

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

**ПОЛЯРУШ КОСТЯНТИН АНАТОЛІЙОВИЧ**

УДК 622.691.4

**ДИСЕРТАЦІЯ**  
**РОЗРОБЛЕННЯ ТЕХНІКИ ТА ТЕХНОЛОГІЇ БЕЗТРАНШЕЙНОЇ**  
**РЕКОНСТРУКЦІЇ ТРУБОПРОВОДІВ ГАЗОВИХ І ТЕПЛОВИХ МЕРЕЖ**

05.15.13 – Трубопровідний транспорт, нафтогазосховища

18 – Виробництво та технології

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело



К. А. Поляруш

Науковий керівник

**Дорошенко Ярослав Васильович**  
доцент, кандидат технічних наук

*Всі примірники дисертації  
ідентичні і підписані  
Внешній секретар  
спеціалізованої  
ради*  
*20.09.2019*  
*Михайлів К.В.*  
*20.09.2019*  
Посвідчую  
Учений секретар ІФНТУНГ  
« 20 » 09 2019 р.



Івано-Франківськ – 2019

## АНОТАЦІЯ

*Поляруш К. А.* Розроблення техніки та технології безтраншейної реконструкції трубопроводів газових і теплових мереж. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.15.13 – Трубопровідний транспорт, нафтогазосховища (18 – Виробництво та технології). – Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, МОН України, Івано-Франківськ, 2019.

Дисертаційна робота присвячена комплексному вивченню методів безтраншейної реконструкції трубопроводів газових і теплових мереж. Теоретичним та експериментальним дослідженням процесу протягування поршнем нового поліетиленового трубопроводу чи рукава зношеним сталевим трубопроводом. Розробленню техніки та технології безтраншейної реконструкції трубопроводів газових і теплових мереж протягуванням поршнем нового поліетиленового трубопроводу чи рукава в зношений сталевий трубопровід.

У багатьох містах України велика частина трубопроводів газових і теплових мереж зношена на 60 – 90 %. Є багато ділянок трубопроводів, які відпрацювали свій ресурс у два, три рази і їх обсяг постійно зростає. Основними причинами аварій трубопроводів газових і теплових мереж є зовнішня і внутрішня корозія стінки труби, дефекти зварних з'єднань труб, неякісна ізоляція труб або її пошкодження, механічні пошкодження труб, заводські дефекти труб.

Все це призводить до втрати води з мереж тепло-, водопостачання, розмивання ґрунту під автодорогами і провалювання автомашин у виміті порожнини, фонтанів води в містах, затоплення міської інфраструктури гарячою водою, пошкодження будівель та автомашин, велика кількість будинків залишається взимку на певний час без опалення. Особливо небезпечними є витіки природного газу з газових мереж міст, які можуть призводити до вибухів і людських жертв.

Класифіковано методи безтраншейної реконструкції трубопроводів газових і теплових мереж, виділено можливості, особливості, діапазон технічних параметрів, переваги та недоліки кожного з них. Наведено чинники, які треба враховувати під час прийняття рішення про реконструкцію трубопроводів газових і теплових мереж безтраншейними технологіями. Зроблено висновки про придатність того чи іншого методу для реконструкції різних дефектних ділянок трубопроводів газових і теплових мереж.

Аналітично та CFD моделюванням визначено, що трубопроводи газових і теплових мереж можливо реконструювати протягуванням поршнем нового поліетиленового трубопроводу, нового рукава в зношений сталевий трубопровід, оскільки, для виконання таких операцій потрібний незначний тиск на виході компресора. Так, для реконструкції ділянки зношеного сталевого трубопроводу внутрішнім діаметром 49 мм довжиною 50 м протягуванням поршнем нового поліетиленового трубопроводу зовнішнім діаметром 40 мм потрібен тиск до 0,2 МПа, а для протягування поршнем на таку ж довжину рукава – 0,12 МПа.

Виведено залежності для розрахунку сил опору, які діють на рухому систему, та необхідного тиску на виході компресора, при якому поршень протягне новий поліетиленовий трубопровід чи рукав усією довжиною реконструйованого зношеного сталевого трубопроводу. Силами опору, які діють на рухому систему під час протягування поршнем поліетиленового трубопроводу на горизонтальних ділянках траси, є: сила механічного тертя манжет поршня до стінок сталевого трубопроводу; сила тертя поліетиленової труби до сталевій; сила тертя поліетиленової труби в кільцевих манжетах ущільнювальної системи. Під час протягування поршнем рукава силами опору є: сила механічного тертя манжет поршня до стінок сталевого трубопроводу; сила тертя поліетиленового рукава до сталевій труби; сила тертя ковзання осей барабана на якому намотаний рукав.

CFD модель базувалась на розв'язанні рівнянь Нав'є-Стокса і нерозривності потоку, замкнених двопараметричною моделлю турбулентності Лаундера-Шарма з застосуванням пристінної функції, з відповідними початковими і граничними умовами. Моделювання було виконано з врахуванням різної шорсткості стінки

сталевому та поліетиленовому трубопроводу. Рух поршня та протягнутого ним поліетиленового трубопроводу моделювався з застосуванням динамічної сітки.

Результати CFD моделювання були візуалізовані в постпроцесорі програмного комплексу ANSYS Fluent R19.1 Academic побудовою ліній течії, векторів швидкості, полів тиску на контурах і в повздовжньому перерізі міжтрубного та запоршневого простору. Виявлено місця сповільнення та пришвидшення потоку повітря, падіння та зростання тиску. Визначено залежність втрат тиску в зношеному сталевому трубопроводі від довжини протягнутої ним ділянки поліетиленового трубопроводу чи рукава. Так, якщо поршнем протягнуто п'ятдесят метрів поліетиленового трубопроводу зовнішнім діаметром 40 мм втрати тиску в міжтрубному просторі складають 33560 Па, а якщо зовнішній діаметр поліетиленового трубопроводу 32 мм то втрати тиску в міжтрубному просторі складають 16300 Па. Якщо поршнем протягнуто п'ятдесят метрів рукава втрати тиску у зношеному сталевому трубопроводі складають 6231 Па.

Визначено закономірності зміни тиску на виході компресора залежно від довжини протягнутої поршнем ділянки поліетиленового трубопроводу чи рукава зношеним сталевим трубопроводом.

Розроблено і побудовано експериментальний стенд для визначення сил опору, які діють на рухому систему під час безтраншейної реконструкції трубопроводів газових і теплових мереж протягуванням поршнем нової ділянки поліетиленового трубопроводу зношеним сталевим. Експериментально визначено, що сила тертя манжет поршня до стінок зношеного сталевому 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 сталевий є мізерна і знаходиться в межах від 1 Н до 2 Н, а, отже, протягуванням поршнем поліетиленового трубопроводу можна реконструювати протяжні ділянки трубопроводів газових і теплових мереж. Експериментальні значення сил опору, які діють на рухому систему під час протягування поршнем нового поліетиленового трубопроводу в

зношений сталевий, є наближено рівні розрахунковим, що підтвердило достовірність виведених теоретично залежностей.

Розроблено і побудовано експериментальну установку для дослідження динаміки протягування поршнем нового поліетиленового трубопроводу в зношений сталевий. На базі експериментальних випробувань встановлено, що протягування поршнем нового поліетиленового трубопроводу зношеним сталевим є можливим і технологічним і може застосовуватись для реконструкції трубопроводів газових і теплових мереж, а час підготовки обладнання до виконання робіт складає 1 – 2 хв.

Для поліетиленової труби зовнішнім діаметром 32 мм та довжиною 4 м при об'ємній витраті повітря  $0,005 \text{ м}^3/\text{с}$  час протягування склав 2,1 с. Тиск після відкриття крана до початку протягування збільшився до 0,087 МПа, що обумовлено силою тертя спокою. Після початку протягування тиск зменшився до 0,074 МПа. Далі відбувалось незначне коливання тиску з його збільшенням до 0,075 МПа. У момент вильоту поліетиленової труби з кільцевих гумових манжет ущільнювальної системи відбулось різке падіння тиску до нуля. Достовірність теоретично виведених залежностей підтвердила рівність експериментально визначеного тиску на виході компресора і розрахованого.

Експериментально досліджено залежність середньої швидкості протягування від об'ємної витрати повітря, зовнішнього діаметра протягнутого поліетиленового трубопроводу та геометричного нахилу сталевого зношеного трубопроводу до горизонту. Такі дослідження виконувались методом математичного планування експерименту. На базі визначення значимості коефіцієнтів рівняння регресії встановлено, що основним чинником, який чинить найбільший вплив на швидкість протягування є об'ємна витрата повітря.

Експериментально визначено, що швидкість протягування поршнем поліетиленової труби зношеною сталевую на початку протягування різко зростає. Після такого різкого зростання на початку протягування відбувається незначне її збільшення. Так, при об'ємній витраті повітря  $0,005 \text{ м}^3/\text{с}$  середня швидкість протягування поліетиленової труби зовнішнім діаметром 32 мм складає 2,1 м/с, а

зовнішнім діаметром 40 мм – 1,7 м/с, що є надзвичайно великою швидкістю і її неможливо досягнути жодним з існуючих методів безтраншейної реконструкції трубопроводів газових і теплових мереж.

Розрахований необхідний тиск на виході компресора, щоб поршень з прикріпленим до нього поліетиленовим трубопроводом зовнішнім діаметром 32 мм рухався склав 0,071 МПа і він є наближено рівний експериментально визначеному 0,075 МПа, що підтвердило достовірність теоретичних досліджень.

Розроблено техніку та технологію безтраншейної реконструкції трубопроводів газових і теплових мереж протягуванням поршнем в зношений сталевий трубопровід нового поліетиленового трубопроводу – “Тяговий поршень<sup>®</sup>” та нового рукава – “Тяговий поршень<sup>®</sup>”. Особливістю технології “Тяговий поршень<sup>®</sup>” є герметизування простору між новим поліетиленовим трубопроводом та зношеним сталевим розробленою ущільнювальною системою. Завдяки цьому стиснуте повітря не виходить з міжтрубного простору, а тисне на поршень, який в свою чергу протягує новий поліетиленовий трубопровід зношеним сталевим.

