

УДК 622.692.4

DOI: 10.15587/1729-4061.2019.164351

Розроблення технології безтраншейної реконструкції трубопровідних комунікацій “Тяговий поршень”

Я. В. Дорошенко, В. Б. Запухляк, К. А. Поляруш, Р. Б. Стасюк, С. М. Багрій

Розроблено технологію безтраншейної реконструкції трубопровідних комунікацій протягуванням поршнем нового поліетиленового трубопроводу в зношений сталевий – “Тяговий поршень”. Поршень рухається під тиском повітря, яке подається в запоршневий простір компресором.

Виконано математичне та CFD моделювання процесу протягування трубопроводу поршнем. Виведено формули для розрахунку сил опору, які діють на рухому систему, та тиску на виході компресора, при якому поршень протягне новий поліетиленовий трубопровід усією довжиною реконструйованого зношеного сталевого трубопроводу. Силами опору, які діють на рухому систему на горизонтальних ділянках траси, є: сила механічного тертя манжет поршня до стінок сталевого трубопроводу; сила тертя поліетиленової труби до сталевий; сила тертя поліетиленової труби в кільцевих манжетах ущільнювальної системи.

Результати CFD моделювання були візуалізовані в постпроцесорі програмного комплексу Ansys Fluent побудовою ліній течії, векторів швидкості, полів тиску на контурах і в повздовжньому перерізі міжтрубного та запоршневого простору. Визначались точні значення швидкості, тиску в різних точках міжтрубного та запоршневого простору. Досліджено структуру потоку повітря у запоршневому та міжтрубному просторі. Виявлено місця сповільнення та пришвидшення потоку повітря, падіння та зростання тиску. Визначено втрати тиску в міжтрубному просторі.

Виконавши експериментальні випробування, встановлено, що розроблена технологія “Тяговий поршень” може застосовуватись для реконструкції трубопровідних комунікацій. За результатами експериментальних вимірювань побудовано графіки зміни тиску повітря на початку трубопроводу в часі під час протягування поршнем поліетиленової труби зношеною сталевий. Тиск на початку трубопроводу до початку протягування збільшується, що обумовлено силою тертя спокою. Після початку протягування тиск зменшується на незначну величину, а під час протягування відбувається незначне його збільшення. Побудовано графіки залежності швидкості протягування від об’ємної витрати повітря та від довжини протягнутої ділянки поліетиленової труби. На початковому етапі швидкість протягування різко зростає і після такого зростання стабілізується

Ключові слова: втрати тиску, об’ємна витрата, сила тертя, тягове зусилля, швидкість протягування

1. Вступ

Великі обсяги будівництва сталевих трубопровідних комунікацій (мереж газо-, тепло-, водопостачання) в середині та кінці минулого століття зумовили значні труднощі в підтримуванні їх у належному стані сьогодні, коли велика їх частина зношена на 60–90 %. Є багато ділянок трубопроводів, які відпрацювали свій ресурс в два, три рази і їх обсяг постійно зростає. Втрати води з мереж тепло-, водопостачання можуть бути причиною піднімання рівня ґрунтових вод, що призводить до зсуву ґрунтів, руйнування будівель та споруд. Доволі часто відбувається розмивання ґрунту під автодорогами, що призводить до провалювання автомашин у вимиті порожнини. Нерідко наслідком аварій мереж водо-, теплопостачання є фонтани води в містах. Особливо небезпечними є витоки природного газу з газових мереж міст, які можуть призводити до вибухів. Фактично старі комунікації міст є постійною загрозою життю і здоров'ю мешканцям міст. Другим негативним моментом є щорічні великі втрати води з систем теплопостачання, водопостачання, які з року в рік збільшуються через аварійний стан підземних інженерних комунікацій.

Локальний ремонт зношених трубопровідних комунікацій є марною тратою часу і коштів. Проблема масштабної реконструкції трубопровідних комунікацій в багатьох великих містах, де трубопровідні комунікації широко розгалужені, вже давно перезріла. Організації, які їх експлуатують, практично щоденно зустрічаються з потребою ремонту, заміни тієї чи іншої ділянки трубопроводу.

Традиційна траншейна реконструкція трубопровідних комунікацій у великих містах є малодоцільною. Причинами цього є велика тривалість виконання робіт, великі обсяги земляних робіт, перекирвання руху транспорту, проходів пішоходів, руйнування дорожнього покриття та зеленої зони, порушенням інфраструктури, благоустрою міст. Все це вимагає збільшення витрат на відновлювальні роботи, ускладнює дорожній рух, спричинює соціальний дискомфорт.

Надзвичайно складною і в багатьох випадках є неможливою така реконструкція в важкодоступних місцях, під дорогами, вимощеними тротуарами, площами в центрі великих міст, де є великі скупчення машин, людей, історична інфраструктура.

Уникнути ці складнощі та додаткові витрати пов'язані з відновлювальними роботами, пришвидшити роботи можна безтраншейними технологіями. Такі технології є найефективнішими та найрентабельнішими і полягають в протягуванні нової труби чи рукава виготовлених із полімерних матеріалів у дефектний металевий трубопровід, коли земляні роботи зведено до мінімуму або взагалі відсутні.

Бум безтраншейних технологій реконструкції трубопровідних комунікацій є неминучим і масштабне застосування цих технологій є необхідністю сьогодні.

Усі ці, а також цілий ряд інших причин обумовлюють особливу актуальність застосування, удосконалення, розроблення нових безтраншейних технологій реконструкції трубопровідних комунікацій.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

На сьогодні розроблено цілий ряд методів безтраншейної реконструкції трубопроводних комунікацій [1, 2]. Однак немає одного універсального, яким можна було б реконструювати усі трубопроводні комунікації. Кожний метод має свою сферу застосування, переваги та недоліки.

Одним з найбільших недоліків методу протягування поліетиленової труби меншого діаметра в зношений сталевий трубопровід – “труба в трубі” [3] є зменшення пропускної здатності трубопроводу. Щоб мінімізувати таке зменшення протягування виконують з руйнуванням дефектного сталевого трубопроводу [4–6], застосовують методи Swagelining” та “С-лайнер” [6, 7], протягують чи вивертають рукав [8, 9]. Такі методи є складнішими і дорожчими ніж “труба в трубі”. Варіантом подолання таких труднощів може бути протягування новітніх гнучких композитних труб, армованих скловолокном, скловолокном та епоксидом чи сталлю [10, 11] в зношений сталевий трубопровід. Такі труби можуть експлуатуватись під високими тиском (до 20 МПа), а тому їх все ширше застосовують для найпростішого методу реконструкції трубопроводних комунікацій – “труба в трубі”. Однак невирішеними на сьогодні питаннями методу “труба в трубі” є:

- великі обсяги підготовчих робіт;
- перед виконанням реконструкції треба розробляти приймальний котлован, що не завжди можливо під час виконання робіт;
- невелика швидкість протягування нового поліетиленового трубопроводу зношеним сталевим.

Причинами цього є те, що протягування нової поліетиленової труби або рукава в зношений сталевий трубопровід виконують лебідками, гідродомкратними установками, статичною установкою Grundoburst, тракторами, бульдозерами та іншою колісною технікою [2, 4]. Це зумовлює об’єктивні складності пов’язані з потребою розроблення достатніх розмірів приймального котловану для розміщення в ньому тягових засобів або поворотних блоків. Також потрібно прокладати в зношений сталевий трубопровід тяговий трос, очищувати внутрішню порожнину зношеного сталевого трубопроводу протягуванням ним очисного поршня. Все це вимагає багато часу і фінансових витрат, а в ускладнених умовах ці методи застосувати надзвичайно складно. Все це дає підстави стверджувати, що доцільним є розроблення ефективних технологій безтраншейної реконструкції трубопроводних комунікацій, які б пришвидшили темпи виконання робіт, мінімізували обсяги підготовчих робіт та полегшили виконання робіт в ускладнених умовах.

3. Мета та задачі дослідження

Метою роботи є розроблення нової технології безтраншейної реконструкції трубопроводних комунікацій та дослідження ефективності її застосування.

Для досягнення мети були поставлені такі завдання:

- дослідити можливість протягування поршнем нового поліетиленового трубопроводу в зношений сталевий;

- виконати математичне моделювання динаміки протягування поршнем нового поліетиленового трубопроводу в зношений сталевий;
- дослідити газодинамічні процеси у міжтрубному просторі під час протягування поршнем поліетиленового трубопроводу зношеним сталевим;
- експериментально дослідити динаміку протягування поршнем нового поліетиленового трубопроводу в зношений сталевий.

4. Дослідження можливості протягування поршнем нового поліетиленового трубопроводу в зношений сталевий

Щоб протягнути поршнем 5 новий поліетиленовий трубопровід 1 в зношений сталевий 4 розроблено технологію “Тяговий поршень” (рис. 1). Поршень 5 рухається під тиском повітря, яке подає компресор 2 в міжтрубний і запоршневий простір. Щоб в запоршневому просторі підтримувався необхідний тиск треба герметизувати простір між новим поліетиленовим трубопроводом та зношеним сталевим. Для цього розроблено ущільнювальну систему (рис. 2), яка містить затиснуті фланцями 4 кільцеві манжетові ущільнення 3. Кільцеві манжетові ущільнення 3 повинні герметизувати міжтрубний простір і не випускати з нього повітря та забезпечити можливість протягування нового поліетиленового трубопроводу зношеним сталевим. Тому їх внутрішня частина повинна бути вигнута в сторону протягування. Тоді під тиском повітря в міжтрубному просторі вони будуть притискатись до стінки протягуваного нового трубопроводу. Кількість манжетових ущільнень 3 залежить від тиску в міжтрубному просторі. Повітря подається від компресора, який приєднують до патрубку 5, а тиск в міжтрубному просторі вимірюють манометром 6.

