміддю загущеною боратовим зшивачем. Густина композиції – 1040 кг/м³. Такі поршні містять 1,5 % полімеру і здатні саморуйнуватися. Вони розчиняються в трубопроводі після контакту із конденсатом або водою. Час, необхідний для розчинення, зазвичай більший, ніж тривалість операції з очищення трубопроводу.

Силікони – дуже часто використовувані речовини. Причиною цього є їхні механічні властивості. Після твердіння при кімнатній температурі силікон стає міцним непроникним матеріалом, який характеризується великою плинністю, гнучкістю, еластичністю та зносо-



а



б

а) на згин; б) на розтяг

Рисунок 2 – Визначення модуля пружності поршня із силіконового компаунда

стійкістю. Тому цей матеріал є надзвичайно цікавий щодо виготовлення поршнів. Поршні виготовлено із силіконового герметика густиною 1020 кг/м^3 (рис. 1, г) та силіконового компаунду густиною 1450 кг/м^3 (рис. 1, д).

Величиною, яка характеризує здатність матеріалу чинити опір згинанню, розтягуванню, стисканню, є модуль пружності (модуль Юнга). Щоб визначити модуль пружності на згин матеріалу кожного з досліджуваних поршнів, було виготовлено наведену на рисунку 2, а експериментальну установку. Дана установка дає змогу експериментально визначити залежність стрілки прогину поршня від навантаження, яке на нього діє, і призводить до його згину. Стрілку прогину поршня після кожного додавання тягарця вимірювали індикатором годинникового типу, що дало змогу визначити модуль пружності поршня на згин.

Модуль пружності матеріалу поршнів для випадку згину рівний

$$E = \frac{4L^3P}{3\pi d^4\lambda}, \quad (1)$$

де L – віддаль між місцями затискання поршня;

P – вага навантаження, яке зумовлювало згин поршня;

d – діаметр поршня;

λ – стрілка прогину поршня, яку вимірювали індикатором годинникового типу [20].

Результати визначення модуля пружності на згин поршнів із різних гіперпружних матеріалів наведено в таблиці 1.

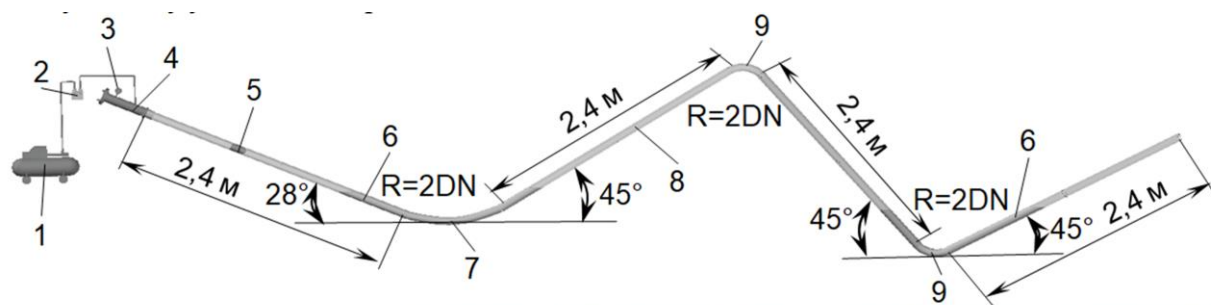
Таблиця 1 – Модуль пружності на згин поршнів із гіперпружних матеріалів

Матеріал поршня	Модуль пружності на згин, Па
Пінополіуретан більшої густини	$4 \cdot 10^6$
Пінополіуретан меншої густини	$0,6 \cdot 10^3$
Пружно-полімерна композиція	$5 \cdot 10^3$
Силіконовий герметик	$1 \cdot 10^3$
Силіконовий компаунд	$0,6 \cdot 10^6$

Модуль пружності для випадку розтягу – це відношення нормального напруження до відповідної лінійної деформації за лінійного напруженого стану. Щоб визначити модуль пружності на розтяг матеріалу кожного з досліджуваних поршнів, було виготовлено наведену на рисунку 2, б експериментальну установку. Дана установка дає змогу експериментально визначити залежність величини видовження поршня від навантаження, яке на нього діє, і призводить до його розтягування. Після кожного навантаження вимірювали віддаль між нанесеними на бічній поверхні поршня між місцями його кріплення відмітками. Вимірювана віддаль є величиною видовження поршня.

Модуль пружності матеріалу поршнів на розтяг осьовою силою рівний

$$E = \frac{P}{S} \frac{l}{\Delta l}, \quad (2)$$



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 3 – Експериментальна установка із двома пониженими ділянками трубопроводу

де P – вага навантаження, яке зумовлювало видовження поршня;

l – початкова довжина поршня;

S – площа поперечного перерізу поршня;

Δl – видовження поршня [21].

Результати визначення модуля пружності на розтяг поршнів із різних гіперпружних матеріалів наведено в таблиці 2.