Особливістю технології “Тяговий поршень<sup>®</sup>” є те, що барабан з намотаним рукавом поміщається в приєднану до зношеного сталевого трубопроводу герметичну циліндричну камеру. При цьому попередньо у зношений сталевий трубопровід запасовують поршень і до нього кріплять рукав. Тоді подають компресором повітря у запоршневий простір і поршень протягує рукав зношеним сталевим трубопроводом.

Новизна роботи полягає в наступному. Вперше встановлено закономірності впливу сил опору, які діють на рухоми систему, під час протягування поршнем нового поліетиленового трубопроводу чи рукава зношеним сталевим трубопроводом на тиск у запоршневому просторі.

Отримано залежності величини падіння тиску в міжтрубному просторі від довжини протягнутої поршнем ділянки нового поліетиленового трубопроводу чи

рукава зношеним сталевим трубопроводом, що дало змогу визначити тиск на виході компресора.

Вперше встановлено закономірності зміни тиску на виході компресора під час безтраншейної реконструкції трубопроводів газових і теплових мереж протягування поршнем нового поліетиленового трубопроводу чи рукава, що дає можливість підібрати обладнання та матеріали для виконання робіт.

Експериментально досліджено закономірності зміни швидкості протягування поршнем поліетиленового трубопроводу зношеним сталевим залежно від об'ємної витрати повітря, діаметра та довжини поліетиленового трубопроводу, що дає змогу керувати процесом протягування.

Практичним значенням розроблених технологій безтраншейної реконструкції трубопроводів газових і теплових мереж протягуванням поршнем у зношений сталевий трубопровід нового поліетиленового трубопроводу – “Тяговий поршень<sup>Ⓣ</sup>”, нового рукава – “Тяговий поршень<sup>Ⓟ</sup>” є швидке протягування нового поліетиленового трубопроводу, рукава в зношений сталевий трубопровід. При цьому спрощується процес протягування, мінімізуються обсяги підготовчих робіт, полегшується виконання робіт в ускладнених умовах, зменшуються витрати на реконструкцію та час робочого процесу. Перед виконанням реконструкції не треба розробляти приймальний котлован, що не завжди можливо до і під час виконання робіт.

Розроблені технології безтраншейної реконструкції трубопроводів газових і теплових мереж – “Тяговий поршень<sup>Ⓣ</sup>” і “Тяговий поршень<sup>Ⓟ</sup>” промислово апробовані та впроваджені у СП “Київські теплові мережі” КП “Київтеплоенерго” РТМ “Печерськ”.

*Ключові слова:* CFD моделювання, витрата повітря, втрати тиску, динамічна сітка, лінії течії, поліетиленова труба, протягування, рівняння Нав'є-Стокса, рукав, сила тертя, тягове зусилля, ущільнювальна система, швидкість протягування.

## ANNOTATION

K. Poliarush. Engineering and technology development of trenchless reconstruction of gas and heat pipelines. – Qualified scientific work on the rights of the manuscript.

The dissertation on reception of a scientific degree of the Candidate of Technical Sciences (PhD) in the specialty 05.15.13 – Pipeline transportation, oil and gas storages (18 – Production and technologies). – Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ministry of Education and Science of Ukraine, Ivano-Frankivsk, 2019.

The dissertation is devoted to the complex study of trenchless reconstruction of gas and heat pipelines methods. Theoretical and experimental study of the plunging process of a new polyethylene pipeline or a new hose with a worn steel pipeline. Development of engineering and technology of gas and heat pipelines trenchless reconstruction by plunging a new polyethylene pipeline or hose into the worn steel pipeline.

Based on the analysis of the current technical state of gas and heat pipelines in Ukraine, it is established that in many cities most of the gas and heat pipelines are worn out by 60 – 90 %. There are many sections of pipelines that have used their resources two, three times and their volume is constantly increasing. The main causes of gas and heat network pipeline crashes are external and internal corrosion of the pipe wall, defects in welded pipe joints, poor pipe insulation or damage, mechanical pipe damage, factory pipe defects.

These reasons lead to the loss of water from the net of heating, water supply, erosion of soil under the road leads to falling of cars in the washed cavity, water fountains in cities, flooding urban infrastructure with hot water, damage of buildings and cars, a large number of houses remain with no heating in winter. Natural gas leaks from urban gas networks are extremely dangerous, it can lead to explosions and human victims.



The methods of trenchless reconstruction of gas and heat pipelines are classified, there are possibilities, features, ranges of technical parameters, advantages and disadvantages, all of them are highlighted. There are existing factors that should be taken into consideration the time to take decision on the reconstruction of gas and heat pipelines by trenchless technologies. The conclusions are made about the applicability of one or another method for the reconstruction of various defective sections of gas and heat pipelines.

With a help of analysis and CFD simulations it was established that gas and heat pipelines can be reconstructed by extending a pig of a new polyethylene pipeline, with a new hose into a worn steel pipeline, since it requires little pressure at the edge of the compressor to perform such operations. Thus, for the section reconstruction of a worn steel pipeline with an internal diameter of 49 mm, length 50 m, a pig of a new polyethylene pipeline with an external diameter of 40 mm requires a pressure of up to 0.2 MPa, and for the extension of the pig to the same hose length – 0.12 MPa.

For the calculation of the resistance forces the dependencies are deduced, they are acting on the moving system and the required pressure at the of the compressor, at which the pig extends a new polyethylene pipeline or a hose over the entire length of the reconstructed worn steel pipeline. The resistance forces acting on the moving system while extending the pig of the polyethylene pipeline on the horizontal sections of the track are: the force of mechanical friction of the pig cuffs to the walls of the steel pipeline; force of friction of polyethylene pipe to steel; force of friction of a polyethylene pipe in the ring cuffs of the sealing system. When pulling the pig hoses the forces of resistance are: the force of mechanical friction of the pig cuffs to the walls of the steel pipeline; force of friction of a polyethylene hose to a steel pipe; the friction force of the axes of the drum on which the hose is wound.

The CFD model was based on the solution of the Navier-Stokes equations and the continuity of the flow, closed by a two-parameter Lunder-Sharm turbulence model using a wall function, with appropriate initial and boundary conditions. The simulation was performed taking into consideration the different roughness of the steel and

polyethylene pipeline wall. The motion of the pig and its extending polyethylene pipeline was modeled using a dynamic mesh.

The results of the CFD simulation were visualized in the postprocessor software package ANSYS Fluent R19.1 Academic by constructing flow lines, velocity vectors, pressure fields on the contours and in the longitudinal section of the tubular and posterior space. Slow motion and acceleration of air flow, pressure drop and increase were detected. The dependence of the pressure loss is established in the worn steel pipeline on the length of the stretched section of the polyethylene pipeline or hose. Thus, if the pig is extended fifty meters of the polyethylene pipeline with an outside diameter of 40 mm, the pressure loss in the pipe is 33560 Pa, and if the outer diameter of the plastic pipe is 32 mm, then the pressure loss in the pipe pipe is 16300 Pa. If the pig is extended fifty meters, the pressure loss in the worn steel pipeline is 6231 Pa.

There are determined regularities of the pressure change at the edge of the compressor by the pig section length of the polyethylene pipeline or the hose with a worn steel pipeline.

An experimental stand has been developed and constructed for durable resistance acting on a moving system while non-reactor reconstruction of gas and thermal pipelines extending the portion of a new section of the polyethylene pipeline that was supplied. It has been established experimentally that the friction force of the pig cuffs against the wall of the manufactured old pipeline and the friction force of the polyethylene pipe in the used cuffs are unknown and do not have a significant state in the expansion process. The friction force of one meter of the polyethylene pipe to the steel pipe is negligible and is in the range of 1 N to 2 H, and, therefore, by extension of the pig of the polyethylene pipeline it is possible to reconstruct the long sections of gas and heat pipelines. The experimental values of the resistance forces acting on the moving system while pulling the pig of a new polyethylene pipeline into worn steel are approximately equal to the calculated values, which confirmed the reliability of the theoretically derived dependencies.

An experimental unit was developed and constructed to investigate the dynamics of plunging a new polyethylene pipeline into a worn steel one. On the basis of

experimental tests it is established that the extension of the pig of a new polyethylene pipeline with worn steel is technologically possible and can be used for the reconstruction of pipelines of gas and heat networks, and the preparation time of the equipment for the work is 1 – 2 minutes.

For a polyethylene pipe with an outside diameter of 32 mm and a length of 4 m at a flow rate of air of 0.005 m<sup>3</sup>/s, the drawing time was 2.1 s. The pressure after opening the crane before the start of the stretching increased to 0.087 MPa due to the force of friction. After the start of the stretching, the pressure decreased to 0.074 MPa. Then there was a slight fluctuation in pressure with its increase to 0.075 MPa. At the time of departure of the polyethylene pipe from the annular rubber cuffs of the sealing system, there was a sharp drop in pressure to zero. The reliability of theoretically derived dependencies confirmed the equality of the experimentally determined pressure and the calculated one at the compressor edge.

The dependence of the average drawing speed was experimentally investigated on the volume flow rate, the outer diameter of the extended polyethylene pipeline and the geometric inclination of the steel worn pipeline to the horizon. These studies were performed by the method of mathematical planning of the experiment. On the basis of determining the significance of the regression equation coefficients, it is established that the main factor with the greatest influence on the speed of the draw is the volume air flow.

It has been experimentally found that the speed of pulling on a pig of a plastic pipe with worn steel increases sharply at the beginning of the stretching. After such a sharp increase at the beginning of the stretch, it increases slightly. Thus, at a volume flow rate of 0.005 m<sup>3</sup>/s, the average velocity of the polyethylene pipe being drawn with an outer diameter of 32 mm is 2.1 m/s, and an outer diameter of 40 mm is 1.7 m/s, which is extremely high and impossible to achieve none of the existing methods of trenchless reconstruction of gas and heat pipelines.

The required pressure at the edge of the compressor is calculated the way the pig with the plastic pipe attached to it with an outer diameter of 32 mm moves was

0.071 MPa and it is approximately equal to the experimentally determined 0.075 MPa, which confirmed the validity of theoretical studies.

The technique and technology of trenchless reconstruction of gas and heat pipelines is developed by extending the pig into the worn steel pipeline of a new polyethylene pipeline – "Pulling pig<sup>P</sup>" and a new hose – "Pulling pig<sup>H</sup>". A feature of the "Pulling pig<sup>P</sup>" technology is the sealing of the space between the new polyethylene pipeline and the worn steel developed sealing system. Due to this, the compressed air does not come out of the pipe, but presses on the pig, which in turn extends the new plastic pipeline with worn steel.