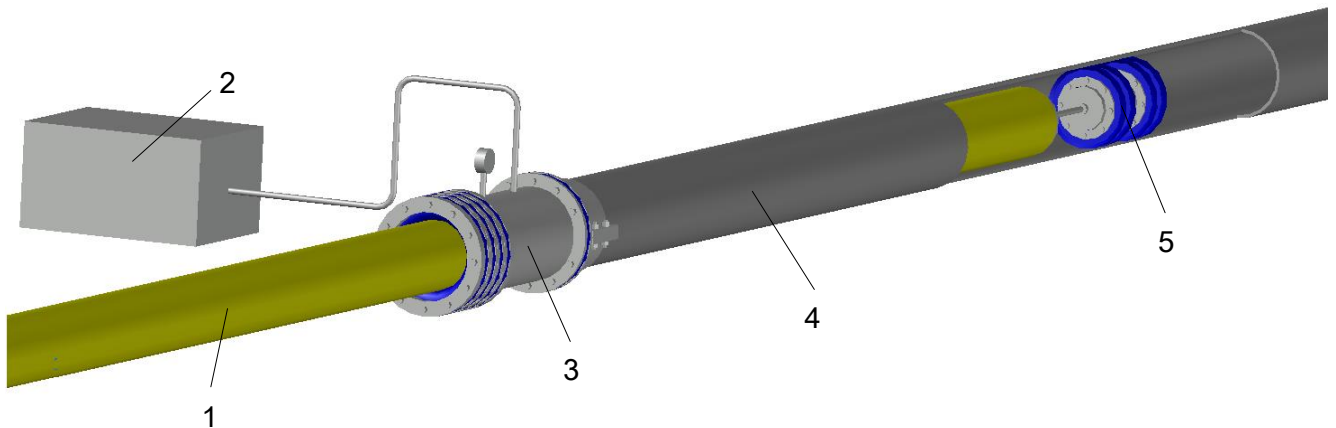


Рис. 1. Протягування поршнем нового поліетиленового трубопроводу в зношений сталевий: 1 – протягуваний поліетиленовий трубопровід; 2 – компресор; 3 – ущільнювальна система; 4 – зношений сталевий трубопровід; 5 – поршень

На монтажному майданчику біля робочого котловану поліетиленовий трубопровід проштовхують в ущільнювальну систему через кільцеві ущільнення. Тоді до початку поліетиленового трубопроводу кріплять поршень. В робочому

котловані поршень запасовують у зношений сталевий трубопровід. Тоді до торця зношеного сталевого трубопроводу хомутом або фланцем кріплять ущільнювальну систему. До ущільнювальної системи приєднують компресор, яким починають закачувати повітря в простір між зношеним сталевим і новим поліетиленовим трубопроводом. Міжтрубним простором повітря поступає в запоршневий простір. Оскільки ущільнювальна система не випускає повітря з міжтрубного простору, то тиск за поршнем зростає і він починає рухатись затягуючи за собою новий поліетиленовий трубопровід в зношений сталевий (рис. 1). Під час протягування відбувається очищення внутрішньої порожнини зношеного сталевого трубопроводу поршнем.

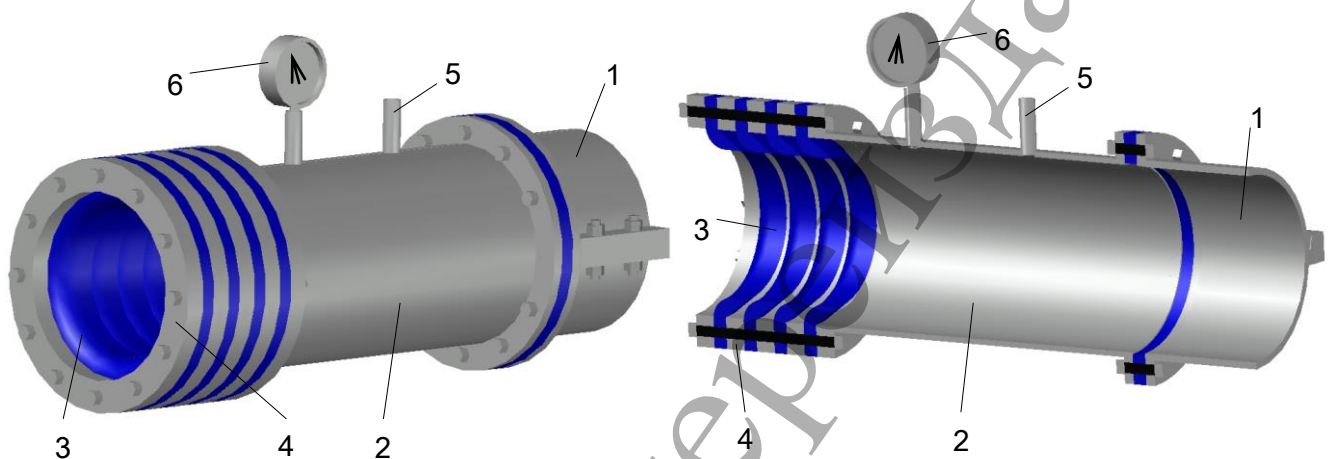


Рис. 2. Ущільнювальна система: 1 – хомут; 2 – труба; 3 – манжетові ущільнення; 4 – фланець; 5 – патрубок для приєднання компресора; 6 – манометр

Щоб дослідити процес протягування поршнем поліетиленового трубопроводу в зношений сталевий, визначити, яким повинен бути тиск на виході компресора для його підбору, треба розглядати задачу про динаміку процесу в комплексі. Треба враховувати сили, які діють на поршень та втрати енергії під час руху повітря міжтрубним простором. Оскільки на величину необхідного тиску на виході компресора впливають як сил опору, які діють на рухому систему, так і втрати тиску в міжтрубному просторі вздовж трубопроводу від компресора до поршня, то тиск на виході компресора буде рівний

$$P_{\text{комп}} = P_{\Pi} + \Delta P_L, \quad (1)$$

де P_{Π} – тиск повітря в запоршневому просторі, який визначається силами опору, що діють на рухому систему; ΔP_L – втрати тиску в міжтрубному просторі вздовж трубопроводу від компресора до поршня під час руху повітря міжтрубним простором.

5. Математичне моделювання динаміки протягування поршнем нового поліетиленового трубопроводу в зношений сталевий

Створення і реалізація математичної моделі руху твердих тіл трубопроводами під тиском є складною задачею. Динаміка руху поршнів трубопроводами досліджена в роботах [12–15]. Дослідниками трубопровідного транспорту газу розроблено методи побудови математичних моделей руху поршня трубопроводом та загальні принципи їх реалізації. Однак досліджень динаміки руху поршня з прикріпленим до нього поліетиленовим трубопроводом не виконувалось.

Складні фізичні процеси тертя манжет поршня та прикріпленого до нього поліетиленового трубопроводу до стінок зношеного сталевого трубопроводу, в манжетах ущільнювальної системи, призводять до громіздких співвідношень між цими параметрами.

Особливо ускладняється моделювання процесу руху поршня трубопроводом у місцях підвищень або понижень траси. В таких місцях на поршень і прикріплений до нього поліетиленовий трубопровід діє змінна за величиною і напрямом сила тяжіння, яка має вплив на кінематику руху.

Рівнянням руху поршня з прикріпленим до нього поліетиленовим трубопроводом описується другим законом Ньютона

$$m_n \frac{dV_n}{dt} = \sum_{i=1}^n F_n, \quad (2)$$

де m_n – маса поршня; V_n – швидкість руху поршня; t – час; $\sum_{i=1}^n F_n$ – сума сил, які діють на рухому систему.

Поршень з прикріпленим до нього поліетиленовим трубопроводом рухається під дією сили, яка спричинена тиском повітря в запоршневому просторі P_{Π} . До сил опору, які діють на рухому систему на горизонтальних ділянках траси, відноситься:

- сила механічного тертя манжет поршня до стінок сталевого трубопроводу $F_{Тм.п}$;
- сила тертя поліетиленової труби до сталеві $F_{Тп.тр}$;
- сила тертя поліетиленової труби в кільцевих манжетах ущільнювальної системи $F_{Ту.с}$ (рис. 3).

Тоді сума сил, які діють на рухому систему буде рівна

$$\sum_{i=1}^n F_n = P_{\Pi} \frac{\pi D_{в.с}^2}{4} - F_{Тм.п} - F_{Тп.тр} - F_{Ту.с}, \quad (3)$$

де $D_{в.с}$ – внутрішній діаметр сталевого трубопроводу.

У разі рівномірного руху поршня

$$\sum_{i=1}^n F_n = P_{\Pi} \frac{\pi D_{в.с}^2}{4} - F_{Тм.п} - F_{Тп.тр} - F_{Ту.с} = 0. \quad (4)$$

Сила механічного тертя манжет поршня до стінок сталевго трубопроводу

$$F_{Тм.п} = n_{м.п} f_{м.п} F_H, \quad (5)$$

де $n_{м.п}$ – кількість манжет поршня; $f_{м.п}$ – коефіцієнт тертя ковзання гумових манжет поршня до стінок сталевго трубопроводу залежить від швидкості руху ковзаючої пари (зменшується при збільшенні швидкості), чистоти поверхні, її площі, сили притискання манжет до стінок трубопроводу, типу каучуку і знаходиться в діапазоні 0,5...0,7; F_H – сила реакції.

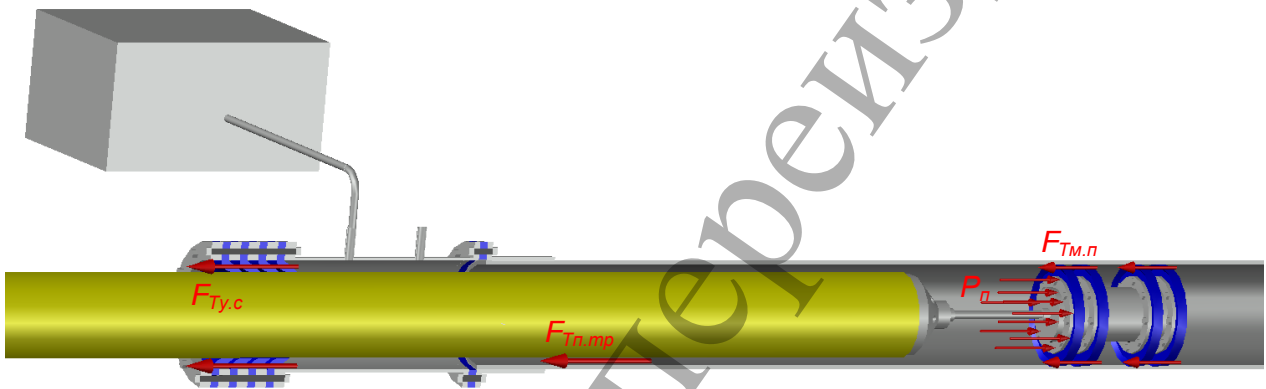


Рис. 3. Розрахункова схема протягування поршнем поліетиленового трубопроводу горизонтальною ділянкою зношеного сталевго

Сила реакції F_H це сила, яка виникає коли гумові манжети поршня притискаються до стінки сталевго трубопроводу. Для розрахунку сили реакції запишемо закон Гука, за яким напруження, що виникають в манжетах поршня рівні

$$\sigma = \varepsilon E, \quad (6)$$

де ε – відносна деформація манжет поршня; E – модуль пружності гуми ($E=2$ МПа).