Таблиця 2 – Модуль пружності на розтяг поршнів із гіперпружних матеріалів

Матеріал поршня	Модуль пружності на розтяг, Па
Пінополіуретан більшої густини	$1,2 \cdot 10^6$
Пінополіуретан меншої густини	$0,1 \cdot 10^3$
Пружно-полімерна композиція	$1,3 \cdot 10^3$
Силіконовий герметик	$0,2 \cdot 10^3$
Силіконовий компаунд	$0,3 \cdot 10^6$

Гіперпружні матеріали, з яких було виготовлено очисні поршні, мають різні фізико-механічні характеристики (різну густину, різні модулі пружності тощо). Ці характеристики чинять вплив на динаміку руху поршнів відводами, перехідниками трубопроводів. Тому треба експериментально визначити, чи здатні поршні із гіперпружних матеріалів проходити

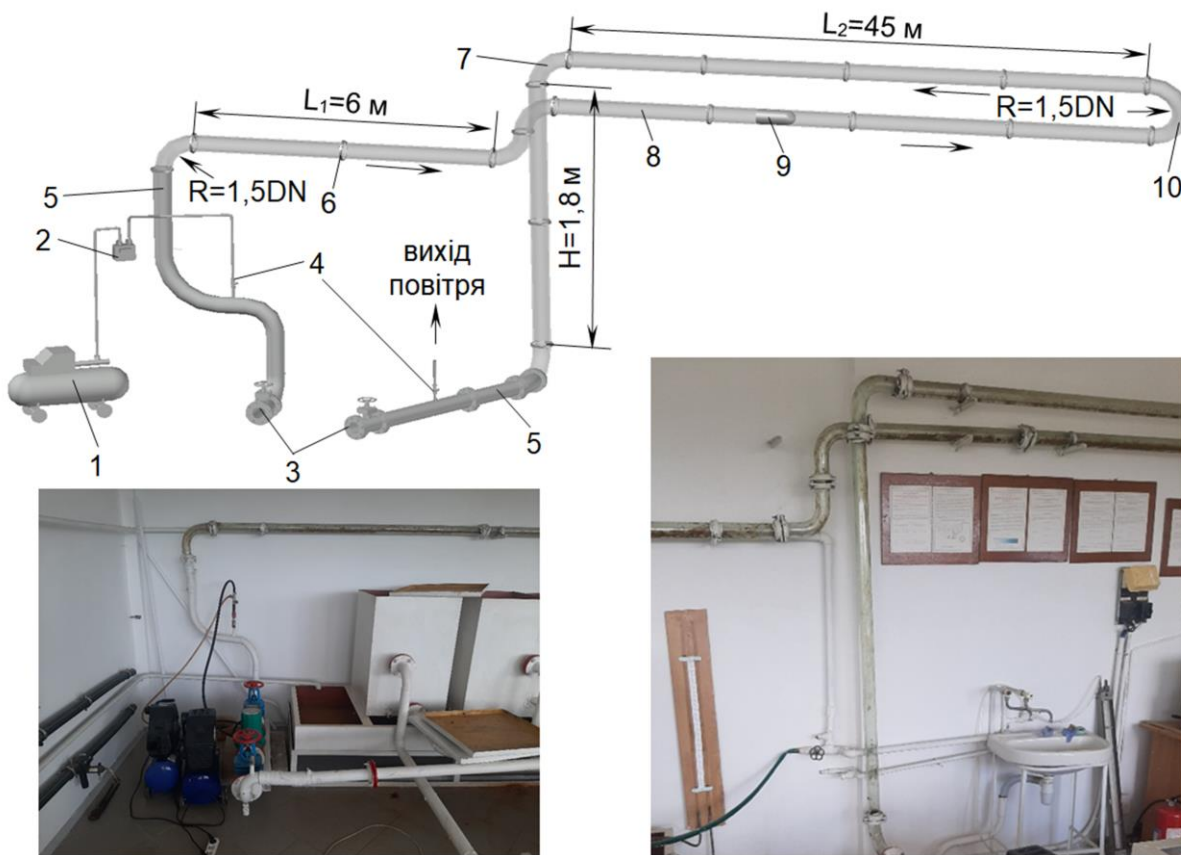
різні фасонні елементи трубопроводів, дослідити динаміку їх руху такими елементами.

Щоб визначити, чи поршні із гіперпружних матеріалів можуть проходити відводи різних радіусів та кутів вигину, та дослідити динаміку руху поршнів відводами, розроблено і змонтовано три експериментальні установки. Експериментальна установка із двома пониженими ділянками трубопроводу (рис. 3) складається із чотирьох скляних труб 8 довжиною 2,4 м і внутрішнім діаметром 38 мм, містить один відвід 7 кутом вигину 120° та два відводи 9 кутом вигину 90°. Радіус вигину усіх відводів рівний 2DN.

Експериментальна установка для дослідження руху поршнів горизонтальними ділянками трубопроводу і відводами (рис. 4) складається з скляних труб 8 загальною довжиною 100 м і внутрішній діаметром 54 мм, містить чотири відводи 7 кутом вигину 90° та один відвід 10 кутом вигину 180°. Радіус вигину усіх відводів рівний 1,5DN.

Перевагою таких установок є те, що вони складаються зі скляних труб і відводів, що забезпечує можливість візуального спостереження за динамікою руху поршня та ефективністю виконуваних операцій з очищення внутрішньої порожнини трубопроводу.

Також було розроблено і змонтовано експериментальну установку із пониженою ділянкою з сталевих труб 5 внутрішнім діаметром 47 мм (рис. 5), яка містила два відводи 6 із