The peculiarity of the "Pulling pig<sup>H</sup>" technology is that the reel with a hose is inserted into a sealed cylindrical chamber connected to the worn steel pipeline. At the same time, the pig is stored in the worn steel pipeline and the hose is attached to it. The air compressor is then fed into the vapor space and the pig extends the hose with a worn steel pipeline.

The originality of the work is in the following. For the first time, the resistance forces acting on the moving system as the pig is pulled over by a new polyethylene pipeline or a hose with a worn steel pipeline have been identified to determine the required pressure in the backlog space.

For the first time, the dependence of the pressure drop in the annulus was determined by the length of the pig section of the new polyethylene pipeline or the hose with a worn steel pipeline, which made it possible to determine the pressure at the outlet of the compressor.

For the first time, there are regularities of pressure change at the outlet of the compressor during the trenchless reconstruction of gas and heat pipelines, by pulling the pig of a new polyethylene pipeline or hose providing a possibility to select the equipment to perform the work.

For the first time, the laws of change in the velocity of the pig stroke of a polyethylene pipeline are used to control the process of stretching, in dependence on the volume flow rate, diameter and length of the polyethylene pipeline.

The practical developed technology value of trenchless reconstruction of gas and heat pipelines by pulling the pig into the worn steel pipeline of a new polyethylene pipeline – "Pulling pig<sup>P</sup>", the new hose – "Pulling pig<sup>H</sup>" is the rapid extension of a new polyethylene pipeline, the hose into the worn pipeline. This simplifies the process of stretching, minimizes the amount of preparatory work, facilitates the execution of work in difficult conditions, reduces the cost of reconstruction and time of the work process. It is not necessary to develop a ditch before reconstruction, which is not always possible before and during the works.

The technologies of trenchless reconstruction of gas and heat pipelines – "Pulling pig<sup>P</sup>" and "Pulling pig<sup>H</sup>" have been industrially tested and implemented in the SP "Kyiv Heating Network" of KP "Kyivteploenergo" RTM "Pechersk".

*Key words:* air flow, CFD modeling, dynamic mesh, flow lines, friction force, hose, Navier-Stokes equation, pressure loss, polyethylene pipe, pulling, pulling speed, sealing system, traction.

#### *Список публікацій здобувача*

1. Development of trenchless technology of reconstruction of “Pulling pig P” pipeline communications / Ya. Doroshenko, V. Zapukhliak, K. Poliarush [and oth.] // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. Vol. 2, No. 1 (98). P. 28–38. ISSN(e) 1729–4061 (**індексується в Scopus, Index Copernicus International**). (Особистий внесок – приймав участь у розробленні технології безтраншейної реконструкції трубопроводних комунікацій “Pulling pig P”, проведенні експериментальних досліджень. Виконав аналітичні дослідження та CFD моделювання процесу протягування поршнем нового поліетиленового трубопроводу зношеним сталевим. Приймав участь у підготовці статті).

2. Розробка способу очистки шлейфів свердловин / П. В. Горін, К. А. Поляруш, Д. Ф. Тимків [та ін.] // *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*. 2018. № 6(247). С. 213–222. (**індексується в Index Copernicus International**). (Особистий внесок – приймав участь у моделюванні руху пружно-полімерного поршня модельним трубопроводом,

дослідженні ефективності очищення внутрішньої порожнини газопроводу таким поршнем. Приймав участь у підготовці статті).

3. Поляруш К. А. Дослідження газодинамічних процесів у трубопровідних комунікаціях під час їх безтраншейної реконструкції технологією “Тяговий поршень<sup>Ⓣ</sup>”. *Нафтогазова енергетика*. 2019. № 1(31). С. 43–53. **(наукове фахове видання України)**.

4. Сучасні технології безтраншейного ремонту теплогазових мереж / К. А. Поляруш, Я. В. Дорошенко, С. І. Тихонов, А. Р. Бабій // *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2016. № 1(58). С. 41–51. **(наукове фахове видання України)**. (Особистий внесок – встановив основні причини аварій теплогазових мереж. Виконав аналіз існуючих у світі методів безтраншейної реконструкції трубопроводів газових і теплових мереж. Виділив можливості, особливості, діапазон технічних параметрів, переваги та недоліки кожного з них. Приймав участь у підготовці статті).

5. Дорошенко Я. В., Поляруш К. А., Запхляк В. Б. Розроблення технології безтраншейної реконструкції трубопровідних комунікацій очисним поршнем. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2018. № 3(68). С. 12–19. **(наукове фахове видання України)**. (Особистий внесок – обґрунтував доцільність реконструкції трубопровідних комунікацій українських міст безтраншейними технологіями. Приймав участь у розробленні технології безтраншейної реконструкції трубопровідних комунікацій очисним поршнем. Виконав дослідження динаміки протягування поршнем нового поліетиленового трубопроводу зношеним сталевим. Приймав участь у підготовці статті).

6. Дорошенко Я. В., Поляруш К. А., Запхляк В. Б. Експериментальні дослідження динаміки безтраншейної реконструкції трубопровідних комунікацій технологією “Тяговий поршень<sup>Ⓣ</sup>”. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2019. № 1(70). С. 25–32. **(наукове фахове видання України)**. (Особистий внесок – Приймав участь у розробленні, виготовленні експериментальної установки, виконанні експериментальних досліджень.

Виконав планування експериментальних досліджень, обробив та виконав аналіз одержаних результатів. Приймав участь у підготовці статті).

7. The study of the stress-strain state of trunk gas pipeline sections with defects in the shape of the cross-section of the pipe / Ya. V. Doroshenko, L. D. Pylypiv, K. A. Poliarush, Yu. I. Doroshenko // *Journal of Hydrocarbon Power Engineering*. 2017. Vol. 4, Issue 2. P. 68–80. (**наукове фахове видання України**). (Особистий внесок – виконав дослідження дефектів форми поперечного перерізу труби, їх 3D моделювання, CFD моделювання руху газу ділянками газопроводу в місці таких дефектів. Приймав участь у підготовці статті).

8. Тихонов С. І., Дорошенко Я. В., Поляруш К. А. Технології внутрішньотрубного обстеження та ремонту важкодоступних ділянок газонафтопроводів. *Науковий вісник*. 2015. № 1(38). С. 83–94. (**наукове фахове видання України**). (Особистий внесок – класифікував та виконав аналіз існуючих методів внутрішньотрубного ремонту важкодоступних ділянок газонафтопроводів. Приймав участь у підготовці статті).

9. Пристрій для безтраншейної реконструкції трубопровідних комунікацій: пат. 129088 Україна: МПК F16L1/028. № u 201802905 ; заявл. 22.03.2018 ; опубл. 25.10.2018, Бюл. № 20. 3 с. (**патент на корисну модель**). (Особистий внесок – приймав участь у патентному пошуку, оформленні патенту, розробив ущільнювальну систему пристрою).

10. Пристрій для санації трубопроводів рукавом : пат. 134600 Україна : МПК F16L1/028. № u 201812689 ; заявл. 20.12.2018 ; опубл. 27.05.2019, Бюл. № 10. 3 с. (**патент на корисну модель**). (Особистий внесок – приймав участь у патентному пошуку, оформленні патенту, запропонував ідею намотувати рукав на барабан і розміщувати в герметичній камері пристрою).

11. Дорошенко Я. В. Поляруш К. А. Розроблення технології безтраншейної реконструкції трубопровідних комунікацій “Тяговий поршень<sup>®</sup>”. *Science progress in European countries: new concepts and modern solutions* : proceedings of the 6<sup>th</sup> International Scientific Conference, с. Stuttgart, 19 april 2019 у. Stuttgart, 2019. P. 139–151. ISBN 978-3-944375-22-9.

12. Поляруш К. А. Дослідження динаміки безтраншейної реконструкції трубопроводних комунікацій технологією “Тяговий поршень”. *Тридцята наукова сесія наукового товариства ім. Шевченка* : матеріали сесії, м. Івано-Франківськ, 28 лютого – 21 березня 2019 р. Івано-Франківськ, 2019. С. 22.

13. Дорошенко Я. В., Поляруш К. А. Метод безтраншейного релейнінгу теплогазових мереж. *Нафтогазова енергетика-2017* : тези доповідей 6-тої Міжнародної науково-технічної конференції, м. Івано-Франківськ, 15–19 травня 2017 р. Івано-Франківськ, 2017. С. 196–197.

14. Поляруш К. А. Розроблення технологій безтраншейної реконструкції теплогазових мереж. *Нафтогазова енергетика* : матеріали Міжнародної науково-технічної конференції, м. Івано-Франківськ, 27–31 травня 2019 р. Івано-Франківськ, 2019. С. 13.

15. Поляруш К. А. Новітні технології безтраншейної реконструкції трубопроводних комунікацій. *Проблеми та перспективи розвитку сучасної науки* : збірник тез Міжнародної науково-практичної конференції молодих науковців, аспірантів і здобувачів вищої освіти, м. Рівне, 10 травня 2019 р. Рівне: НУВГП. 2019. С. 60–62.



## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	19
ВСТУП	20
РОЗДІЛ 1 ОЦІНКА ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ТРУБОПРОВОДІВ ГАЗОВИХ І ТЕПЛОВИХ МЕРЕЖ ТА ВИБІР НАПРЯМКІВ ЙОГО ПОКРАЩЕННЯ	27
1.1 Оцінка сучасного технічного стану трубопроводів газових і теплових мереж України	27
1.2 Аналіз причин та наслідків аварій трубопроводів газових і теплових мереж	32
1.3 Аналіз методів безтраншейної реконструкції трубопроводів газових і теплових мереж	36
1.4 Постановка задач та конкретизація мети досліджень	48
РОЗДІЛ 2 ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ПРОТЯГУВАННЯ ПОРШНЕМ НОВОГО ПОЛІЕТИЛЕНОВОГО ТРУБОПРОВОДУ ТА РУКАВА В ЗНОШЕНИЙ СТАЛЕВИЙ ТРУБОПРОВІД	51
2.1 Дослідження процесу протягуванням поршнем нового поліетиленового трубопроводу в зношений сталевий	51
2.2 Дослідження газодинамічних процесів у трубопроводі під час його безтраншейної реконструкції протягуванням поршнем нового поліетиленового трубопроводу в зношений сталевий	59
2.3 Дослідження процесу протягуванням поршнем рукава в зношений сталевий трубопровід	78
2.4 Дослідження газодинамічних процесів у трубопроводі під час його безтраншейної реконструкції протягуванням поршнем рукава в зношений сталевий трубопровід	81
Висновки до розділу 2	91

РОЗДІЛ 3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ПРОТЯГУВАННЯ ПОРШНЕМ НОВОГО ПОЛІЕТИЛЕНОВОГО ТРУБОПРОВОДУ ЗНОШЕНИМ СТАЛЕВИМ	93
3.1 Задачі експериментальних досліджень	93
3.2 Експериментальне визначення сил опору	94
3.3 Експериментальні дослідження динаміки протягування поршнем нового поліетиленового трубопроводу в зношений сталевий	101
Висновки до розділу 3	126
РОЗДІЛ 4 РОЗРОБЛЕННЯ ТЕХНІКИ ТА ТЕХНОЛОГІЇ БЕЗТРАНШЕЙНОЇ РЕКОНСТРУКЦІЇ ТРУБОПРОВОДІВ ГАЗОВИХ І ТЕПЛОВИХ МЕРЕЖ “ТЯГОВИЙ ПОРШЕНЬ <sup>Ⓣ</sup> ” ТА “ТЯГОВИЙ ПОРШЕНЬ <sup>Ⓟ</sup> ”	129
4.1 Розроблення техніки та технології безтраншейної реконструкції трубопроводів газових і теплових мереж – “Тяговий поршень <sup>Ⓣ</sup> ”	129
4.2 Розроблення техніки та технології безтраншейної реконструкції трубопроводів газових і теплових мереж – “Тяговий поршень <sup>Ⓟ</sup> ”	134
4.3 Промислова апробація та впровадження результатів дисертаційної роботи	137
Висновки до розділу 4	139
ВИСНОВКИ	140
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	142
ДОДАТОК А СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ	154
ДОДАТОК Б АКТ ТА ДОВІДКА ПРО ВПРОВАДЖЕННЯ	159
ДОДАТОК В РОЗРАХУНОК ЕКОНОМІЧНОГО ЕФЕКТУ	161

**ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ**

Ⓣ – трубопровід;

Ⓟ – рукав;

CFD – computational fluid dynamics;

ЦТ – централізоване теплопостачання.

## ВСТУП

**Обґрунтування вибору теми дослідження.** Великі обсяги будівництва сталевих трубопровідних комунікацій міст (мереж газо-, тепло-, водопостачання) у середині та кінці минулого століття зумовили значні труднощі в підтримуванні їх у належному технічному стані сьогодні, коли в багатьох містах велика частина трубопровідних комунікацій зношена на 60 – 90 %. Є багато ділянок трубопроводів, які відпрацювали свій ресурс у 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 теплопостачання є фонтани гарячої води в містах, затоплення міської інфраструктури гарячою водою, пошкодження будівель та автомашин. У результаті таких аварій велика кількість будинків залишається взимку на певний час без опалення. Особливо небезпечними є витoki природного газу з газових мереж міст, які можуть призводити до вибухів і великих людських жертв. Фактично старі комунікації міст є постійною загрозою життю і здоров'ю мешканцям міст. Другим негативним моментом є щорічні великі матеріальні втрати, які з року в рік збільшуються через аварійний стан підземних інженерних комунікацій. За офіційними статистичними даними витoki та не зафіксовані витрати води з систем теплопостачання складають близько 15 – 20 % від усієї подачі води в рік, а в ряді міст втрати сягають 30 – 40 %.

Локальний ремонт зношених трубопровідних комунікації є марною тратою часу і коштів. Проблема масштабної реконструкції трубопроводів газових і теплових мереж в багатьох великих містах, де трубопровідні комунікації широко розгалужені, вже давно перезріла. Зараз існує, а у найближче десятиліття збережеться високий потенціал зростання капіталовкладень, інвестицій в реконструкцію і ремонт трубопровідних мереж міст. XXI століття буде сторіччям заміни всіх інженерних комунікацій, побудованих у XX столітті.

Уникнути ці складнощі та додаткові витрати пов'язані з відновлювальними роботами, пришвидшити роботи можна безтраншейними технологіями, які є найефективнішими та найрентабельнішим.

Державні будівельні норми ДБН В.2.5-41 [1] допускають застосування в Україні безтраншейних технологій реконструкції сталевих трубопроводів газових мереж протягуванням в них поліетиленових труб.

На сьогодні розроблено цілий ряд методів безтраншейної реконструкції трубопроводів газових і теплових мереж [2, 3]. Однак немає одного універсального, яким можна було б реконструювати усі трубопровідні 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” [4] є зменшення пропускної здатності трубопроводу [5]. Щоб мінімізувати таке зменшення протягування виконують з руйнуванням дефектного сталевого трубопроводу [6–8], застосовують методи “Swagelining” та “С-лайнер” [8, 9], протягують чи вивертають рукав [10, 11]. 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 [12, 13], у зношений сталевий трубопровід. Такі труби можуть експлуатуватись під високим тиском (до 20 МПа), а тому їх все ширше застосовують для найпростішого методу реконструкції трубопровідних 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 чи рукава в зношений сталевий трубопровід виконують лебідками,

гідродомкратними установками, статичною установкою Grundoburst, тракторами, бульдозерами та іншою колісною технікою [3, 5]. 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.

Усі ці, а також цілий ряд інших причин обумовлюють особливу актуальність застосування, удосконалення, розроблення нових безтраншейних технологій реконструкції трубопроводів газових і теплових мереж. Бум безтраншейних технологій реконструкції трубопроводних комунікацій в Україні є неминучим, а масштабне застосування цих технологій є потребою сьогодення.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, роботами.** Дисертаційне дослідження виконувалось у межах плану держбюджетної науково-дослідної програми ІФНТУНГ і є фрагментом комплексної науково-дослідної роботи “Вдосконалення технологічних процесів проектування, спорудження та експлуатації газонафтопроводів і газонафтосховищ з врахуванням вимог енергоефективності” (держбюджетна науково-дослідна робота ІФНТУНГ 2018 – 2021 роки, номер державної реєстрації 0118U007132). Також дисертаційна робота виконана у відповідності з планом науково-дослідної роботи № НДІ-126/20n-19 ДП “Науканафтогаз” “Розроблення національного стандарту з проектування, будівництва, контролю якості та приймання робіт для газопроводів з гнучких композитних труб”.

**Мета і завдання дослідження.** Метою дисертаційної роботи є розроблення теоретичних основ та технічних засобів безтраншейної реконструкції зношених сталевих трубопроводів газових і теплових мереж протягуванням у них поршнем нового поліетиленового трубопроводу чи рукава.

**Завдання дисертаційної роботи:**

– аналітично дослідити динаміку процесу протягування поршнем нового поліетиленового трубопроводу чи рукава зношеним сталевим трубопроводом;

– дослідити газодинамічні процеси у внутрішній порожнині сталевого трубопроводу під час його безтраншейної реконструкції протягуванням поршнем поліетиленового трубопроводу чи рукава;

– експериментально дослідити процес протягування поршнем поліетиленової труби зношеною сталевую;

– розробити та промислово апробувати ефективну техніку та технологію безтраншейної реконструкції трубопроводів газових і теплових мереж протягуванням поршнем:

а) нового поліетиленового трубопроводу в зношений сталевий – “Тяговий поршень<sup>Ⓟ</sup>”;

б) нового поліетиленового рукава в зношений сталевий трубопровід – “Тяговий поршень<sup>Ⓟ</sup>”.

**Об’єкт дослідження** – технологічний процес безтраншейної реконструкції трубопроводів газових і теплових мереж протягуванням поршнем нового поліетиленового трубопроводу чи рукава в зношений сталевий трубопровід.

**Предмет дослідження** – технологічні та газодинамічні параметри реконструкції трубопроводів газових і теплових мереж протягуванням поршнем нового поліетиленового трубопроводу чи рукава в зношений сталевий трубопровід.

**Методи дослідження.** Аналітичні дослідження динаміки протягування поршнем поліетиленового трубопроводу чи рукава в зношений сталевий трубопровід виконано методами математичного моделювання. Дослідження газодинамічних процесів у внутрішній порожнині сталевого трубопроводу під час його безтраншейної реконструкції поршнем виконано методом кінцевих об’ємів (CFD моделювання). Експериментальні дослідження виконувались з застосуванням методів планування експерименту та математичної статистики. Основні висновки роботи узгоджуються з відповідними даними теоретичних та експериментальних досліджень.

CFD моделювання було виконано в програмному комплексі ANSYS Fluent R19.1 Academic, обробка результатів теоретичних та експериментальних досліджень у програмі Microsoft Excel.

**Наукова новизна одержаних результатів:**

– вперше встановлено закономірності впливу сил опору, які діють на рухоми систему, під час протягування поршнем нового поліетиленового трубопроводу чи рукава зношеним сталевим трубопроводом на тиск у запоршневому просторі;

– отримано залежності величини падіння тиску в міжтрубному просторі від довжини протягнутої поршнем ділянки нового поліетиленового трубопроводу чи рукава зношеним сталевим трубопроводом, що дало змогу визначити тиск на виході компресора;

– вперше встановлено закономірності зміни тиску на виході компресора під час безтраншейної реконструкції трубопроводів газових і теплових мереж протягування поршнем нового поліетиленового трубопроводу чи рукава, що дає можливість підібрати обладнання та матеріали для виконання робіт;

– експериментально досліджено закономірності зміни швидкості протягування поршнем поліетиленового трубопроводу зношеним сталевим залежно від об'ємної витрати повітря, діаметра та довжини поліетиленового трубопроводу, що дає змогу керувати процесом протягування.

**Практичне значення одержаних результатів.** Проведені в дисертаційній роботі теоретичні та експериментальні дослідження дали змогу розробити техніку та технологію безтраншейної реконструкції трубопроводів газових і теплових мереж протягуванням поршнем у зношений сталевий трубопровід нового поліетиленового трубопроводу – “Тяговий поршень<sup>®</sup>” та нового рукава – “Тяговий поршень<sup>®</sup>”. Ці технології дадуть змогу швидко протягувати новий поліетиленовий трубопровід чи рукав у зношений сталевий трубопровід. При цьому спрощується процес протягування, мінімізуються обсяги підготовчих робіт, полегшується виконання робіт в ускладнених умовах, зменшуються витрати на реконструкцію та час робочого процесу. Перед виконанням реконструкції не треба розробляти приймальний котлован, що не завжди можливо до і під час виконання робіт.