Відносна деформація манжет поршня

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L}, \quad (7)$$

де L – радіус манжет поршня ($L=D_{мп}/2$, де $D_{мп}$ – діаметр манжет поршня до його запасування в трубопроводі); ΔL – абсолютне стиснення манжет поршня, яке рівне

$$\Delta L = \frac{D_{\text{м.п}} - D_{\text{в.с}}}{2}. \quad (8)$$

Також відомо, що напруження, які виникають в манжетах поршня рівні

$$\sigma = \frac{F_H}{S}, \quad (9)$$

де S – площа поперечного перерізу манжети поршня у напрямку дії сили

$$S = D_{\text{в.с}} h_{\text{м}}, \quad (10)$$

де $h_{\text{м}}$ – товщина манжети поршня.

Тоді підставивши (6)–(8), (10) в (9) отримаємо

$$F_H = E h_{\text{м}} D_{\text{в.с}} \frac{D_{\text{м.п}} - D_{\text{в.с}}}{D_{\text{м.п}}}. \quad (11)$$

Підставивши (11) в (5) отримаємо формулу для розрахунку сили механічного тертя манжет поршня до стінок сталевго трубопроводу

$$F_{\text{Тм.п}} = n_{\text{м.п}} f_{\text{м.п}} E h_{\text{м}} D_{\text{в.с}} \frac{D_{\text{м.п}} - D_{\text{в.с}}}{D_{\text{м.п}}}. \quad (12)$$

Сила тертя поліетиленової труби до сталевго

$$F_{\text{Тп.тр}} = f_{\text{п.тр}} q_{\text{п.тр}} L_{\text{п.тр}}, \quad (13)$$

де $f_{\text{п.тр}}$ – коефіцієнт тертя ковзання поліетилену до сталі (знаходиться в діапазоні $0,1 \dots 0,2$); $q_{\text{п.тр}}$ – рівномірно розподілене навантаження від власної ваги поліетиленового трубопроводу; $L_{\text{п.тр}}$ – довжина поліетиленової труби.

Рівномірно розподілене навантаження від власної ваги поліетиленового трубопроводу

$$q_{\text{п.тр}} = g \rho_{\text{п}} \frac{\pi (D_{\text{з.п}}^2 - D_{\text{в.п}}^2)}{4}, \quad (14)$$

де $\rho_{\text{п}}$ – густина поліетилену; $D_{\text{з.п}}$ – зовнішній діаметр поліетиленової труби; $D_{\text{в.п}}$ – внутрішній діаметр поліетиленової труби.

Сила тертя поліетиленової труби в манжетах ущільнювальної системи

$$F_{\text{Ту.с}} = n_{\text{м.у.с}} \pi D_{\text{з.п}} B P_{\text{к}} f_{\text{у.с}}, \quad (15)$$

де $n_{м.у.с}$ – кількість манжет в ущільнювальній системі; B – ширина контакту манжети з поліетиленовим трубопроводом; P_k – контактний тиск, який виникає під час монтажу манжет (знаходиться в діапазоні 0,5...0,9 МПа); $f_{у.с}$ – коефіцієнт тертя поліетилену до гуми (знаходиться в діапазоні 0,1...0,13).

Сумарна сила опору, яка діє на рухому систему

$$F = F_{T_{п.тр}} + F_{T_{м.п}} + F_{T_{у.с}}. \quad (16)$$

Результати розрахунків сил опору, які діють на рухому систему під час протягування поршнем нового поліетиленового трубопроводу в зношений сталевий, наведені в табл. 1. Розрахунки виконувались для сталевих трубопроводів зовнішнім діаметром 49 мм та протягуваних поліетиленових трубопроводів зовнішнім діаметром 32 мм і 40 мм.

Таблиця 1

Розрахункові значення сил опору, які діють на рухому систему під час протягування поршнем нового поліетиленового трубопроводу в зношений сталевий

$D_{з.п}$, мм	$F_{T_{п.тр}}$, $\frac{H}{M}$	$F_{T_{м.п}}$, Н	$F_{T_{у.с}}$, Н	F , Н
32	1,0	46,1	86,8	136,9
40	1,2	46,1	98,5	155,8

Як бачимо, сила тертя манжет поршня до стінок зношеного сталевих трубопроводу та сила тертя поліетиленової труби в манжетах ущільнювальної системи є незначними та не чинять суттєвого впливу на процес протягування. Сила тертя одного метра поліетиленової труби до сталевих є мізерною і знаходиться в межах від 1 до 2 Н.

Підставивши (12), (13), (15) в (4) отримаємо

$$P_{\Pi} \frac{\pi D_{в.с}^2}{4} - n_{м.п} f_{м.п} E h_m D_{в.с} \frac{D_{м.п} - D_{в.с}}{D_{м.п}} - f_{п.тр} q_{п.тр} L_{п.тр} - n_{м.у.с} \pi D_{з.п} B P_k f_{у.с} = 0. \quad (17)$$

Тоді необхідний тиск повітря в запоршневому просторі, щоб поршень з прикріпленим до нього поліетиленовим трубопроводом рухався горизонтальним трубопроводом

$$P_{\Pi} = \frac{4 \left(n_{м.п} f_{м.п} E h_m D_{в.с} \frac{D_{м.п} - D_{в.с}}{D_{м.п}} + f_{п.тр} q_{п.тр} L_{п.тр} + n_{м.у.с} \pi D_{з.п} B P_k f_{у.с} \right)}{\pi D_{в.с}^2}. \quad (18)$$

На похилих ділянках траси на поршень і прикріплений до нього поліетиленовий трубопровід діють значні гравітаційні сили (рис. 4).

На похилих ділянках траси рівняння (4) матиме вигляд

$$\sum_{i=1}^n F_n = P_{\Pi} \frac{\pi D_{в.с}^2}{4} - F_{Тм.п} - F_{Тп.тр} - F_{Ту.с} - G_{\Pi} \sin \phi - G_{п.тр} \sin \phi = 0, \quad (19)$$

де G_{Π} – сила тяжіння поршня; $G_{п.тр}$ – сила тяжіння поліетиленового трубопроводу; ϕ – кут нахилу сталевого трубопроводу до горизонту.

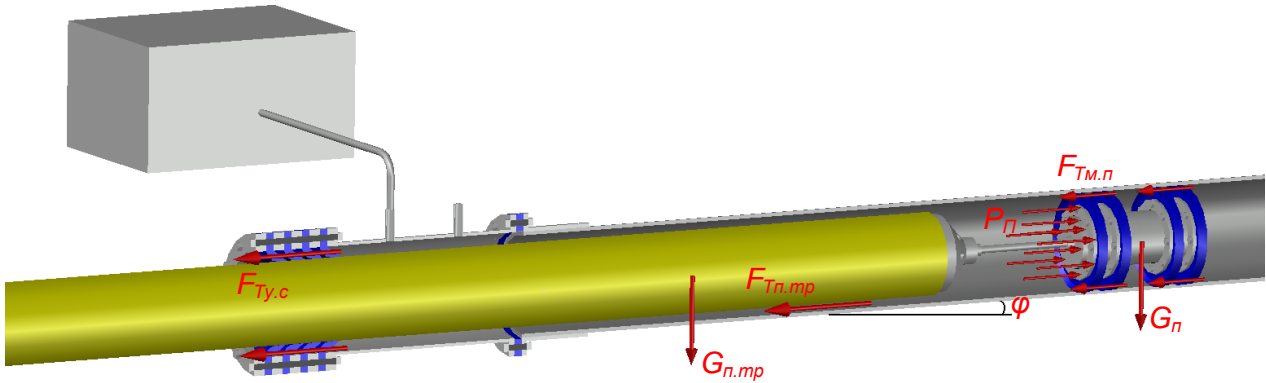


Рис. 4. Розрахункова схема протягування поршнем поліетиленового трубопроводу похилою ділянкою зношеного сталевого

Сила тяжіння поршня

$$G_{\Pi} = m_{\Pi} g \sin \phi, \quad (20)$$

де m_{Π} – маса поршня.

Сила тяжіння поліетиленового трубопроводу

$$G_{п.тр} = q_{п.тр} L_{п.тр} \sin \phi. \quad (21)$$

Звідки необхідний тиск повітря в запоршневому просторі на похилих висхідних ділянках траси

$$P_{\Pi} = \frac{4 \left(n_{м.п} f_{м.п} E h_{м} D_{в.с} \frac{D_{м.п} - D_{в.с}}{D_{м.п}} + f_{п.тр} q_{п.тр} L_{п.тр} + n_{м.у.с} \pi D_{з.п} B P_{к} f_{у.с} + m_{\Pi} g \sin \phi + q_{п.тр} L_{п.тр} \sin \phi \right)}{\pi D_{в.с}^2}. \quad (22)$$

Треба враховувати, що на висхідних ділянках траси сила тяжіння спричиняє опір рухові поршню і прикріпленому до нього поліетиленовому трубопроводу, тобто є гальмівною силою, а на низхідних ділянках сила тяжіння є рухомою силою.

6. Дослідження газодинамічних процесів у міжтрубному просторі під час протягування поршнем поліетиленового трубопроводу зношеним сталевим

Нестационарний рух повітря в міжтрубному просторі між поліетиленовим і сталевим трубопроводом та складні динамічні умови на рухомій границі створюють труднощі в розрахунках втрат тиску в міжтрубному просторі від компресора до поршня. До того ж поліетиленовий і сталевий трубопроводи мають різну шорсткість стінки, що ускладнює такі розрахунки.

Тому з метою спрощення прийнято рішення розглядати газодинамічні процеси в рівнинному трубопроводі, оскільки вплив нахилу трубопроводу на динаміку руху оцінено вище.