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

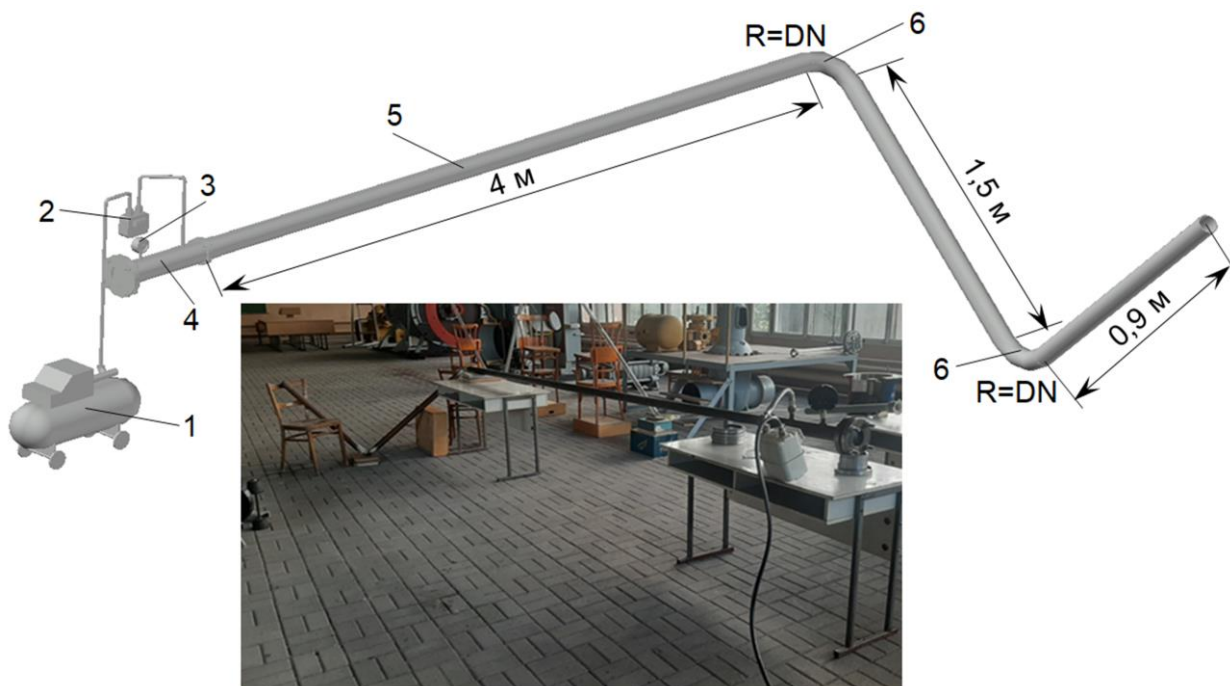
Рисунок 4 – Експериментальна установка для дослідження руху поршнів горизонтальними ділянками трубопроводу і відводами

кутом вигину 90° і радіусом вигину, рівним DN. Відводи радіусом вигину менше DN для трубопроводів не застосовують. Загальна довжина трубопроводу складає 6,5 м. Застосування сталевих труб і відводів унеможливило спостереження за динамікою руху поршнів відводами, але дало змогу виконувати дослідження при більших тисках, ніж це було можливо, коли труби були скляні.

Руйнувань, пошкоджень поршнів із усіх гіперпружних матеріалів, із яких вони були виготовлені, під час проходження відводів протягом експериментальних досліджень не було виявлено. Найкраще відводи трубопроводів проходять поршні із гіперпружних матеріалів, які мають найбільшу густину. Під час усіх експериментальних досліджень застрягання, тимчасової зупинки поршнів із пружно-полімерної композиції, силіконового герметика (рис. 6) та силіконового компаунда (рис. 7) у відводах не відбувалось. Поршні із пінополіуретану більшої густини за певних умов тимчасово зупинялись і відновлювали рух, застрягали (рис. 8) у відводах усіх експериментальних установок.

Здатність таких поршнів проходити відводи залежала від швидкості їх руху, величини перетікання повітря через поршень, довжини поршня. Зі зменшенням швидкості руху поршня, збільшенням величини перетікання повітря через поршень і довжини поршня здатність поршнів із пінополіуретану високої щільності проходити відводи зменшувалась.

Що ж до динаміки руху поршнів із гіперпружних матеріалів відводами трубопроводів, то у таких елементах відбувається багато фізичних явищ, які можна описати відповідними теоріями. Щоб зробити достовірний опис, було виконано багато експериментальних досліджень. До відводу поршень рухався з постійною швидкістю, тож сила тиску та сила тертя ковзання були врівноважені. У відводі динаміку руху поршнів із гіперпружних матеріалів визначає сила тертя між бічною поверхнею циліндричних поршнів і внутрішньою стінкою відводу та сила інерції. Рух поршня у відводі сповільнювався, припинявся більшою силою тертя, яка зумовлена деформуванням (вигинанням) поршня на величину ϵ (рис. 9, а). У



1 – компресор; 2 – лічильник; 3 – манометр; 4 – вузол запускання поршнів; 5 – сталеві труба 57×5; 6 – відвід 90°

Рисунок 5 – Експериментальна установка із пониженою ділянкою зі сталевих труб



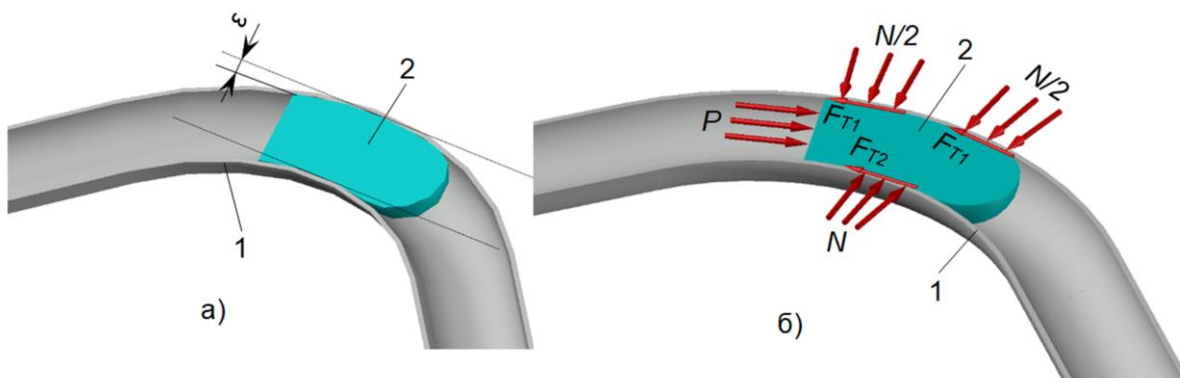
Рисунок 6 – Рух поршня із силіконового герметика відводами