Розроблені технології безтраншейної реконструкції трубопроводів газових і теплових мереж – “Тяговий поршень<sup>®</sup>” і “Тяговий поршень<sup>®</sup>” промислово апробовані та впроваджені у СП “Київські теплові мережі” КП “Київтеплоенерго” РТМ “Печерськ”.

### **Особистий внесок здобувача.**

Безпосередньо автором здійснено:

- визначення основних причини аварій трубопроводів газових і теплових мереж. Виконано аналіз існуючих у світі методів безтраншейної реконструкції трубопроводів газових і теплових мереж. Виділено можливості, особливості, діапазон технічних параметрів, переваги та недоліки кожного з них [14–16];
- аналітичні дослідження протягування поршнем нового поліетиленового трубопроводу чи рукава зношеним сталевим трубопроводом [17–20];
- теоретичні дослідження газодинамічних процесів у внутрішній порожнині сталевих трубопроводу під час руху в ньому поршня, протягування поршнем нового поліетиленового трубопроводу чи рукава зношеним сталевим трубопроводом [17, 19, 21, 22];
- розроблення, спорудження експериментальної установки та виготовлення тягового поршня, проведення експериментальних досліджень. Планування, обробка та аналіз одержаних результатів [17, 23];
- розроблення нової техніки та технології безтраншейної реконструкції трубопроводів газових і теплових мереж протягуванням поршнем у зношений сталевий трубопровід нового поліетиленового трубопроводу чи рукава [17, 18, 24–29].

Постановка задач, аналіз і обговорення результатів досліджень проведено спільно з науковим керівником. Автор брав безпосередню участь у промисловій апробації та впровадженні розроблених технологій безтраншейної реконструкції трубопроводів газових і теплових мереж у виробництво.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення роботи викладено та обговорено на наукових конференціях різного рівня: 6 Міжнародній науково-технічній конференції “Нафтогазова енергетика–2017” (м. Івано-Франківськ, 15–

19 травня 2017 р.), 29 Науковій сесії наукового товариства ім. Шевченка (м. Львів, 31 березня 2018 р.), 30 Науковій сесії наукового товариства ім. Шевченка (м. Івано-Франківськ, 28 лютого – 21 березня 2019 р.), 6 Міжнародній науковій конференції “Науковий прогрес у європейських країнах: нові концепції та сучасні рішення” (м. Штутгарт, 19 квітня 2019 р.), Міжнародній науково-практичній конференції молодих науковців, аспірантів і здобувачів вищої освіти “Проблеми та перспективи розвитку сучасної науки” (м. Рівне, 10 травня 2019 р.), Міжнародній науково-технічній конференції “Нафтогазова енергетика” (м. Івано-Франківськ, 27–31 травня 2019 р.).

Результати дисертаційної роботи в повному обсязі доповідались на науковому семінарі кафедри газонафтопроводів та газонафтосховищ і міжкафедральному науковому семінарі Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу в 2019 році.

**Публікації.** За темою дисертаційної роботи опубліковано 15 друкованих праць, з яких 1 – у міжнародному науковому журналі, що індексуються у наукометричних базах даних Scopus, 1 – у міжнародному науковому журналі, що індексуються у наукометричній базі даних Index Copernicus International, 6 – у наукових фахових виданнях, затверджених ДАК України, 2 – патенти на корисну модель, 3 – тези доповідей на міжнародних конференціях.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертаційна робота викладена на 169 сторінках машинописного тексту, складається зі вступу, 4 розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та 3 додатків. Робота ілюстрована 16 таблицями та 55 рисунками. Список використаних джерел містить 104 найменування, з них 62 кирилицею та 42 латиницею.

## РОЗДІЛ 1

### ОЦІНКА ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ТРУБОПРОВІДІВ ГАЗОВИХ І ТЕПЛОВИХ МЕРЕЖ ТА ВИБІР НАПРЯМКІВ ЙОГО ПОКРАЩЕННЯ

Дано комплексну оцінку сучасного технічного стану трубопроводів газових і теплових мереж України, встановлено основні причини їх аварій та розглянуто наслідки аварій. Класифіковано дефекти, які найчастіше призводять до аварій трубопроводів газових і теплових мереж та здійснено їх характеристику. Класифіковано методи безтраншейної реконструкції трубопроводів газових і теплових мереж, виділено можливості, особливості, діапазон технічних параметрів, переваги та недоліки кожного з них на основі чого поставлено основні задачі та вибрано напрямки досліджень щодо розробки техніки та технології безтраншейної реконструкції трубопроводів газових і теплових мереж.

#### 1.1 Оцінка сучасного технічного стану трубопроводів газових і теплових мереж України

На сьогодні в Україні все більшої ваги набуває проблема забезпечення надійності функціонування трубопроводів газових і теплових мереж. Обсяг зношених підземних трубопроводів складає 60 – 90 % і він постійно зростає. Є ділянки трубопроводів газових і теплових мереж, які відпрацювали свій ресурс у два, три рази. Найактуальнішою проблема є у великих містах України, які мають надзвичайно розгалужену мережу комунікацій.

Постійне збільшення частки зношених трубопроводів газових і теплових мереж через деякий час може поставити під загрозу саму можливість збуту газу, теплопостачання. Зниження рівня надійності і безпеки трубопроводів газових і теплових мереж підвищить соціально-економічні ризики.

Системи газопостачання є однією з найважливіших ланок єдиної системи газового господарства України (видобування – транспортування – газорозподіл).

Сучасні системи газопостачання міст є складним взаємозалежним комплексом газопроводів різних тисків, газорозподільних станцій, проміжних регуляторних пунктів, газорозподільних пунктів і установок, устаткування газових мереж, систем очищення та одоризації газу, систем зв'язку і приладів обліку споживання природного газу. [30] Основною складовою частиною систем газопостачання міст є газові мережі. Це складна газодинамічна система, яка включає велику кількість елементів, що різняться за величиною робочого тиску, геометричною структурою, місцем прокладання та функціональним призначенням. [31]

Загальна протяжність газових мереж України (тиском до 1,2 МПа) перевищує 260 тис. км [32], що в сім раз перевищує протяжність газотранспортної системи України. Необхідний режим газопостачання забезпечує 61 тис. газорозподільних пунктів. Рівень газифікації житла природним газом на сьогодні становить 78,1 % у містах та 38,2 % – у сільській місцевості. Газифіковано природним газом 428 міст, 600 селищ міського типу та 12,4 тисячі сіл. [33]

Найбільшою в Україні є газова мережа міста Київ. Її протяжність складає більше 4800 км, у тому числі 2990 км підземного прокладання. [34]

Стан газових мереж характеризується вичерпуванням технічного ресурсу, моральним і фізичним зносом газопроводів, засобів ЕХЗ, перекривної арматури та іншого обладнання. Знос газопроводів пов'язаний з природним фізичним старінням ізоляції та металу труби, засобів електрохімічного захисту. Становище ускладнюється ще тим, що у великих містах понад 90 % газопроводів знаходяться у небезпечних зонах впливу блукаючих струмів. [35]

З 2013 до 2017 року в Україні було майже 6,8 тис. км газових мереж, термін експлуатації яких перевищив 40 років. Модернізовано і реконструйовано за цей час менше 1,5 тис. км.

На думку експертів для того, щоб утримати газорозподільну систему України від краху та довести її до європейського рівня безпеки та ефективності необхідно щорічно інвестувати близько 7 млрд грн. 3,5 – 4 тис. км газопроводу

треба замінювати щорічно. Це коштує не менше 2 – 2,5 млрд грн. І це тільки для запобігання аварійності газорозподільної системи України.

Так, наприклад, в Харкові в 2019 році на підтримання в робочому стані газових мереж в тарифі ПАТ "Харківміськгаз" передбачено 5,7 млн гривень, що дасть змогу відремонтувати 1,1 км газопроводів. При цьому, щорічна потреба в інвестиціях становить не менш 19,6 млн гривень (амортизаційні відрахування). За перший квартал 2019 року Харківміськгаз інвестував в газові мережі 1,8 млн гривень. З них 1,2 млн гривень було виділено на капітальний ремонт і реконструкцію 0,2 км газопроводів. При цьому в Харкові понад 800 км газопроводів, яким більше 50 років, вони складають 15 % від загальної довжини газової мережі. Газопроводів, які перебувають в експлуатації понад 40 років – понад 1900 км, що становить 38 % від загальної протяжності газової мережі. Загальний знос газопроводів, що перебувають на балансі підприємства, становить близько 75 %. [36, 37]

У Харкові інтенсивний знос газопроводів пов'язаний як з фізичним старінням їх ізоляційного покриття, металу стінки труби, засобів ЕХЗ, так і з наявністю небезпечного впливу блукаючих струмів від розгалуженої мережі електрифікованого міського транспорту, що прискорює процес руйнування (корозії) металу. Результати технічного обстеження газопроводів, які перебувають на балансі Харківміськгаз показали, що з 2449 км підземних газопроводів 86 км (4 %) підлягають капітальному ремонту, 2158 км (88 %) знаходяться в задовільному стані 205 км (8 %) газопроводів ще потрібно обстежити. [38]

Теплові мережі призначені для транспортування тепла споживачам з метою забезпечення комунально-побутових потреб (опалення, вентиляція, гаряче водопостачання) і технологічних потреб.

Розрізняють місцеве і централізоване теплопостачання.

Системи ЦТ є одним з ефективних і перспективних способів забезпечення тепловою енергією населення та інших споживачів теплової енергії в країнах із перехідною економікою та європейських країнах. Це обумовлено такими основними його особливостями:

- відсутність залежності від одного виду палива, особливо природного газу;
- можливість комбінованого вироблення теплової та електричної енергії;
- використання в якості палива поновлюваних джерел (біопалива), сміття та інших твердих побутових відходів, а також теплової енергії стічних вод;
- широкомасштабне використання сонячної енергії для гарячого водопостачання та опалення;
- виробництво теплової енергії за самих низьких викидів в атмосферу;
- акумулювання теплової енергії в умовах її нерівномірного споживання та виробництва.