Потрібно виконати моделювання нестационарних газодинамічних процесів в міжтрубному та запоршневому просторі, зумовлених рухом поршня з прикріпленим до нього поліетиленовим трубопроводом.

Ізотермічний характер руху повітря в міжтрубному просторі може бути змодельований рівняннями газової динаміки, а саме рівняння Нав'є-Стокса (22), яке виражає закон збереження імпульсу, і нерозривності потоку (23), яке виражає закон збереження маси

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right) + f_i, \quad (23)$$

$$\frac{\partial p}{\partial x_i} + c^2 \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j) = 0, \quad (24)$$

де x_i, x_j – координати; t – час; u_i, u_j – компоненти швидкості; ρ – густина газу; μ – молекулярна динамічна в'язкість газу; f_i – доданок, який враховує дію масових сил; p – тиск; c – швидкість звуку у повітрі [16].

Необхідно відзначити, що будь-яка математична модель ідеалізує свій фізичний праобраз. У даній задачі розглядається одновимірний ізотермічний рух газу. Розрахункова схема дослідження газодинамічних процесів під час протягування поршнем поліетиленового трубопроводу зношеним сталевим трубопроводом наведена на рис. 5.

Поставлена задача реалізується за наступних умов:

– до запускання поршня подавання повітря в міжтрубний простір не виконувалось;

– після початку руху поршня і до його кінця надлишковий тиск на виході компресора підтримується сталим і рівним $P_{\text{комп}}$, а в кінці сталевого трубопроводу і перед поршнем нулю;

– тиск на поршень $P_{\text{П}}$ визначається силою тертя манжет поршня до стінок сталевих трубопроводу, силою тертя поліетиленової труби до сталевих, силою тертя поліетиленової труби в манжетах ущільнювальної системи;

- треба дослідити динаміку руху поршня $l(t)$ в часі та динаміку руху повітря в запоршневому просторі;
- вважається, що швидкість руху поршня рівна лінійній швидкості руху повітря в перерізі, де поршень контактує з повітрям.

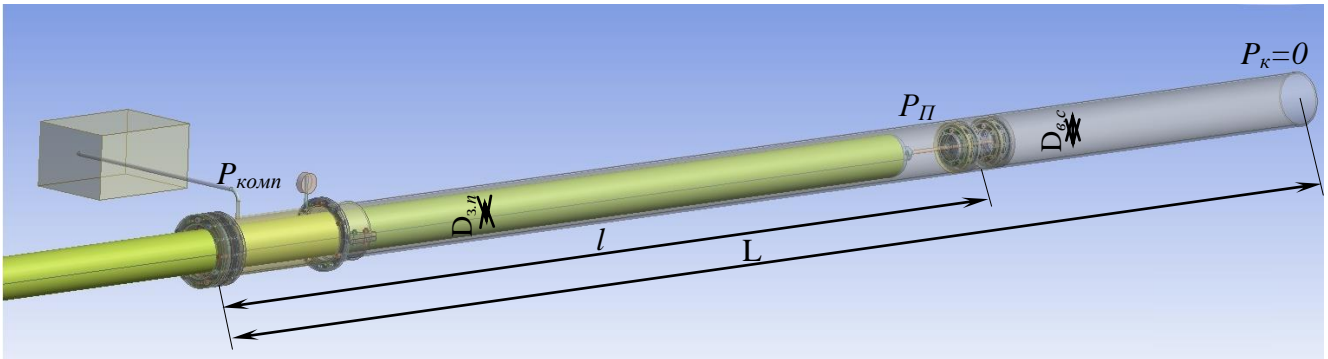


Рис. 5. Розрахункова схема дослідження газодинамічних процесів під час протягування поршнем поліетиленового трубопроводу дефектним сталевим

Щоб реалізувати поставлену задачу початкові умови для рівнянь (23) і (24) будуть

$$P_{\text{комп}} = 0, \quad (25)$$

$$P_{\text{к}} = 0. \quad (26)$$

Граничні умови на початку і в кінці сталевого трубопроводу визначаються постійністю тисків

$$P_{\text{комп}}(0, t) = P_{\text{комп}}, \quad (27)$$

$$P_{\text{к}}(L, t) = 0, \quad (28)$$

де L – загальна довжина сталевого трубопроводу.

В зоні контакту повітря з поршнем вважаємо, що лінійна швидкість повітря за поршнем рівна швидкості руху поршня, тобто

$$v_1(l, t) = \frac{dl}{dt}, \quad (29)$$

де v_1 – лінійна швидкість повітря за поршнем.

Потрібно визначити характер руху поршня $l_n(t)$ в часі, а також установити газодинамічний характер руху повітря в міжтрубному та запоршневому просторі.

Реалізувати поставлену задачу треба ітераційним методом. Для цього період руху поршня трубопроводом потрібно розбити на часові відрізки Δt , протягом кожного з яких швидкість руху поршня вважається сталою. Для забезпечення цієї умови проміжки часу Δt можна вибрати достатньо малими.

Оскільки швидкість поршня в початковий момент руху дорівнює швидкості повітря w_0 , то шлях, пройдений поршнем за проміжок часу Δt , дорівнює

$$l_0 = w_0 \Delta t. \quad (30)$$

Реалізувати такий алгоритм можна комп'ютерним моделюванням тривимірних турбулентних течій в програмному комплексі ANSYS Fluent R19.1 Academic (США) з застосуванням динамічних сіток.

ANSYS Fluent базується на рівняннях Нав'є-Стокса (23) і нерозривності потоку (24), замкнених широко відомою двопараметричною k - ϵ моделлю турбулентності Лаундера-Шарма із застосуванням пристінної функції з відповідними початковими (25) та (26) і граничними (27) та (28) умовами.

В ANSYS Fluent ці рівняння замикаються двопараметричною k - ϵ (k – турбулентна енергія, ϵ – швидкість дисипації турбулентної енергії) моделлю турбулентності, яка передбачає розв'язання наступних рівнянь:

– рівняння переносу турбулентної енергії k

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla(\rho u k) = \nabla \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right) + \mu_t G - \rho \epsilon; \quad (31)$$

– рівняння переносу турбулентної дисипації ϵ

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \nabla(\rho u \epsilon) = \nabla \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \nabla \epsilon \right) + C_1 \frac{\epsilon}{k} \mu_t G - C_2 \rho \frac{\epsilon^2}{k}, \quad (32)$$

де u – швидкість потоку газу; μ_t – турбулентна динамічна в'язкість газу; σ_k – коефіцієнт, який рівний одиниці; G – розрахунковий параметр; σ_ϵ – коефіцієнт, який рівний $\sigma_\epsilon=1,3$; C_1 – коефіцієнт, який рівний $C_1=1,44$; C_2 – коефіцієнт, який рівний $C_2=1,92$.

Модель турбулентності k - ϵ є так званою "високореїнольдсовою" моделлю, створеною на основі методу усереднення рівнянь Нав'є-Стокса і призначена для розрахунку турбулентних процесів.

Тривимірні модель запоршневого та міжтрубного простору між дефектним сталевим трубопроводом та новим поліетиленовим, де відбувається складний турбулентний рух потоку повітря, була змодельована з патрубком яким повітря подається в міжтрубний простір (рис. 6).

Для моделювання потоку повітря в препроцесорі Fluent-Meshing генерувалась об'ємна розрахункова сітка Hex Dominant – об'єм заповнювався гексаедричними елементами. Задавався розмір елементів сітки – 0,003 м. Для кращого

опису приграничного шару був створений пристінковий шар ґраток Inflation з висотою ґраток 0,001 м і кількістю шарів ґраток – 4. В місці приєднання патрубку до сталевго трубопроводу виконувалось подрібнення сітки для кращого візуалізування потоку в цій зоні до розміру елементів сітки – 0,001 м (рис. 7). Для такого розміру елементів сітки результати розрахунку були якісно візуалізовані, а час розрахунку складав близько півтори години

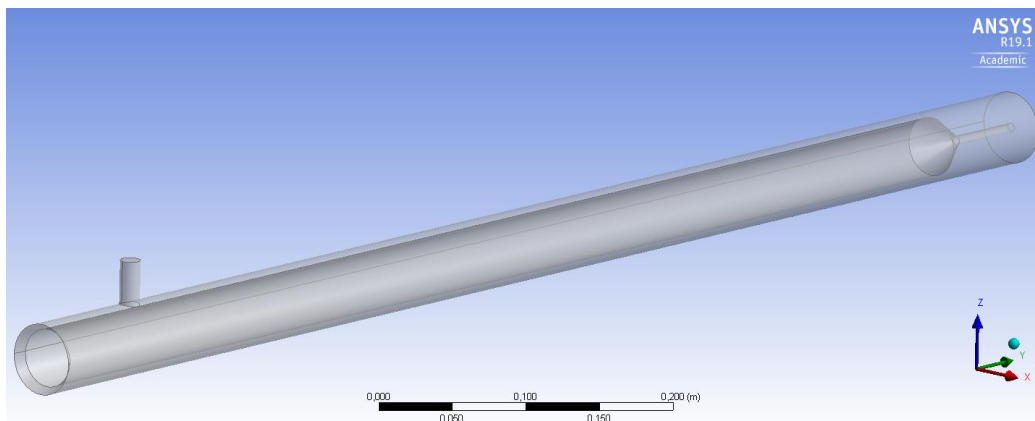


Рис. 6. Модель запоршневого та міжтрубного простору

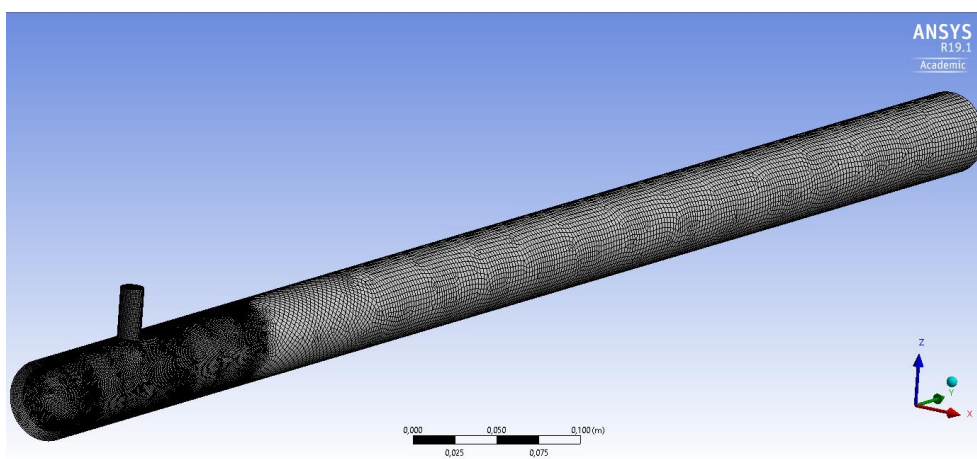


Рис. 7. Розрахункова об'ємна сітка

З бази даних матеріалів ANSYS Fluent вибиралось повітря і присвоювалось розрахунковій сітці.