Рисунок 7 – Вилітання поршня із силіконового компаунда з трубопроводу



Рисунок 8 – Застрягання поршня із пінополіуретану більшої густини у відводі



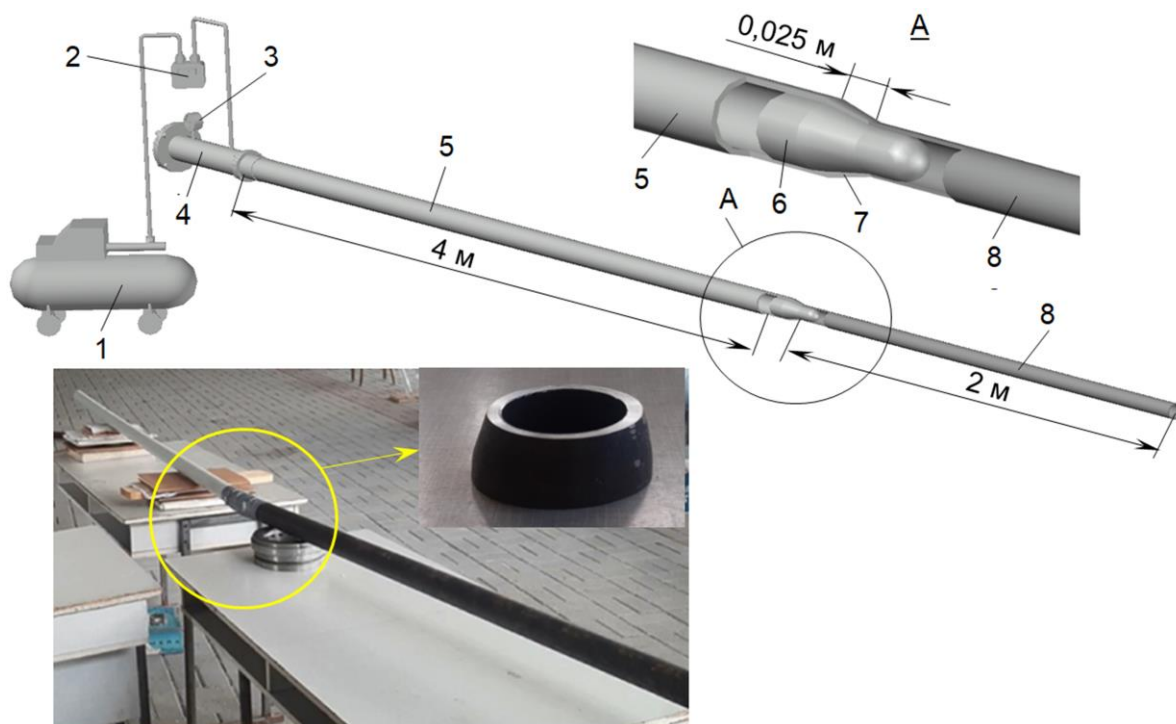
а) схема деформування поршня; б) схема дії сил; 1 – відвід; 2 – поршень

Рисунок 9 – Рух циліндричного поршня із гіперпружного матеріалу відводом

результаті вигинання поршнів із гіперпружних матеріалів у відводі виникають значні контактні сили N (рис. 9, б), які залежать від довжини поршня, модуля пружності матеріалу поршня. Контактні сили призводять до збільшення сили тертя між поршнем та внутрішньою стінкою відводу. Якщо сума сил, зумовлених тиском повітря в запоршневому просторі і силою інерції, яка діє на рухомий поршень, більші, ніж сила тертя між бічною поверхнею поршня і внутрішньою стінкою відводу, то поршень проходить відвід. Тому поршні із гіперпружних матеріалів, які мають найбільшу густину, без зупинок проходили відводи, оскільки сила інерції, яка діє на рухомий поршень, залежить від маси поршня. Якщо сума сил, зумовлених тиском повітря в запоршневому просторі і силою інерції, яка діє на рухомий поршень, менші за силу тертя між бічною поверхнею поршня і внутрішньою стінкою відводу, то поршень зупиняється у відводі. Тому поршень із пінополіуретану більшої густини, який має малу густину (порівняно із поршнями з силікону), при недостатній швидкості його руху зазнавав недостатньої дії сили інерції, щоб пройти відвід без

зупинки. Поршні із пінополіуретану меншої густини, які мають ще меншу густину, не зупинялись у відводах, тому що їх модуль пружності є надзвичайно малий і вони мають велику гнучкість, еластичність. Гнучкість і еластичність поршнів із пінополіуретану меншої густини призводила до того, що у результаті їх вигинання у відводі контактні сили, а отже сили тертя, були не такі значні, тож поршень проходив відводи.

У разі зупинки поршня у відводі в результаті його вигинання і з різною силою притискання до внутрішньої стінки відводу у різних місцях може збільшитись величина перетікання повітря через поршень (рис. 8). Таке перетікання впливає на процеси, які далі відбуваються. Якщо перетікання значне, то необхідного тиску для подолання збільшеної за рахунок вигинання поршня сили тертя спокою в запоршневому просторі не набиралось, і поршень застрягав. Якщо ж, не зважаючи на перетікання, тиск за поршнем досягав таких значень, що зумовлена ним сила, яка діяла на поршень, була більшою сили тертя спокою між бічною поверхнею вигнутого поршня у відводі та внутрішньою стін-



1 – компресор; 2 – лічильник; 3 – манометр; 4 – вузол запускання поршнів;
5 – стальна труба 57×5 ($D_{вн}=47$ мм); 6 – поршень із гіперпружного матеріалу;
7 – концентричний перехідник; 8 – пластикова труба 50×9 ($D_{вн}=32$ мм)

Рисунок 10 – Схема експериментальної установки з перехідником трубопроводу з більшого на менший діаметр труб

кою відводу, відбувалось зрушення поршня і його прискорення за відводом, відтак незначне сповільнення і стабілізування швидкості.