Сьогодні системи ЦТ набули широкого поширення і забезпечують значну частку потреби в тепловій енергії в таких країнах, як Латвія (65 %), Україна (66 %), Данія (63 %), Польща (53 %), Білорусь (50 %), Фінляндія (50 %), Словаччина (40 %) і ряді інших країн. У країнах-членах ЄС частка ЦТ становить 20 % і відповідно до директивних і нормативно-правових актів планується доведення частки централізованого теплопостачання до 50 % до 2050 р. [36]

У Німеччині, Польщі та Швеції відзначено найбільш інтенсивне зростання сектора ЦТ в ЄС.

Понад 75 % систем ЦТ, використовуваних у 28 країнах-членах ЄС, це похідне тепло від виробництва електроенергії ТЕЦ, з сміттєспалювальних заводів і від промислових процесів.

Значною перевагою систем ЦТ є локалізація викидів, де з ними можна ефективніше боротися на відміну від систем місцевого теплопостачання, які значно погіршують екологію міст.

У великих містах України найбільше поширено централізоване теплопостачання. Система централізованого теплопостачання включає джерело тепла, теплову мережу, теплові пункти і теплоспоживаючі будинки, споруди і промислові установки. [38]

На балансі підприємств комунальної електротеплоенергетики України знаходиться 34,6 тис. км у двотрубному обчисленні магістральних, розгалужених і розподільних теплових мереж. [39]

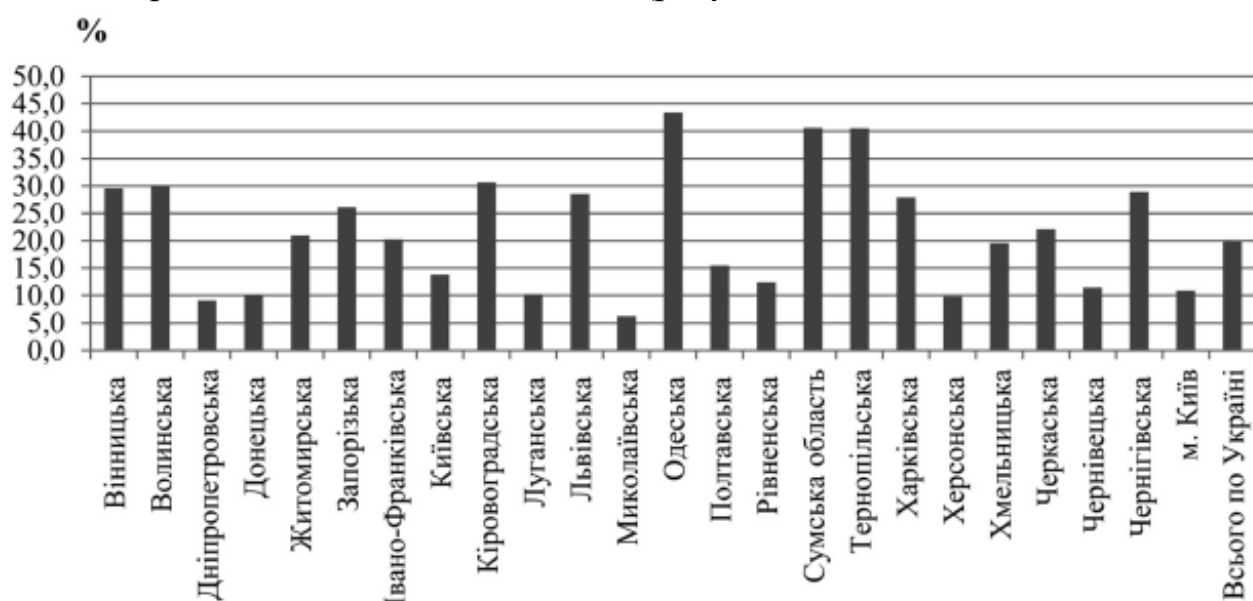
Теплопостачання в Україні забезпечують 8250 підприємств усіх форм власності. Експлуатується 21,5 тис. км теплових мереж у двотрубному обчисленні. Теплоносієм є вода з температурою від 95 °С до 150 °С.

Серйозною проблемою галузі є низька надійність теплотрас, їх незадовільна теплоізоляція, що обумовлює великі втрати тепла, суттєві економічні збитки зумовлені частими аваріями і значними обсягами ремонтних робіт. [40]

У цілому стан теплових мереж України незадовільний. Понад 3000 км теплових мереж, або 14 % знаходяться в аварійному стані, 7700 км, або 34,7 % відпрацювали свій амортизаційний термін. На кожні 100 км теплових мереж щорічно реєструється 70 пошкоджень.

У цілому в галузі житлово-комунального господарства комунальної електротеплоенергетики при нормативній потребі перекладання теплових мереж в обсязі 900 км щорічно замінюється тільки близько 500 км, або 55 %. За останні 5 років замінено труб з пінополіуретановою ізоляцією на суму понад 3 млрд. гривень. У наслідок зниження обсягів заміни фізично зношених трубопроводів магістральних теплових мереж питома вага пошкоджень за цей час збільшилася з 0,9 на 1 км в рік до 1,25 пошкоджень, або на 26 %. [41]

Частина зношених та аварійних ділянок у системах теплопостачання деяких областей України становила 40 % і більше (рисунок 1.1). [42]



**Рисунок 1.1** – Відсоток зношених та аварійних ділянок теплових мереж України

Так, наприклад, харківські теплові мережі у 2-х трубному обчисленні мають загальну протяжність 1634 км. В рамках підготовки до опалювального сезону 2018–2019 р. на ремонт і реконструкцію об'єктів теплопостачання освоєно 298 млн. гривень. Виконано заміну 42 км теплових мереж на суму 240 млн. грн.

Централізоване теплопостачання Харкова було побудовано і розвинено в основному в середині минулого століття, на сьогодні найбільшою проблемою є зношеність трубопроводів теплових мереж. 96 % мереж побудовані більше ніж 25 років тому, тобто повністю вичерпали ресурс. Тому пріоритетним напрямом у підготовці до опалювального сезону 2019-2020 років в Харкові буде реконструкція теплових мереж. [43]

## 1.2 Аналіз причин та наслідків аварій трубопроводів газових і теплових мереж

Основними причинами аварій трубопроводів газових і теплових мереж є корозійні та механічні пошкодження труб, дефекти зварних швів. Також причинами можуть бути розриви зварних швів, заводські дефекти в трубах, розриви компенсаторів, вібрація від руху транспорту, провисання трубопроводу, неякісна ізоляція труб або її пошкодження, пошкодження надземних трубопроводів транспортом, перенапруження труб в результаті дії неврахованих під час проектування навантажень, температурні напруження, які виникають у зимово-весняний період, порушення правильного режиму експлуатації, що полягає в перевищенні робочого тиску, несвоєчасному обстеженні трубопроводів і виявленні небезпечних ділянок.

Найчастішими причинами аварій трубопроводів газових і теплових мереж є електрохімічна корозія труб. При цьому аварії відбуваються під впливом як зовнішньої, так і внутрішньої корозії. Корозійні пошкодження трубопроводів газових і теплових мереж пов'язані з агресивним впливом ґрунтів, пошкодженнями ізоляційного покриття або наявністю блукаючих струмів. Розміри наскрізних отворів зумовлених корозією можуть бути до 40 мм. [44]



Теплові мережі найбільше зазнають корозійних руйнувань. Під час експлуатації теплова ізоляція за рахунок витоків води з труби та природних впливів неодноразово затоплюється і змочується. У таких умовах вона значно пошкоджується та втрачає свої ізоляційні властивості. Все це призводить до інтенсивної корозії металу, порушення герметичності теплопроводів і, як наслідок, до значних втрат води. [45]

Швидкість розвитку корозії залежить від площі контакту металу теплопроводів теплових мереж з ґрунтом, його вологості, температури, наявності солей у ґрунті тощо. Оскільки температура металевого теплопроводу тепломережі сягає 90°C, то інтенсивність корозії значно зростає. При цьому за короткий проміжок часу у місці дефекту може з'явитись незначний отвір, крізь який теплоносій потраплятиме в оточуючий ґрунт. Подальша корозія тіла теплопроводу у місці дефекту може призвести до розриву теплопроводу.

Основними причинами виникнення внутрішньої корозії теплопроводів теплових мереж є наявність солей, повітря та хімічних домішок у теплоносії. [46]

Пошкодження підземних газопроводів електрохімічною корозією призводять до витоків газу. Витоки газу, викликані електрохімічною корозією, збільшуються поступово в міру корозії тіла труби. Ці витоки можна заздалегідь передбачати, виявляючи, в яких місцях корозійний ґрунт і утворилися анодні зони. Проблемою витоків газу у великих містах внаслідок дії електрохімічної корозії є їхнє несвоєчасне виявлення за умов наявності великих площ асфальтного покриття. Тому газ певний час під ними накопичується і, поширюючись під покриттям, виходить на поверхню на значній відстані від місця витoku. При цьому одорант фільтрується у ґрунті і визначити витік за запахом важко. У такому випадку знайти витік газу можна тільки приладом. Усе це призводить до того, що основний обсяг робіт з усунення витоків приходить на відшукання місця, звідки виходить газ. [47]

Механічні пошкодження стінки труби підземних газових і теплових мереж міст найчастіше зумовлені виконанням земляних робіт поблизу теплопроводів. Вони можуть бути обумовлені неправильним зазначенням теплопроводів газових

і теплових мереж в проектній документації, недбалістю або помилками будівельників, тобто носять випадковий характер. Механічні пошкодження призводять до зміни форми поперечного перерізу трубопроводу, вм'ятин, овальності труби, наскрізних її пошкоджень, подряпин. [48]

Розриви зварних швів пов'язані з осіданням ґрунту, температурними напруженнями, неякісним зварюванням труб та наявністю дефектів. Для виявлення дефектів шви контролюють фізичними методами, але не всі піддають контролю. Під час спорудження газопроводів низького тиску контролюють 5 % зварних швів, середнього тиску (до 0,05 МПа) – 10 %, середнього тиску до 0,3 МПа – 50 % і тільки газопроводів з тиском 0,3 – 1,2 МПа – 100 %. Також 100 % швів контролюють на ділянках газопроводів прокладених у складних умовах (переходи через автомобільні дороги та залізниці, трамвайні колії, підводні переходи, ділянки поблизу будівель, споруд і комунікацій). [49, 50]

Відмови трубопроводів газових мереж можна розділити на дві групи. До першої групи відносяться раптові відмови, а до другої – поступові.