Для внутрішньої стінки сталевго зношеного трубопроводу задавався коефіцієнт еквівалентної шорсткості труби $h_{s,c}=0,75$ мм, а для зовнішньої стінки нового поліетиленового трубопроводу $h_{s,n}=0,007$ мм.

Внутрішній діаметр сталевго трубопроводу приймався рівним $D_{в,c}=49$ мм, зовнішній діаметр поліетиленової труби $D_{з,п}=40$ мм. Внутрішній діаметр патрубка, яким повітря подається від компресора в міжтрубний простір $D_{в,пат}=10$ мм і він рівний гідравлічному діаметру, який задавався в ANSYS Fluent.

Для дослідження динаміку руху повітря міжтрубним і запоршневим простором під час протягування нового поліетиленового трубопроводу в дефектний сталевий задавались такі граничні умови на вході (рис. 8):

- масова витрата $M_{вх}=0,00645$ кг/с;
- інтенсивність турбулентності 5 %;
- гідравлічний діаметр $D_{вх}=0,018$ м;
- температура повітря $T_{вх}=293$ К.

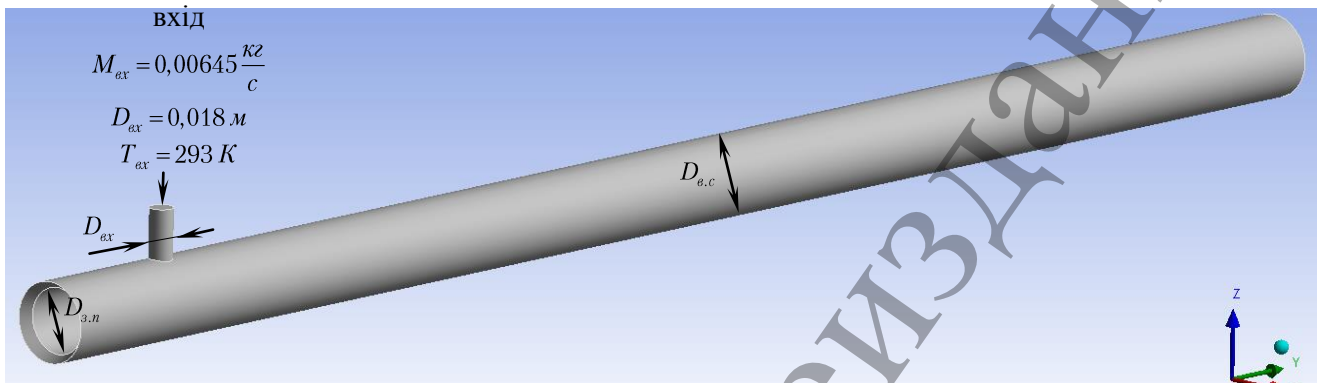


Рис. 8. Розрахункова схема

Процес протягування нового поліетиленового трубопроводу в дефектний сталевий є динамічний – в дефектному сталевому трубопроводі рухається поршень і прикріплений до нього новий поліетиленовий трубопровід. Для дослідження газодинамічних процесів в міжтрубному просторі під час такого руху в ANSYS Fluent застосовувалась модель динамічної сітки, яка сумісна з усіма моделями турбулентності. Оскільки такий процес є нестационарним в головному меню ANSYS Fluent вибиралась нестационарна постановка задачі Transient. Було вибрано тип перебудови параметрів динамічної сітки під час протягування нового поліетиленового трубопроводу в дефектний сталевий поршнем – Layering, який найкраще підходить для поступального руху. Тип перебудови параметрів динамічної сітки Layering включає в себе алгоритм створення і видалення ґраток сітки (ґратки сітки додаються, якщо зона збільшується, або видаляються, якщо зона зменшується). Після чого задавалось, що від грані, яка є задньою частиною поршня (рис. 9), ґратки сітки повинні додаватись, а від грані, яка є внутрішньою поверхнею прикріпленого до поліетиленового трубопроводу оголовка (рис. 10) – видалятись. Швидкість переміщення граней була визначена експериментально і було задано 1,72 м/с.

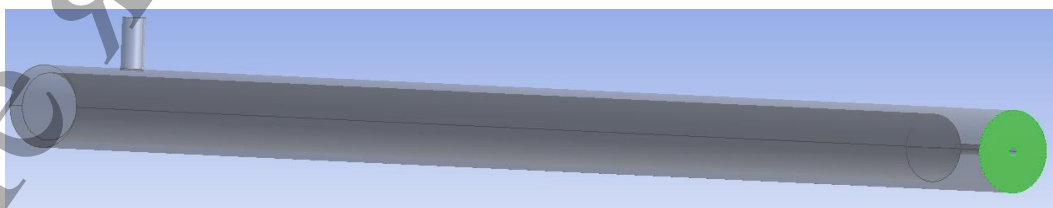


Рис. 9. Схема задавання рухомої грані, яка є задньою частиною поршня

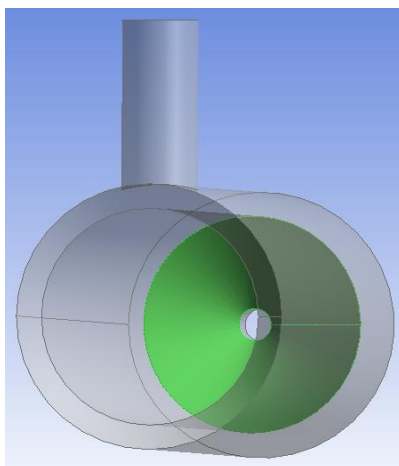


Рис. 10. Схема задавання рухомої грані, яка є внутрішньою поверхнею прикріпленою до поліетиленового трубопроводу оголовка

Результати моделювання були візуалізовані в постпроцесорі програмного комплексу, що дало змогу побачити структуру потоку повітря в міжтрубному просторі під час протягування нового поліетиленового трубопроводу в дефектний сталевий і зібрати дані про нього.

Було побудовано вектори швидкості вздовж (рис. 11) та на вході (рис. 12) в міжтрубний простір, лінії течії (рис. 13), поля тиску на контурах (рис. 14) та поля тиску в площині вертикального повздовжнього перерізу (рис. 15).

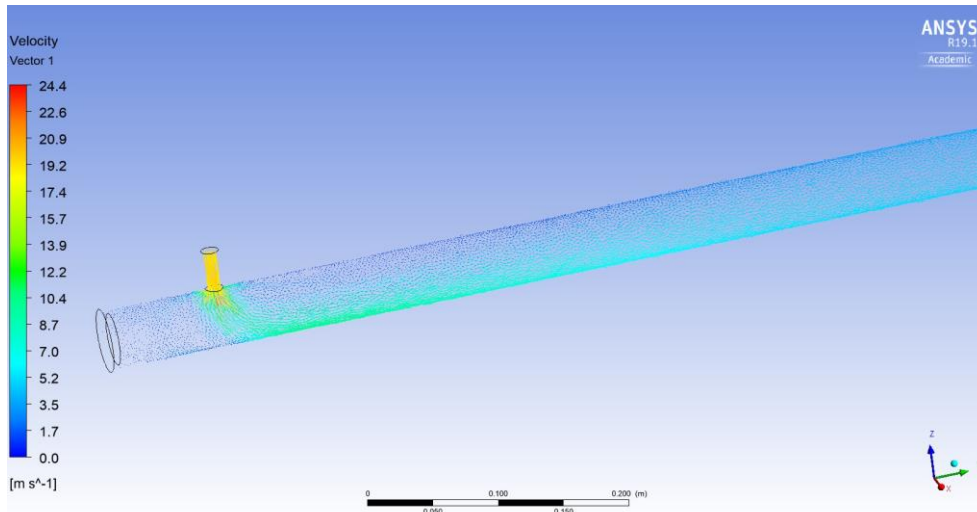


Рис. 11. Вектори швидкості вздовж міжтрубного простору

За результатами розрахунку в програмному комплексі ANSYS Fluent було визначено, що у вхідному патрубку швидкість потоку повітря вздовж осі складає 19,2 м/с. Від осі потоку в напрямі стінки відбувається незначне зниження швидкості потоку, а біля стінки швидкість потоку газу знижується різко. З вхідного патрубка потік повітря перетікає у міжтрубний простір. В міжтрубному просторі навпроти вхідного патрубка потік повітря розходиться в різні сторони на кут 360° (рис. 12, 13). При цьому в центрі такого розходження навпроти вхі-

дною патрубком відбувається сповільнення потоку повітря до 12 м/с, а на краях (за межами вхідного патрубка) пришвидшення до 24,5 м/с (рис. 12). Після такого розходження потоку повітря в міжтрубному просторі основна частина потоку повітря перетікає бічною частиною міжтрубного простору до низу (рис. 12, 13), де швидкість потоку складає 14,4 м/с. Далі більша частина потоку рухається вздовж нижньої частини труби в напрямку протягування з швидкістю біля 14 м/с, яка вздовж міжтрубного простору зменшується (рис. 12). Біля верхньої частини труби за вхідним патрубком швидкість течії є незначною і складає біля 1 м/с (рис. 12). На віддалі біля 3 м від вхідного патрубка швидкість потоку в поперечному перерізі вирівнюється і складає біля 1,7 м/с.