Щоб визначити, чи поршні із гіперпружних матеріалів можуть проходити перехідники з більшого на менший діаметр труб, було змонтовано експериментальну установку (рис. 10), яка складається з вузла запускання поршнів у трубопровід, металевої труби внутрішнім діаметром 47 мм і довжиною 4 м, металевого концентричного перехідника 47/39 довжиною 25 мм, пластикової труби внутрішнім діаметром 39 мм і довжиною 2 м.

Проблемою досліджень руху поршнів із гіперпружних матеріалів у лабораторних умовах є забезпечення міцного з'єднання труби та перехідника. Спочатку з'єднання було виконано липкою стрічкою (скотчем). У такому разі після запускання поршень зупинявся в перехіднику, після чого відбувалось збільшення тиску в запоршневому просторі і руйнування з'єднання (рис. 11, а). Коли з'єднання було підсилено і виконано армованою липкою стрічкою із фіксуванням хомутами, відбулось те ж саме (рис. 11, б). Можна помітити: якщо з'єднання сталевої труби, перехідника та пластикової труби було міцнішим, виконано армованою ли-

пкою стрічкою, то поршень на більшу віддаль заходив у пластикову трубу.

Щоб забезпечити ще більшу міцність з'єднання сталевої труби, перехідника та пластикової труби, було виконано намотуванням бинта і його армуванням епоксидним клеєм та намотуванням зовні армованої липкої стрічки. У такому разі після запускання поршні із пінополіуретану, пружно-полімерної композиції тимчасово зупинялись в перехіднику, тоді відбувалось збільшення тиску в запоршневому просторі і вилітання із великою швидкістю поршня із пластикової труби експериментальної установки. Поршні були зруйновані.

Поршні із силіконового герметика, силіконового компаунда також тимчасово зупинявся в перехіднику, після чого збільшувався тиск в запоршневому просторі і відбулось руйнування резинового запобіжника камери запускання. Було зруйновано два резинових ущільнення, кожне з яких мало товщину 8 мм.

Оскільки для проходження поршнів із силіконового герметика, силіконового компаунда перехідниками потрібно надзвичайно великий тиск (розрахункових моделей для визначення його величини не існує), а швидкість вилітання поршня із експериментальної установки є великою, що зумовлює ризик небезпечного рикоше-

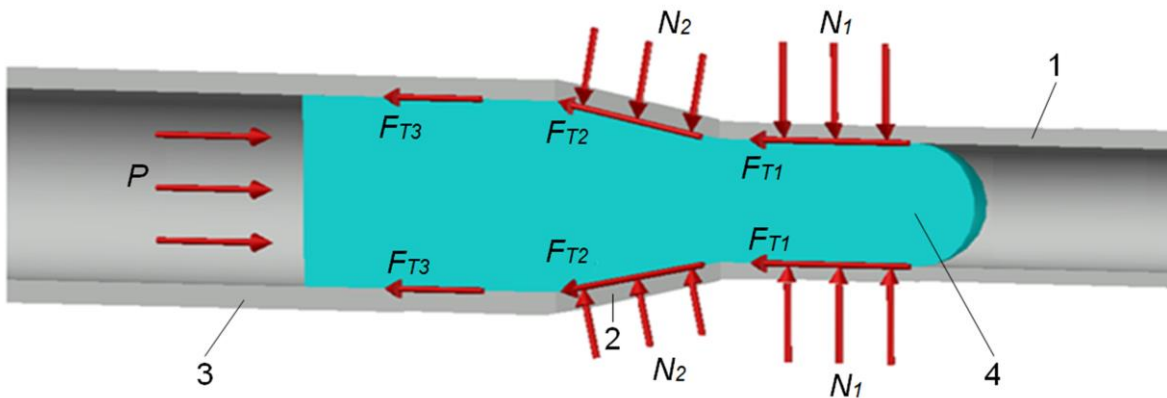


а



б

а) з'єднання виконано липкою стрічкою; б) з'єднання виконано армованою липкою стрічкою
Рисунок 11 – Зруйноване з'єднання сталевій труби, переходника та пластиковій труби



1 – труба меншого діаметра; 2 – переходник; 3 – труба більшого діаметра; 4 – поршень
Рисунок 12 – Схема дії сил на поршень із гіперпружного матеріалу у переходнику з більшого на менший діаметр труб

ту поршня, то такі дослідження не є лабораторними, а їх треба виконувати на дослідницьких полігонах.

Аналогічні результати було одержано під час промислового апробування поршнів із пружно-полімерної композиції. Шлейф свердловини у місці виходу з ґрунту містив переходник із більшого діаметра труби на менший. Перехідник був розміщений недалеко від місця виходу поршня зі шлейфу. Перед підходом поршнів із пружно-полімерної композиції до переходника було відчутно шум, зумовлений рухом поршня. Далі шум припинявся, причиною чого була зупинка поршня у переходнику. Тоді відбувалось збільшення тиску у запоршневому просторі, і при певному його значенні було чути різкий звук, який також був чутний під час лабораторних досліджень у момент розривання поршнів із гіперпружного матеріалу у переходнику. Після цього шматки поршня із великою швидкістю

вилітали із шлейфа. Промислова апробація була виконана для двох поршнів із пружно-полімерної композиції. Причому перший рухався із суттєво більшою швидкістю, ніж другий. У результаті у переходнику поршні руйнувалися на декілька циліндричних частин.