До раптових відмов відносяться великі пошкодження трубопроводів системи газопостачання, які зумовлюють потребу негайного відключення ділянки, і відмови поблизу житлових і громадських будівель де є небезпека потрапляння газу в ці будівлі. [51]

Класифікація пошкоджень газопроводів газових мереж наведена в таблиці 1.1 [52].

Найчастішими причинами відмов теплових мереж є корозія зовнішньої поверхні сталевих трубопроводів, особливо малого діаметра – 74,9 %. Кількість пошкоджень зумовлених розривом зварних швів труб є значно меншою – 1,6 %. Крім того, виходять з ладу компенсатори – 6,0 % і перекривна арматура – 4,5 %. [53]

Аварії трубопроводів газових мереж у містах є надзвичайно небезпечні тому що така аварія може супроводжуватись вибухом, пожежею, що може призвести до позбавлення здоров'я або життя людей. Крім того така аварія може позбавити палива значне число споживачів.

Як показує аналіз розподілу аварій і нещасних випадків у газовому господарстві за кількістю аварій і кількістю постраждалих (загальною і зі смертельним наслідком), найаварійнішими об'єктами газових мереж є житлові будинки та газопроводи – 90 – 93 % від загальної кількості аварій. На них припадає 98 % від загальної кількості потерпілих і 99 % зі смертельним наслідком. [54]

**Таблиця 1.1** – Класифікація пошкоджень і відмов трубопроводів газових мереж середнього і високого тиску

Вид пошкодження і пошкоджений елемент	Відмови газопроводу, їх кількість		Пошкодження, які не призводять до відмови
	1-а група – раптова відмова	2-а група – поступова відмова	
Корозія газопроводів	Наскрізне пошкодження великих розмірів (20 мм і більше), наскрізне пошкодження, розташоване поблизу будівель, 10 – 13 %	Наскрізне пошкодження розміром менше 20 мм, 45 – 55 %	Виразки, наскрізні пошкодження розміром менше 5 мм, 30 – 40 %
Тріщини в зварних швах і їх розриви	Повний розрив або більше половини окружності. Розрив швах поблизу будівель, 15 – 20 %	Тріщини в зварних швах, неповний розрив шва, 85 – 75 %	Корозійні свищі в звареному шві, 5 – 10 %
Механічні пошкодження, які мають випадковий характер	50 %	50 %	–

Аварії трубопроводів теплових мереж призводять до перебоїв теплопостачанням житлових будинків, об'єктів соціальної інфраструктури в зимову пору року. Все частіше в містах стаються випадки провалювання автомашин у вимиті витоками води з теплових мереж порожнини (рисунок 1.2, а), фонтанів гарячої води (рисунок 1.2, б). Все це є надзвичайно небезпечним для життя і здоров'я мешканців, забруднює і руйнує інфраструктуру, автомобілі.



а) – провалювання автомашин у вимити порожнину; б) – фонтан води

**Рисунок 1.2** – Наслідки аварій мереж теплопостачання

### 1.3 Аналіз методів безтраншейної реконструкції трубопроводів газових і теплових мереж

Традиційна траншейна реконструкція трубопроводів газових і теплових мереж у великих містах є малодоцільною через велику тривалість виконання робіт, великі обсяги земляних робіт, перекривання руху транспорту, проходів пішоходів, руйнування дорожнього покриття та зеленої зони, порушення інфраструктури, благоустрою міст, що 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.

Безтраншейні технології реконструкції трубопроводів газових і теплових мереж є найефективнішими та найрентабельнішими. Вони полягають у протягуванні нової поліетиленової труби чи рукава в зношений сталевий трубопровід, коли земляні роботи зведено до мінімуму або взагалі відсутні.

За даними статистики в таких країнах, як Великобританія, Німеччина, Скандинавські країни, США 95 % усього обсягу робіт з реконструкції підземних комунікацій виконується безтраншейними технологіями. В багатьох великих містах Америки та Західної Європи прокладати та реконструювати інженерні комунікації відкритим способом заборонено.

В Україні практично не розробляються і дуже рідко впроваджуються безтраншейні технології реконструкції трубопроводів газових і теплових мереж хоча державні будівельні норми ДБН В.2.5-41 [1] допускають застосування в Україні безтраншейних технологій реконструкції газових мереж.

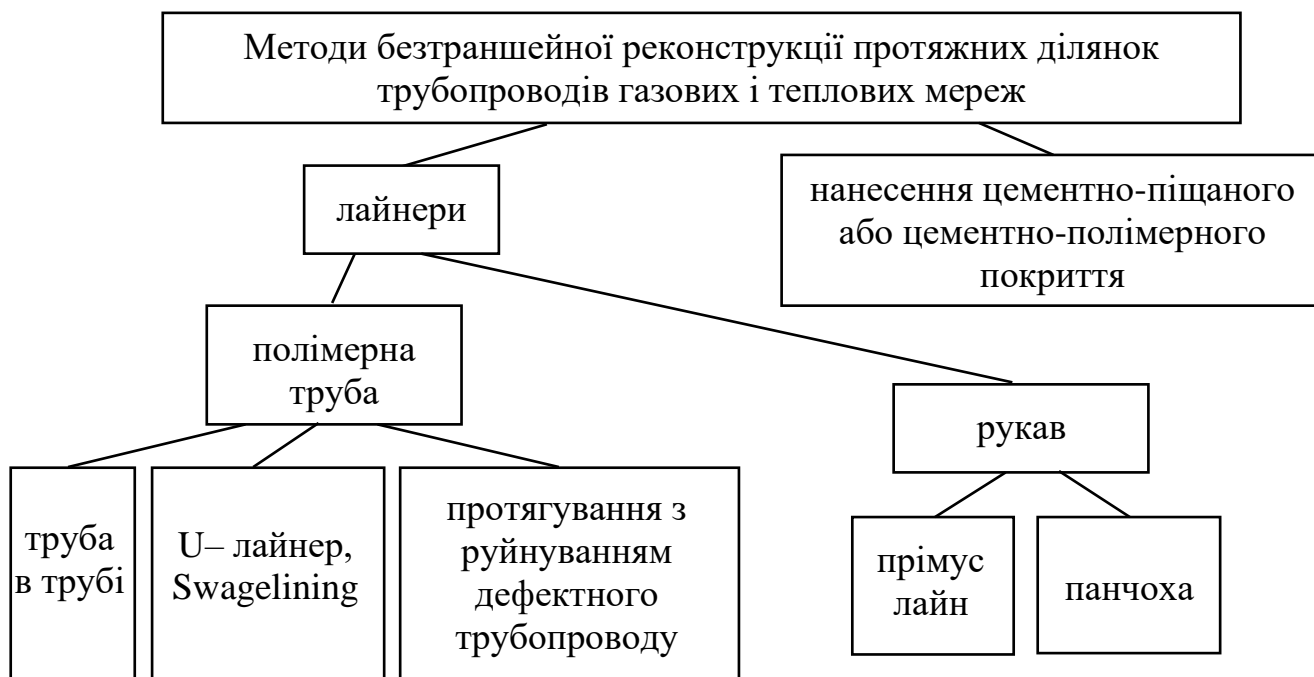
Технології, якими на сьогодні виконують реконструкцію переважної більшості трубопроводів газових і теплових мереж (траншейна заміна зношених ділянок трубопроводу на нові) є матеріало-, трудо- та енергомісткісткими. Це є однією з найбільших причин того, що темпи та обсяги реконструкції трубопроводів газових і теплових мереж надзвичайно низькі.

На сьогодні не існує науково обґрунтованої методики вибору оптимального методу реконструкції зношених трубопроводів газових і теплових мереж. Оскільки не існує жодного універсального методу, яким можна було реконструювати усі зношені трубопроводи газових і теплових мереж, не має розуміння алгоритму вибору оптимального варіанту реконструкції, класифікація та визначення критеріїв, що впливають на вибір, а також визначеної сфери застосування кожного методу реконструкції. [55]

Здійснивши аналіз існуючих у світі методів безтраншейної реконструкції протяжних ділянок трубопроводів газових і теплових мереж їх класифіковано таким чином (рисунок 1.3):

– протягування полімерної труби меншого діаметра в дефектний сталевий трубопровід – метод “труба в трубі”;

– протягування полімерної труби в дефектний сталевий трубопровід з розширенням протягнутої труби до її щільного прилягання до внутрішньої стінки дефектного трубопроводу – метод “U-лайнер”, метод “Swagelining”;



**Рисунок 1.3** – Методи безтраншейної реконструкції протяжних ділянок трубопроводів газових і теплових мереж

– протягування полімерної труби з руйнуванням дефектного трубопроводу;  
– протягування синтетичного рукава в дефектний сталевий трубопровід – метод “Прімум Лайн”;

– вивертання синтетичного рукава в дефектний сталевий трубопровід – метод “панчоха”;

– нанесення цементно-піщаного або цементно-полімерного покриття на внутрішню поверхню дефектного сталевих трубопроводу. [14, 15]

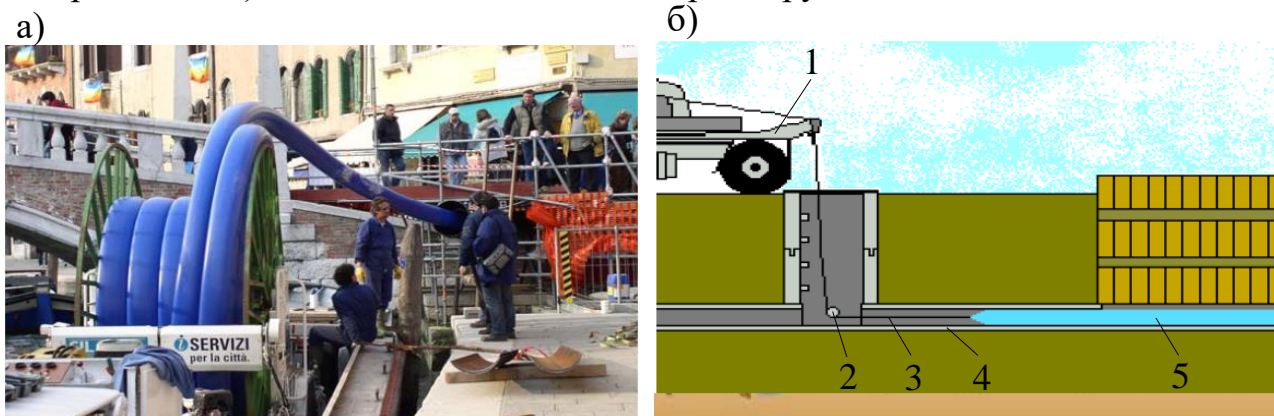
Перед реконструкцією трубопроводів газових і теплових мереж будь-яким методом треба очистити їх внутрішню порожнину протягуванням очисного поршня.