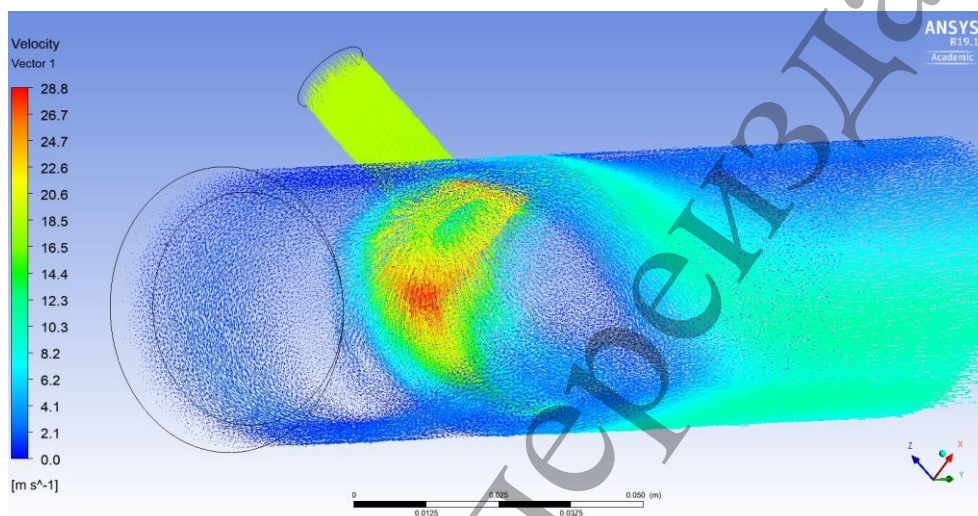


Рис. 12. Вектори швидкості на вході в міжтрубний простір

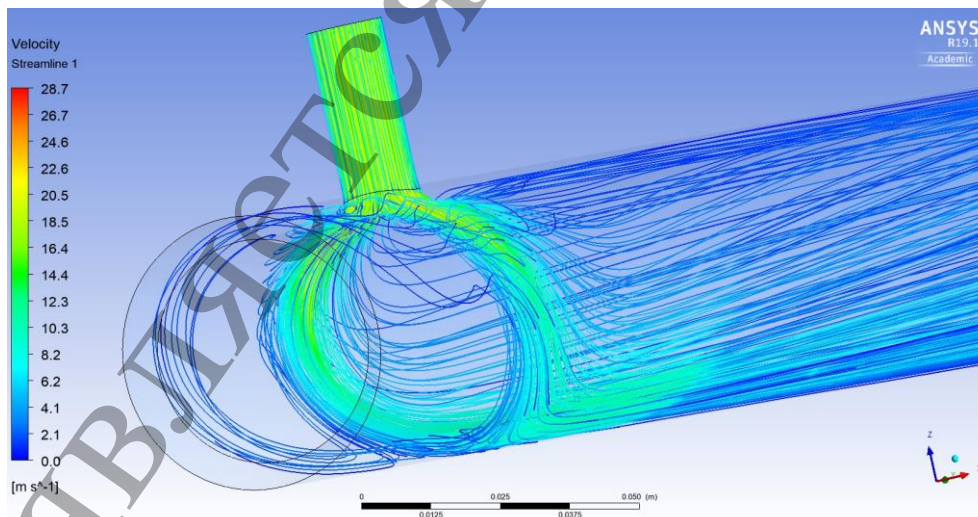


Рис. 13. Лінії течії забарвлені в кольори швидкості потоку повітря на вході в міжтрубний простір

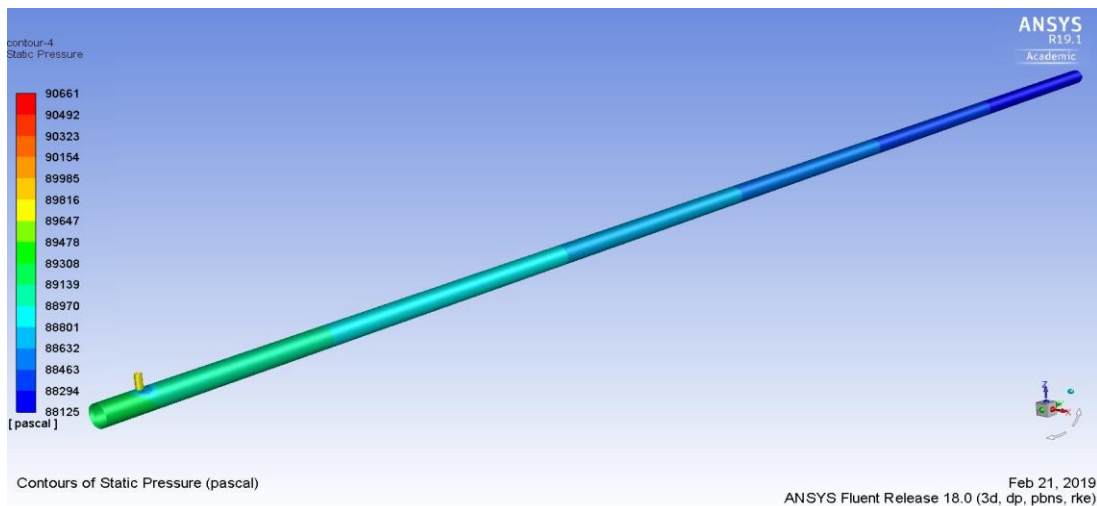


Рис. 14. Поля тиску на контурах

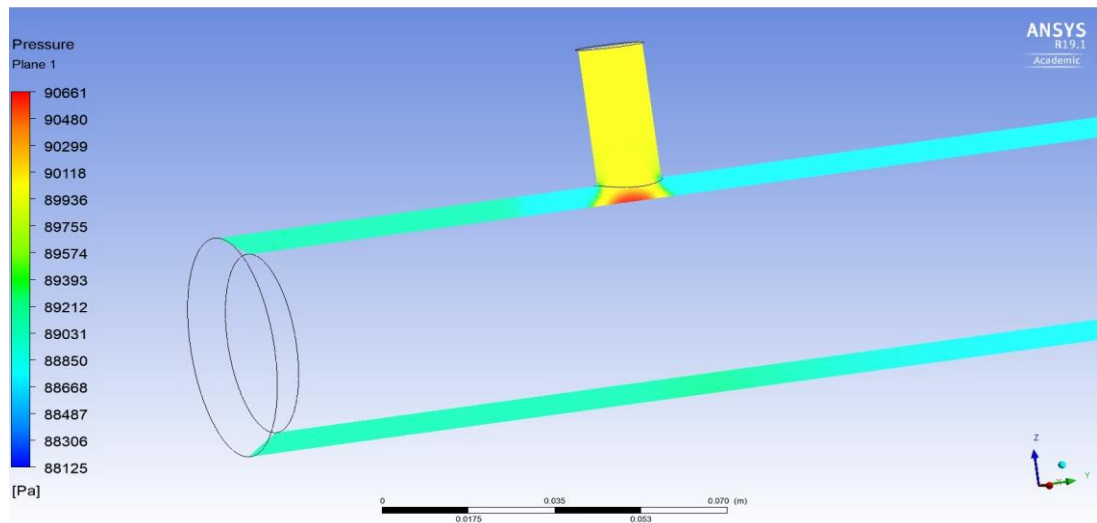


Рис. 15. Поля тиску в площині вертикального повздовжнього перерізу

Як видно з полів тиску (рис. 14, 15), тиск в міжтрубному і запоршневому просторі під час протягування поршнем нового поліетиленового трубопроводу в дефектний сталевий розподілений нерівномірно. У вхідному патрубку тиск складає 89800 Па. З полів тиску було помічено, що в міжтрубному просторі навпроти вхідного патрубка відбувається збільшення тиску до 90661 Па (рис. 15), а довкола вхідного патрубка тиск падає до 88461 Па (рис. 14). Вздовж міжтрубного простору від вхідного патрубка до рухомого поршня відбувається падіння тиску. Так, якщо поршень знаходиться на віддалі 4 м від вхідного патрубка тиск на вході складає 89602 Па, а в запоршневому просторі 88125 Па. Таким чином падіння тиску в міжтрубному просторі на один погонний метр складає 369 Па. Тоді втрати тиску в міжтрубному просторі вздовж трубопроводу від компресора до поршня під час руху повітря міжтрубним простором, які є одним з доданків в (1) будуть рівні

$$\Delta P_L = 369L. \tag{33}$$

Якщо протягнуто 50 м поліетиленового трубопроводу втрати тиску в міжтрубному просторі складають 18450 Па, а якщо 100 м – 36900 Па.

7. Експериментальні дослідження динаміки протягування поршнем нового поліетиленового трубопроводу в зношений сталевий

Для практичної реалізації розробленої технології “Тяговий поршень” потрібно експериментально:

- перевірити можливість протягування поршнем нового поліетиленового трубопроводу в зношений сталевий трубопровід;
- перевірити технологічність виконання операцій безтраншейної реконструкції трубопроводів поршнем;
- дослідити динаміку протягування поршнем нового поліетиленового трубопроводу в зношений сталевий трубопровід.

Для експериментальних досліджень розроблено і побудовано експериментальну установку (рис. 16, 17), яка складається з зношеної сталеві труби 10 внутрішнім діаметром 49 мм і довжиною 4 м. До сталеві труби 10 фланцем 9 кріпиться ущільнювальна система, яка складається з трубної котушки 8, фланців 5 і трьох кільцевих манжетних ущільнень 7 товщиною 3 мм затиснутих болтами 6, манометра 3 та патрубка до якого приєднано лічильник 2 та компресор 1. В сталеву трубу 10 запасовано поршень 12 до якого тягою 13 за оголовок 11 прикріплена нова поліетиленова труба 4 на яку чорним маркером з кроком 0,25 м нанесені позначки. Експериментальні дослідження виконувались для поліетиленових труб зовнішнім діаметром 32 мм та 40 мм.