Що ж до динаміки руху поршнів із гіперпружних матеріалів переходниками трубопроводів, то у переходниках відбувається суттєве стискання поршнів, яке визначає усі процеси (рис. 12). До переходника поршень рухався з постійною швидкістю, і сила тиску та сила тертя ковзання були врівноважені. У переходнику динаміку руху поршнів із гіперпружних матеріалів визначає сила тертя між бічною поверхнею циліндричних поршнів і внутрішньою стінкою переходника та сила інерції. У результаті поступового зменшення внутрішнього діаметра трубопроводу у переходнику 2 і суттєво меншого внутрішнього діаметра труби 1 від діаметра

поршня відбувається значне збільшення контактних сил N і, як наслідок, сил тертя між поршнем і внутрішньою стінкою перехідника 2 (F_{T2}), внутрішньою стінкою труби 1 (F_{T1}) (рис. 12). Таке збільшення контактних сил призводить до суттєвого збільшення сил тертя.

Збільшення сил тертя настільки суттєве, що, не залежно від величини сили інерції, яка діє на поршень, усі поршні із гіперпружних матеріалів зупинялись у перехіднику. Сила інерції визначала тільки те, наскільки далеко поршень пройде перехідником і прилеглою до нього трубою меншого діаметра. Після зупинки поршня у перехіднику відбувалось збільшення тиску у запоршневому просторі. Щоб подолати надзвичайно велике тертя спокою, зумовлене суттєвим збільшенням контактних сил через стискання поршня, потрібен надзвичайно великий тиск, який не усі гіперпружні матеріали можуть витримати. Поршні із пінополіуретану, пружно-полімерної композиції мають невелику міцність. Тому під час експериментальних досліджень і промислової апробації вони руйнувались у перехідниках. Причому, ймовірно, руйнування відбувалось таким чином, що відривалась та частина поршня, яка протиснулася в трубу меншого діаметра, оскільки шматки поршня були циліндричної форми. Ймовірно, через частину поршня у трубі більшого діаметра, частково в перехіднику відбувалось перетікання газу, а через частину поршня у трубі меншого діаметра газ не перетікав через надзвичайно великі контактні сили. Саме ця частина під великим тиском відривалась. Далі незруйнована частина поршня знову тиском вже на меншу величину затискала у трубу меншого діаметра і знову відривалась.

Якщо ж матеріал поршня міцний (силіконовий герметик, силіконовий компаунд) і поршень не буде руйнуватись у перехіднику після суттєвого наростання тиску у запоршневому просторі через необхідність подолати значну силу тертя спокою, зумовлену великими контактними силами, то він може ще більше заклинитись і застрягнути, закупоривши трубопровід, або зрушиться.

Сильне заклинювання поршня може призвести до того, що його неможливо буде зрушити тиском і в зворотному напрямку, тоді необхідно буде вирізати перехідник з поршнем і виконати ремонт трубопроводу.

Подолання великих сил тертя спокою і зрушення поршня призведе до раптового суттєвого прискорення поршня. Суттєвому збільшенню швидкості руху поршня буде сприяти зміна сил тертя спокою на сили тертя ковзання,

а також те, що діаметр трубопроводу зменшується і, як наслідок, збільшиться швидкість потоку. Суттєве прискорення поршня може призвести до його пошкодження, наприклад, у відводах, трійниках розміщених за перехідником, у місцях різних виступів у внутрішню порожнину. Також якщо трубопровід прокладений надземно, і за перехідником розміщений відвід або трійник, то таке суттєве збільшення швидкості руху поршня може призвести до виникнення значних інерційних сил у фасонних елементах і зміщення трубопроводу з опор.

Висновки

Під час руху поршнів із усіх досліджуваних гіперпружних матеріалів (пінополіуретан, пружно-полімерна композиція, силіконовий герметик, силіконовий компаунд) відводами їх руйнувань, пошкоджень не відбувалось. Здатність поршнів проходити відводи залежить від швидкості їх руху, модуля пружності на згин, величини перетікання повітря через поршень, довжини поршня. Рух поршня у відводі сповільнювався, припинявся більшими контактними силами, які зумовлені деформуванням (вигинанням) поршня, і, як наслідок, більшими силами тертя. Якщо сума сил, зумовлених тиском повітря в запоршневому просторі і силою інерції, яка діє на рухомий поршень, були більші, ніж сила тертя між бічною поверхнею поршня і внутрішньою стінкою відводу, то поршень проходив відвід. Тому найкраще відводи трубопроводів проходили поршні із гіперпружних матеріалів, які мають найбільшу густину (застрягання, тимчасової зупинки поршнів із пружно-полімерної композиції, силіконового герметика та силіконового компаунда у відводах не відбувалось). Поршні із пінополіуретану, який має великий модуль пружності на згин і малу густину, при недостатній швидкості їх руху зазнавали недостатньої дії сили інерції, щоб пройти відвід, і зупинялись.