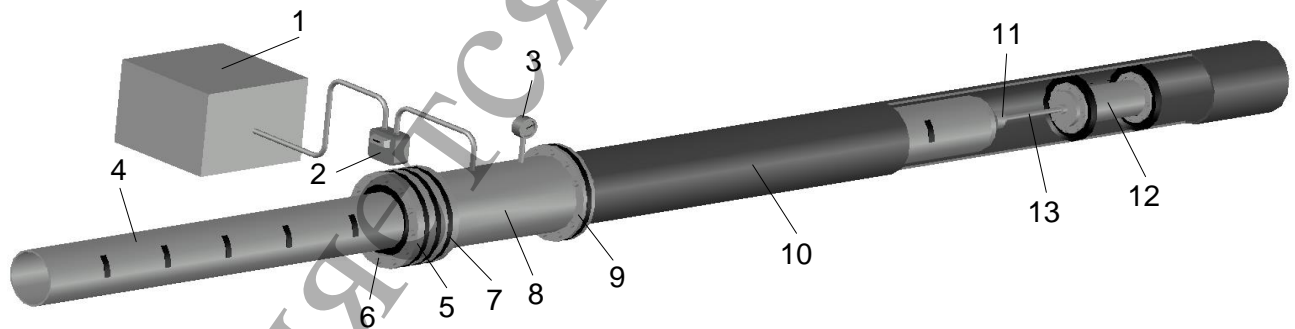


Рис. 16. Схема експериментальної установки для досліджень динаміки протягування поршнем нового поліетиленового трубопроводу в зношений сталевий: 1 – компресор; 2 – лічильник; 3 – манометр; 4 – протягуваний поліетиленовий трубопровід; 5, 9 – фланець; 6 – болт; 7 – кільцеве гумове ущільнення; 8 – трубна котушка; 10 – зношений сталевий трубопровід; 11 – оголовок; 12 – поршень; 13 – тяга

Дослід повторювався для різних нахилів зношеного сталевого трубопроводу до горизонту, різних витрат повітря.



Рис. 17. Експериментальна установка для досліджень динаміки протягування поршнем нового поліетиленового трубопроводу в зношений сталевий

Виконавши експериментальні випробування, встановлено, що розроблена технологія “Тяговий поршень” є трудоздатною та технологічною і може застосовуватись для реконструкції трубопровідних комунікацій. Час підготовки обладнання до виконання робіт складає 1–2 хв.

Під час протягування вимірюється тиск манометром 3 (рис. 16), витрата повітря лічильником 2. Також визначалась швидкість протягування поліетиленової труби 4 сталевією трубою 10 (фіксують час, за який нанесені на поліетиленову трубу з кроком 0,25 м чорні позначки заходять в кільцеві гумові ущільнення). Для цього виконується посекундний відеозапис.

Для поліетиленової труби зовнішнім діаметром 32 мм при об’ємній витраті повітря $0,005 \text{ м}^3/\text{с}$ час протягування склав 2,1 с. Розрахункова середня швидкість протягування 1,9 м/с. За виконаним рядом вимірювань значень тиску побудовано криву (рис. 18) зміни тиску на початку трубопроводу в часі під час протягування. Тиск після відкриття крана до початку протягування збільшується до 0,087 МПа, що обумовлено силою тертя спокою. Після початку протягування тиск падає до 0,074 МПа, оскільки сила тертя зменшується з збільшенням швидкості. Далі відбуваються незначне коливання тиску з його незначним збільшенням до 0,075 МПа. В момент вильоту поліетиленової труби з кільцевих гумових манжет ущільнювальної системи відбувається різке падіння тиску до нуля при цьому чуто звуковий сигнал “хлопок”.

У разі збільшення нахилу сталевією трубопроводу до 30° відбувається незначне (до 0,03 МПа) збільшення тиску на початку трубопроводу порівняно з тиском, який був коли труба була горизонтальною, протягом усього часу протягування.

Аналогічні дослідження були виконані для поліетиленової труби зовнішнім діаметром 40 мм. При об’ємній витраті повітря $0,005 \text{ м}^3/\text{с}$ час протягування склав 2,5 с, а розрахункова середня швидкість протягування 1,64 м/с. Крива зміни тиску на початку трубопроводу в часі під час протягування поліетиленової труби зовнішнім діаметром 40 мм наведена на рис. 19. З графіка (рис. 19) видно, що тиск після відкриття крана до початку протягування збільшується до 0,1 МПа. Після початку протягування тиск падає до 0,086 МПа. Далі відбу-

вається незначне коливання тиску з його збільшенням до 0,09 МПа. Розрахований за наведеною вище методикою за (1) необхідний тиск на виході компресора $P_{\text{комп}}$ щоб поршень з прикріпленим до нього поліетиленовим трубопроводом зовнішнім діаметром 40 мм рухався горизонтальним трубопроводом складає 0,085 МПа. Таке значення є наближено рівне експериментально визначеному – 0,09 МПа, що підтверджує адекватність теоретично виведених залежностей.

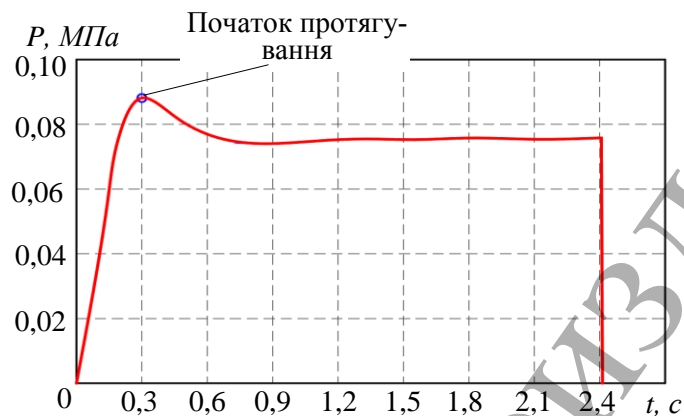


Рис. 18. Зміна тиску на початку трубопроводу в часі під час протягування поршнем поліетиленової труби зовнішнім діаметром 32 мм зношеною сталеву трубою

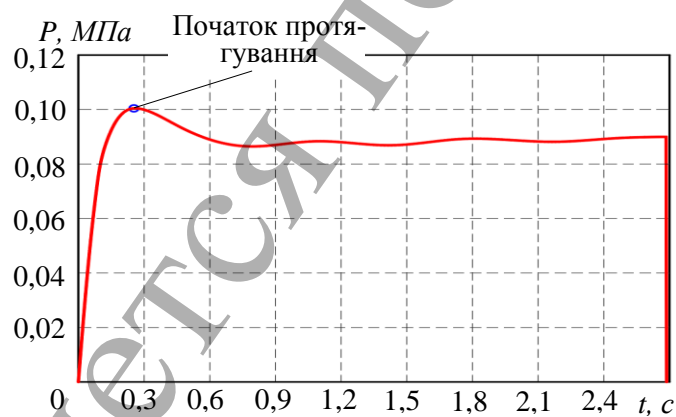


Рис. 19. Зміна тиску на початку трубопроводу в часі під час протягування поршнем поліетиленової труби зовнішнім діаметром 40 мм зношеною сталеву трубою

Основним методом регулювання швидкості протягування є зміна об'ємної витрати повітря зміною величини відкриття крана компресора. Для визначення функціональної залежності середньої швидкості протягування від об'ємної витрати повітря виконано ряд визначень середньої швидкості протягування V для різних значень об'ємної витрати повітря Q . Також змінювався зовнішній діаметр протягуваного поліетиленового трубопроводу (32 мм та 40 мм).

Вимірювання (для одних і тих самих значень чинників) виконано кілька разів. Середні значення результатів вимірювань подано графічно (рис. 20). Такі дослідження дають можливість регулювати швидкість протягування.

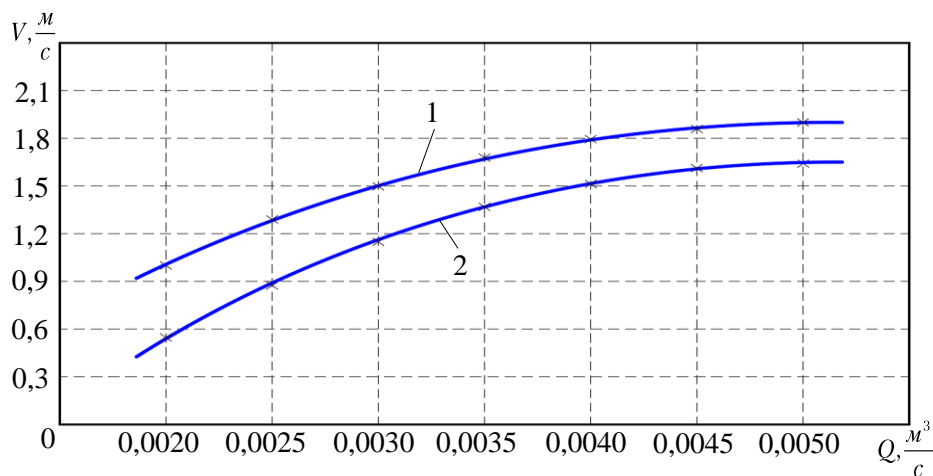


Рис. 20. Залежність швидкості протягування від об'ємної витрати повітря: 1 – $D_{з.п}=32$ мм; 2 – $D_{з.п}=40$ мм

Експериментально досліджено залежність швидкості протягування поліетиленової труби зношеною сталевією трубою від довжини протягнутої ділянки поліетиленової труби. Вимірювалась швидкість протягування (фіксувався час, за який нанесені на поліетиленову трубу з кроком 0,25 м чорні позначки заходять в кільцеві гумові ущільнення (рис. 16)), при сталій об'ємній витраті.

За виконаним рядом вимірювань швидкості протягування поршнем нової поліетиленової труби зношеною сталевією побудовано графіки залежності швидкості протягування V від довжини протягнутої ділянки поліетиленової труби в сталеву для сталих значень об'ємної витрати. Дослідження виконувались для поліетиленових труб зовнішнім діаметром 32 мм (рис. 21) та 40 мм (рис. 22).

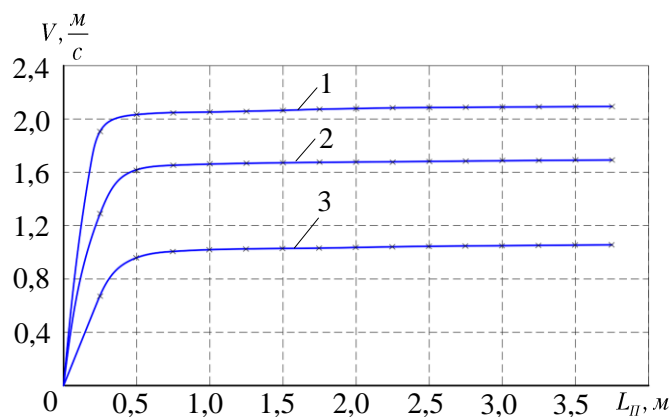


Рис. 21. Залежність швидкості протягування від довжини протягнутої поршнем ділянки поліетиленової труби зовнішнім діаметром 32 мм:
1 – $Q=0,0050$ м³/с; 2 – $Q=0,0035$ м³/с; 3 – $Q=0,0020$ м³/с

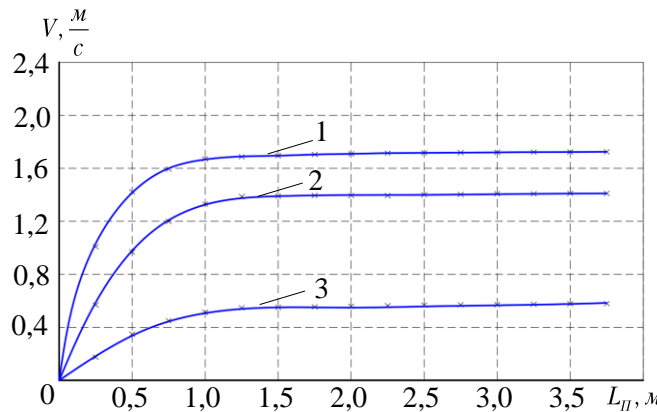


Рис. 22. Залежність швидкості протягування від довжини протягнутої поршнем ділянки поліетиленової труби зовнішнім діаметром 40 мм:
 1 – $Q=0,0050 \text{ м}^3/\text{с}$; 2 – $Q=0,0035 \text{ м}^3/\text{с}$; 3 – $Q=0,0020 \text{ м}^3/\text{с}$

На початковому етапі (рис. 21, 22) швидкість протягування різко зростає і після такого зростання стабілізується.

8. Обговорення результатів теоретичних та експериментальних досліджень динаміки протягування поршнем нового поліетиленового трубопроводу в зношений сталевий

Реалізувати ідею реконструкції трубопроводних комунікацій протягуванням поршнем нового поліетиленового трубопроводу в зношений сталевий стало можливим завдяки розробленню ущільнювальної системи, якою герметизується міжтрубний простір між новим поліетиленовим трубопроводом та зношеним сталевим. Розроблена ущільнювальна система герметизує міжтрубний простір і не чинить значного опору протягуванню нею поліетиленового трубопроводу, що дає змогу поршню рухатись.

Можливість протягування поршнем нового поліетиленового трубопроводу в зношений сталевий підтвердило математичне моделювання динаміки протягування поршнем нового поліетиленового трубопроводу в зношений сталевий та CFD моделювання газодинамічних процесів у міжтрубному просторі. Було встановлено, що розраховані за теоретично виведеними формулами сили опору, які діють на рухому систему, є незначними та не чинять суттєвого впливу на процес протягування (табл. 1). Падіння тиску в міжтрубному просторі зумовлене газодинамічними процесами у міжтрубному просторі також є не великим і складає 369 Па на один погонний метр зношеного сталевого трубопроводу (рис. 14).

Експериментальні дослідження показали, що розроблена технологія “Тяговий поршень” є трудоздатною і може застосовуватись для реконструкції трубопроводних комунікацій. Було виявлено, що швидкість протягування на початку виконання робіт різко зростає і після такого зростання стабілізується (рис. 21, 22). Таке різке зростання швидкості протягування на початковому ета-

пі зумовлено великою швидкістю потоку повітря в міжтрубному просторі після його виходу з вхідного патрубка (рис. 12).

Розрахований за (1) необхідний тиск в запоршневому просторі, щоб поршень з прикріпленим до нього поліетиленовим трубопроводом зовнішнім діаметром 32 мм рухався складає 0,071 МПа і є наближено рівний експериментально визначеному 0,075 МПа (рис. 18), що підтверджує достовірність теоретичних досліджень. Також розрахунки за (1) виконувались для поліетиленового трубопроводу зовнішнім діаметром 40 мм і необхідний тиск в запоршневому просторі склав 0,083 МПа, що є наближено рівний експериментально визначеному 0,08 МПа (рис. 19).

Перевагами розробленої технології “Тяговий поршень” є невеликий обсяг підготовчих робіт, велика швидкість протягування, яку неможливо досягнути жодним з існуючих методів безтраншейної реконструкції трубопровідних комунікацій, можливість виконання робіт в ускладнених умовах.

Недоліком розробленої технології “Тяговий поршень”, який був виявлений експериментально, є вивертання резинових манжетових ущільнень міжтрубного простору в напрямку протилежному протягуванню при великому тиску в міжтрубному просторі.

Напрямок подальших досліджень є підбирання матеріалів манжетових ущільнень, які мають велику жорсткість і невеликий коефіцієнт тертя до поліетилену. Ще одним напрямком є розроблення технології “Тяговий поршень”, яка полягає в протягуванні поршнем поліетиленового рукава в зношений сталевий трубопровід.

8. Висновки

1. Особливістю технології безтраншейної реконструкції трубопровідних комунікацій “Тяговий поршень” є герметизування простору між новим поліетиленовим трубопроводом та зношеним сталевим розробленою ущільнювальною системою. Завдяки цьому компримоване повітря не виходить з міжтрубного простору, а тисне на поршень, який в свою чергу протягує новий поліетиленовий трубопровід зношеним сталевим. Технічним результатом застосування розробленої технології “Тяговий поршень” є зменшення часу робочого процесу, зменшення обсягу підготовчих робіт, спрощення процесу протягування нового трубопроводу, забезпечення можливості застосування в ускладнених умовах.

2. Виведено рівняння для розрахунку сили опору, які діють на рухому систему, під час протягування поршнем нового поліетиленового трубопроводу в зношений сталевий. Встановлено, що сила тертя манжет поршня до стінок зношеного сталевого трубопроводу та сила тертя поліетиленової труби в манжетах ущільнювальної системи є незначними (не перевищують 100 Н) та не чинять суттєвого впливу на процес протягування. Сила тертя одного метра поліетиленової труби до сталевий є мізерною і знаходиться в межах від 1 до 2 Н, а отже

технологією “Тяговий поршень” можна реконструювати протяжні ділянки трубопроводних комунікацій.

3. Виконавши в програмному комплексі Ansys Fluent моделювання газодинамічних процесів у міжтрубному просторі під час протягування поршнем поліетиленового трубопроводу зношеним сталевим виявлено місця сповільнення та пришвидшення потоку повітря, падіння та зростання тиску. Якщо поршнем протягнуто п’ятдесят метрів поліетиленового трубопроводу зовнішнім діаметром 40 мм падіння тиску в міжтрубному просторі складає 18450 Па, а якщо 100 м – 36900 Па.

4. Експериментально встановлено, що час підготовки обладнання до виконання реконструкції трубопроводу технологією “Тяговий поршень” складає 1–2 хв. Швидкість протягування на початку протягування різко зростає і після такого зростання стабілізується. При об’ємній витраті повітря 0,005 м³/с швидкість протягування поліетиленової труби зовнішнім діаметром 32 мм складає 2,1 м/с, а 40 мм – 1,7 м/с, що є надзвичайно великою швидкістю і її неможливо досягнути жодним з існуючих методів безтраншейної реконструкції трубопроводних комунікацій.

Література

1. Analysis of factors influencing the selection of water main rehabilitation methods / Yazdekhasi S., Piratla K., Khan A., Atamturktur S. // NASTT’s 2014 No-Dig Show. Orlando, 2014.
2. Identification of practices, design, construction, and repair using trenchless technology / Suleiman M., Stevens L., Jähren C., Ceylan H., Conway W. // In-Trans project reports. 2010.
3. Liu J., Kramer S., Provencio G. Advantages and disadvantages of trenchless construction approach as compared to the traditional open cut installation of underground utility systems // Creative Construction Conference 2018 – Proceedings. 2018. doi: <https://doi.org/10.3311/cc2018-018>
4. Mallakis G. Large diameter pipe bursting // Large pressure pipe structural rehabilitation conference. Los Angeles, 2016.
5. Marti T., Botteicher R. Thermally fused PVC pipe helps accelerate adoption of trenchless pipe installation techniques in North America // Proceedings of the 17th plastic pipes conference. Chicago, 2014.
6. Swagelining as a method of trenchless pipelines rehabilitation / Wróbel G., Pusz A., Szymiczek M., Michalik K. // Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering. 2009. Vol. 33, Issue 1. P. 27–34.
7. Matthews J., Sinha S., Sterling R. State of technology for rehabilitation of water distribution systems // Technical Report, U.S. Environmental Protection Agency (USA), CreateSpace Independent Publishing Platform. Washington, 2014. 214 p.
8. Polat S. Trenchless rehabilitation of pressurized pipes using the Primus Line® system // The prime solution of pipes, Rädlinger primusline GmbH, Cham, 2013. 42 p.

9. Johnson B., Grissom C. Best practices to manage odors during cured-in-place pipe lining // Kentucky-Tennessee Water Professionals Conference 2018. Nashville, 2018. P. 29–34.
10. Wellstream flexsteel™ flexible steel pipe // Technical, operating, and maintenance manual, Wellstream International Limited, USA, 2016. 69 p.
11. Weller B. Spoolable composite pipelines // Cost-Effective Well Site Facilities. Houston, 2018. 33 p.
12. Saeidbakhsh M., Rafeeyan M., Ziaei-Rad S. Dynamic Analysis of Small Pigs in Space Pipelines // Oil & Gas Science and Technology – Revue de l'IFP. 2009. Vol. 64, Issue 2. P. 155–164. doi: <https://doi.org/10.2516/ogst:2008046>
13. Tolmasquim S. T., Nieckele A. O. Design and control of pig operations through pipelines // Journal of Petroleum Science and Engineering. 2008. Vol. 62, Issue 3-4. P. 102–110. doi: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2008.07.002>
14. Математичне моделювання процесу руху інтелектуального поршня по газопроводу / Грудз В. Я., Бакаєв В. В., Грудз Я. В., Розен Г. // Нафтова і газова промисловість. 2000. № 1. С. 46–47.
15. Регулювання руху інтелектуального поршня зміною технологічної схеми лінійної ділянки / Грудз В. Я., Бакаєв В. В., Грудз Я. В., Розен Г. // Нафтова і газова промисловість. 2001. № 1. С. 44–45.
16. Squires K. D., Eaton J. K. Particle response and turbulence modification in isotropic turbulence // Physics of Fluids A: Fluid Dynamics. 1990. Vol. 2, Issue 7. P. 1191–1203. doi: <https://doi.org/10.1063/1.857620>