У перехідниках усі поршні зупинялися через суттєве збільшення контактних сил у результаті стискання поршнів і, як наслідок, збільшення сил тертя. Після зупинки поршнів збільшувався тиск у запоршневому просторі і відбулось руйнування поршнів із пінополіуретану, пружно-полімерної композиції. Під час випробування поршнів із силіконового герметика, силіконового компаунда (значно міцніших, ніж із пінополіуретану, пружно-полімерної композиції) відбувалось руйнування резинового запобіжника камери запускання після зупинки поршнів у перехіднику і збільшення тиску в запоршневому просторі. Оскільки, для встанов-

лення, чи можуть поршні із силікону проходити перехідники, потрібно забезпечити надзвичайно великий тиск у запоршневому просторі (розрахункових моделей для визначення його величини не існує), а швидкість вилітання поршня із експериментальної установки є надзвичайно великою, що зумовлює ризик небезпечного рикошету поршня, то такі дослідження не є лабораторними, а їх треба виконувати в умовах дослідних полігонів.

Література

1. 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>
2. Developing a complex of measures for liquid removal from gas condensate wells and flowlines using surfactants / V. B. Volovetskyi, Ya. V. Doroshenko, G. M. Kogut, I. V. Rybitskyi, J. I. Doroshenko, O. M. Shchyrba. *Archives of Materials Science and Engineering*. 2021. Vol. 108, Iss. 1. P. 24-41. <http://doi.org/10.5604/01.3001.0015.0250>
3. Experimental effectiveness studies of the technology for cleaning the inner cavity of gas gathering pipelines / V. B. Volovetskyi, Ya. V. Doroshenko, O. S. Tarayevs'kyu, O. M. Shchyrba, J. I. Doroshenko, Yu. S. Stakhmych. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*. 2021. Vol. 105, Iss. 2. P. 61-77. <http://doi.org/10.5604/01.3001.0015.0518>
4. 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. [http://doi.org/10.31471/1993-9973-2019-4\(73\)-35-45](http://doi.org/10.31471/1993-9973-2019-4(73)-35-45)
5. Грудз В.Я., Дорошенко Я.В., Васадзе А.В. Аналіз властивостей накопичень в порожнині газопроводів. *Питання розвитку газової промисловості України*. 2004. Вип. 31. С. 90-94.
6. Якимів Й. В. Вплив відкладень парафіну на пропускну здатність магістральних нафтопроводів. *Науковий вісник ІФНТУНГ*. 2012. № 2 (32). С. 59-64.
7. 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. 147-156.
8. Developing a set of measures to provide maximum hydraulic efficiency of gas gathering pipelines / V. Volovetskyi, A. Uhrynovskyi, Ya. Doroshenko, O. Shchyrba, Yu. Stakhmych. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*. 2020. Vol. 101. Iss. 1. P. 27-41. <http://doi.org/10.5604/01.3001.0014.4088>
9. Developing measures to eliminate of hydrate formation in underground gas storages / V.B. Volovetskyi, Ya.V. Doroshenko, A.O. Bugai, G.M. Kogut, P.M. Raiter, Y.M. Femiak, R.V. Bondarenko. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*. 2022. Vol. 111, Iss. 2. P. 64-77. <http://doi.org/10.5604/01.3001.0015.9996>
10. Mamasani A., Azari A., Izadpanah A., Jamali M. Prediction of hydrate formation in llam gas refinery pipeline using computational fluid dynamic. *Journal of Oil, Gas and Petrochemical Technology*. 2019. Vol. 6. No 1. P. 63-81. <http://doi.org/10.22034/jogpt.2020.179133.1053>
11. O'Donoghue A. Why pigs get stuck and how avoid it. Glasgow. UK: Pipeline Research Limited, 2003. 16 p.
12. Moghaddama M., Jerbanb S. On the in-pipe inspection robots traversing through elbows. *International Journal of Robotics*. 2015. Vol. 4. No. 2. P. 19-27.
13. Nguyen T., Kim D., Rho Y., Kim S. Dynamic Modeling and Its Analysis for PIG Flow through Curved Section in Natural Gas Pipeline. *IEEE International Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation*, Banff, Alberta, Canada, 29 July - 01 August 2001. P. 492-497. <http://doi.org/10.1109/CIRA.2001.1013250>
14. Liu C., Yuguang C., Jinzhong C., Chaolei D., Renyang H., Zhenggan Z. The blockage risk in the elbow of the bi-directional pig used for submarine pipeline based on the modified burgers-frenkel (Mb-F) model. *Ocean Engineering*. 2022. Vol. 268. P. 1-29. DOI:10.1016/j.oceaneng.2022.113508
15. Stress distribution of the power section cup of pipeline inspection gauges by finite element method / Y. Cao, Y. Zhen, Y. Shi, S. Zhang, Y. Sun, W. Nie. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*. 2018. Vol. 9, Iss. 2. P. 1-10. [http://doi.org/10.1061/\(ASCE\)PS.1949-1204.0000308](http://doi.org/10.1061/(ASCE)PS.1949-1204.0000308)
16. Nshuti R. Dynamic analysis and numerical simulation of pig motion in pipeline. Ph.D. dissertation, Chonnam National University. Gwangju. South Korea, 2016.

17. Traveling ability of pipeline inspection gauge (PIG) in elbow under different friction coefficients by 3D FEM / C. Liu, Y. Wei, Y. Cao, S. Zhang, Y. Sun. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. 2020. Vol. 75. P. 103-134. <http://doi.org/10.1016/j.jngse.2019.103134>

18. Guo F., Xu F., Deng Z., Peng M. Research on driving force of pipeline robot in elbow of pipeline. *Journal of Harbin Institute of Technology*. 2006. Vol. 8. P. 1264-1266.

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

20. Determining elastic modulus of the material by measuring the deflection of the beam loaded in bending / J. Miljojković, I. Bijelić, N. Vranić, N. Radovanović, M. Živković. *Tehnički vjesnik*. 2017. Vol. 24. Iss. 1. P. 1227-1234. <http://doi.org/10.17559/TV-20170609133537>

21. Williams H. Measuring Young's modulus with a tensile tester. *Physics Education*. 2022. Vol. 57. 5 p. <http://doi.org/10.1088/1361-6552/ac3f75>

References

1. 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>

2. Developing a complex of measures for liquid removal from gas condensate wells and flowlines using surfactants / V. B. Volovetskyi, Ya. V. Doroshenko, G. M. Kogut, I. V. Rybitskyi, J. I. Doroshenko, O. M. Shchyrba. *Archives of Materials Science and Engineering*. 2021. Vol. 108, Iss. 1. P. 24-41. <http://doi.org/10.5604/01.3001.0015.0250>

3. Experimental effectiveness studies of the technology for cleaning the inner cavity of gas gathering pipelines / V. B. Volovetskyi, Ya. V. Doroshenko, O. S. Tarayevskyy, O. M. Shchyrba, J. I. Doroshenko, Yu. S. Stakhmych. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*. 2021. Vol. 105, Iss. 2. P. 61-77. <http://doi.org/10.5604/01.3001.0015.0518>

4. Doroshenko Ya. V., Karpash O. M., Gozhayev B. N. Doslidzhennya skladu truboprovodnih gazoridinnih potokiv ta vplivu nayavnih u nih shkidlivih domishok na rezhimi perekachuvannya, energovitrati na transportuvannya. *Rozvidka ta rozrobka naftovih i gazovih rodovish*.

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]

5. Grudz V. Ya., Doroshenko Ya. V., Vasadze A. V. Analiz vlastivostej nakopichen v porozhnini gazoprovodiv. *Pitannya rozvitku gazovoyi promislivosti Ukrayini*. 2004. Vip. 31. P. 90-94. [in Ukrainian]

6. Yakimiv J. V. Vpliv vidkladen parafinu na propusknu zdavnist magistralnih naftoprovodiv. *Naukovij visnik IFNTUNG*. 2012. No 2 (32). P. 59-64. [in Ukrainian]

7. Voloveckij V. B., Shirba O. M., Vityaz O. Yu., Doroshenko Ya. V. Analiz prichin znizhennya gidravlichnoyi efektnosti mizhpromislovih gazoprovodiv ta vibir sposobiv yiyi pidvishennya. *Rozvidka ta rozrobka naftovih i gazovih rodovish*. 2013. No 3(48). P. 147-156 [in Ukrainian]

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

9. Developing measures to eliminate of hydrate formation in underground gas storages / V.B. Volovetskyi, Ya.V. Doroshenko, A.O. Bugai, G.M. Kogut, P.M. Raiter, Y.M. Femiak, R.V. Bondarenko. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*. 2022. Vol. 111, Iss. 2. P. 64-77. <http://doi.org/10.5604/01.3001.0015.9996>

10. Mamasani A., Azari A., Izadpanah A., Jamali M. Prediction of hydrate formation in llam gas refinery pipeline using computational fluid dynamic. *Journal of Oil, Gas and Petrochemical Technology*. 2019. Vol. 6. No 1. P. 63-81. <http://doi.org/10.22034/jogpt.2020.179133.1053>

11. O'Donoghue A. Why pigs get stuck and how avoid it. Glasgow. UK: Pipeline Research Limited, 2003. 16 p.

12. Moghaddama M., Jerbanb S. On the in-pipe inspection robots traversing through elbows. *International Journal of Robotics*. 2015. Vol. 4. No. 2. P. 19-27.

13. Nguyen T., Kim D., Rho Y., Kim S. Dynamic Modeling and Its Analysis for PIG Flow through Curved Section in Natural Gas Pipeline. *IEEE International Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation*, Banff, Alberta, Canada, 29 July - 01 August 2001. P. 492-497. <http://doi.org/10.1109/CIRA.2001.1013250>

14. Liu C., Yuguang C., Jinzhong C., Chaolei D., Renyang H., Zhenggan Z. The blockage risk in the elbow of the bi-directional pig used for submarine pipeline based on the modified burgers-

frenkel (Mb-F) model. *Ocean Engineering*. 2022. Vol. 268. P. 1-29. DOI:10.1016/j.oceaneng.2022.113508

15. Stress distribution of the power section cup of pipeline inspection gauges by finite element method / Y. Cao, Y. Zhen, Y. Shi, S. Zhang, Y. Sun, W. Nie. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*. 2018. Vol. 9, Iss. 2. P. 1-10. [http://doi.org/10.1061/\(ASCE\)PS.1949-1204.0000308](http://doi.org/10.1061/(ASCE)PS.1949-1204.0000308)

16. Nshuti R. Dynamic analysis and numerical simulation of pig motion in pipeline. Ph.D. dissertation, Chonnam National University. Gwangju. South Korea, 2016.

17. Traveling ability of pipeline inspection gauge (PIG) in elbow under different friction coefficients by 3D FEM / C. Liu, Y. Wei, Y. Cao, S. Zhang, Y. Sun. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. 2020. Vol. 75. P. 103-134. <http://doi.org/10.1016/j.jngse.2019.103134>

18. Guo F., Xu F., Deng Z., Peng M. Research on driving force of pipeline robot in elbow of pipeline. *Journal of Harbin Institute of Technology*. 2006. Vol. 8. P. 1264-1266.

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

20. Determining elastic modulus of the material by measuring the deflection of the beam loaded in bending / J. Miljojković, I. Bijelić, N. Vranić, N. Radovanović, M. Živković. *Tehnički vjesnik*. 2017. Vol. 24. Iss. 1. P. 1227-1234. <http://doi.org/10.17559/TV-20170609133537>

21. Williams H. Measuring Young's modulus with a tensile tester. *Physics Education*. 2022. Vol. 57. 5 p. <http://doi.org/10.1088/1361-6552/ac3f75>