Методом “труба в трубі” виконують реконструкцію прямолінійних ділянок трубопроводів газових і теплових мереж (рисунок 1.4). Технологія полягає в протягуванні нової полімерної труби в зношений старий трубопровід. Діаметр

нової полімерної труби повинен бути менший діаметра зношеної сталеві. [4, 56–60]

Найважливіші етапи реконструкції газових мереж методом “труба в трубі” та варіанти технічних рішень для неї, що забезпечують незмінні умови експлуатації газотранспортної мережі споживачами енергоресурсу розглянуті в науковій праці Височанського І. І. [61]

Перевагами методу “труба в трубі” є широка сфера застосування, відносна дешевизна, мінімальні технічні складнощі, довжина зношеної ділянки трубопроводу може складати до сотень метрів (залежно від діаметра, наявності поворотів тощо), додатковий захист полімерної труби від зовнішніх пошкоджень.



а) – виконання робіт у місті Венеція; б) – схема виконання робіт; 1 – тягова лебідка; 2 – поворотний блок; 3 – тяговий трос; 4 – зношений трубопровід; 5 – новий поліетиленовий трубопровід

**Рисунок 1.4** – Метод реконструкції трубопроводу “труба в трубі”

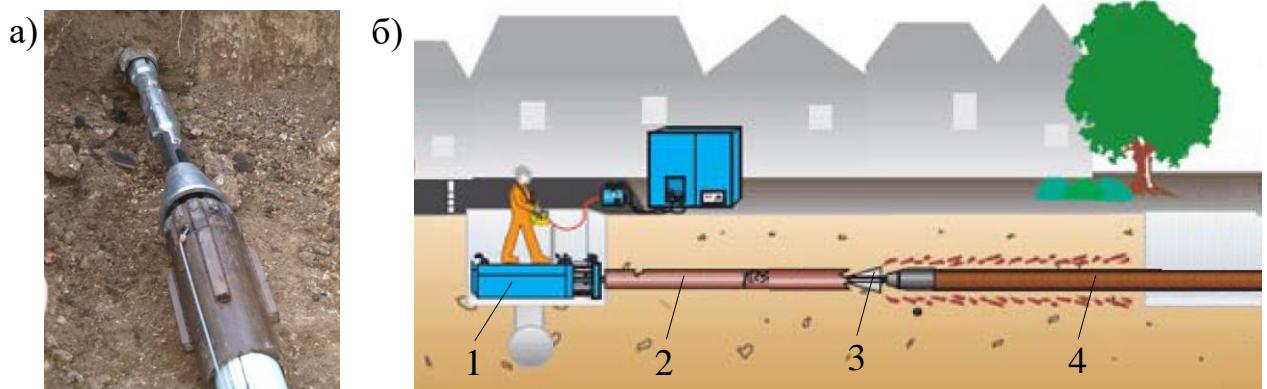
Недоліками методу “труба в трубі” є збільшення гідравлічних втрат у результаті зменшення діаметру реконструйованої ділянки трубопроводу, неможливість реконструювати ділянки трубопроводу, які мають кути повороту.

Ксенич А. І., Середюк М. Д. та Височанський І. І. дослідили, що у разі протягування поліетиленових труб діаметр яких відповідає рекомендованим в ДБН В.2.5-41 [1] вличинам без зміни робочого тиску, відбувається зниження пропускної здатності газопроводу від 60 % до 95 % залежно від діаметра сталевого газопроводу. Тому науковці вважають, що у такому разі є обов’язковим зміна робочого тиску в газовій мережі із низького на середній. На основі

проведених досліджень одержано відповідні аналітичні залежності та графічні номограми, які дають змогу визначати необхідні геометричні та режимні параметри газопроводу середнього тиску для заміни сталевих газопроводів низького тиску за умови повного збереження проектної пропускної здатності. [5]

Метод протягування полімерної труби з руйнуванням зношеного сталевих газопроводу застосовують тоді, коли треба зберегти або збільшити діаметр реконструйованого газопроводу. Під час протягування нової полімерної труби старий газопровід руйнується розширювачем (рисунок 1.5). Сталеві труби розрізаються і розвальцьовуються. Цей метод передбачає, що зруйнована стара труба вдавлюється в ґрунт. [6, 7, 62–65]

Перевагами методу протягування полімерної труби з руйнуванням дефектного сталевих газопроводу є збереження або збільшення діаметра реконструйованого газопроводу до  $1,5 D_з$ , немає потреби оглядати і очищувати зношений сталевий газопровід.



а) – розширювач для руйнування зношеного сталевих газопроводу; б) – схема виконання робіт; 1 – статична установка Grundoburst; 2 – зношений газопровід; 3 – розширювач; 4 – новий поліетиленовий газопровід

**Рисунок 1.5** – Метод реконструкції газопроводу протягуванням полімерної труби з руйнуванням зношеного сталевих газопроводу

Недоліками методу протягування полімерної труби з руйнуванням дефектного сталевих газопроводу є ризик пошкодження інших газопроводів, які проходять поряд з реконструйованим, ризик пошкодження полімерної труби до зруйнованого дефектного газопроводу, велика трудомісткість, великі тягові



зусилля, неможливість реконструювати ділянки трубопроводу, які мають кути повороту, треба застосовувати труби із захисним покриттям.

Метод протягування полімерної труби з розширенням протягнутої труби до її щільного прилягання до внутрішньої стінки дефектного сталевго трубопроводу полягає в протягуванні у зношуваний трубопровід поліетиленової труби, яка має тимчасово зменшений діаметр. Після протягування відновлюють круглий переріз протягнутої поліетиленової труби. При цьому поліетиленова труба щільно прилягає до внутрішньої поверхні реконструйованого трубопроводу.

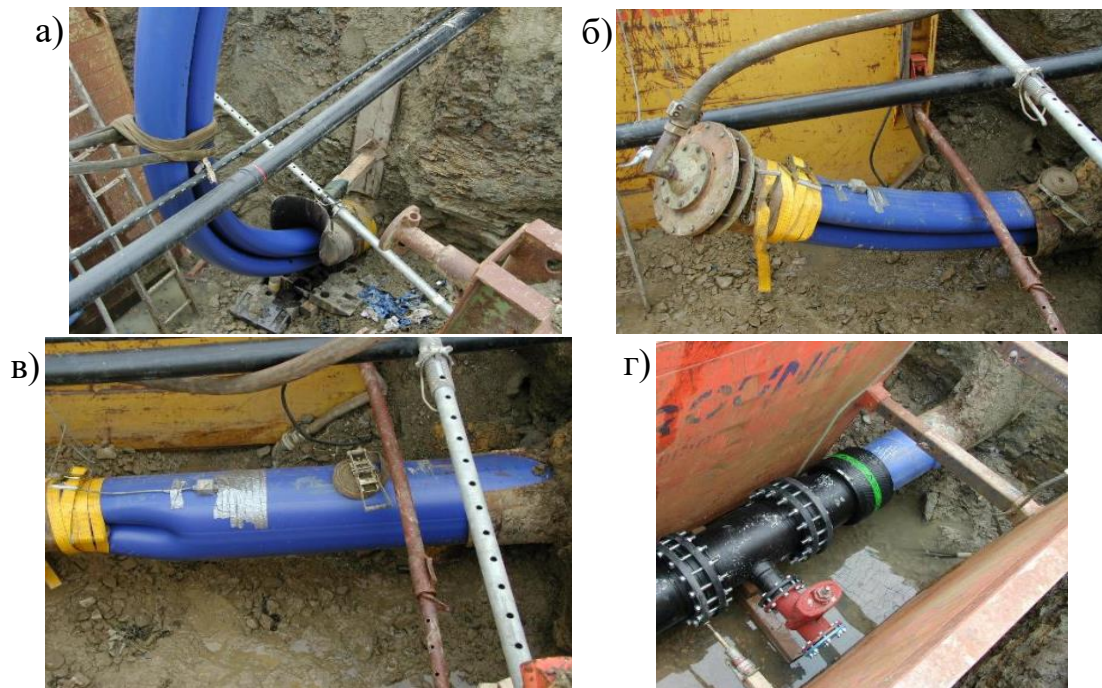
Методом протягування полімерної труби в дефектний сталевий трубопровід з розширенням протягнутої труби поділяється на “U-лайнер”, “Swagelining”.

U-подібні лайнери виготовляють з термопластичної полімерної труби діаметром від 80 мм до 1200 мм великої міцності попередньо деформованої в нагрітому стані у формі літери "U". Лайнер протягують у дефектну ділянку трубопроводу (рисунок 1.6, а). Тоді обидва кінці лайнера закривають спеціальними заглушками (рисунок 1.6, б) і трубопровід розширюють до круглої форми тиском пари, яку подають машиною-парогенератором (рисунок 1.6, в). У середину U-подібного лайнера пароповітряна суміш подається від парогенератора під тиском 0,1 – 0,3 МПа та з температурою 105 °С. Після охолодження U-лайнера його спеціальними з'єднувачами під'єднують до прилеглих ділянок трубопроводу (рисунок 1.6, г). [66–68]

Однією із найперспективніших технологій безтраншейної реконструкції протяжних ділянок трубопроводів газових і теплових мереж U-подібними лайнерами є технологія “Смарт Пайп” однойменної компанії “SmartPipe” (США). Технологія – Смарт Пайп дає змогу витримувати великий тиск (більше 5 МПа) і реконструювати ділянки трубопроводів газових і теплових мереж довжиною понад 16 кілометрів безтраншейним способом.

Оригінальність технології Смарт Пайп полягає у застосуванні волоконно-оптичних давачів, вбудованих в лайнер. Система моніторингу в змозі виявити розрив або витікання продукту з відремонтованої ділянки трубопроводу. Волоконно-оптична система моніторингу призначена для безперервного

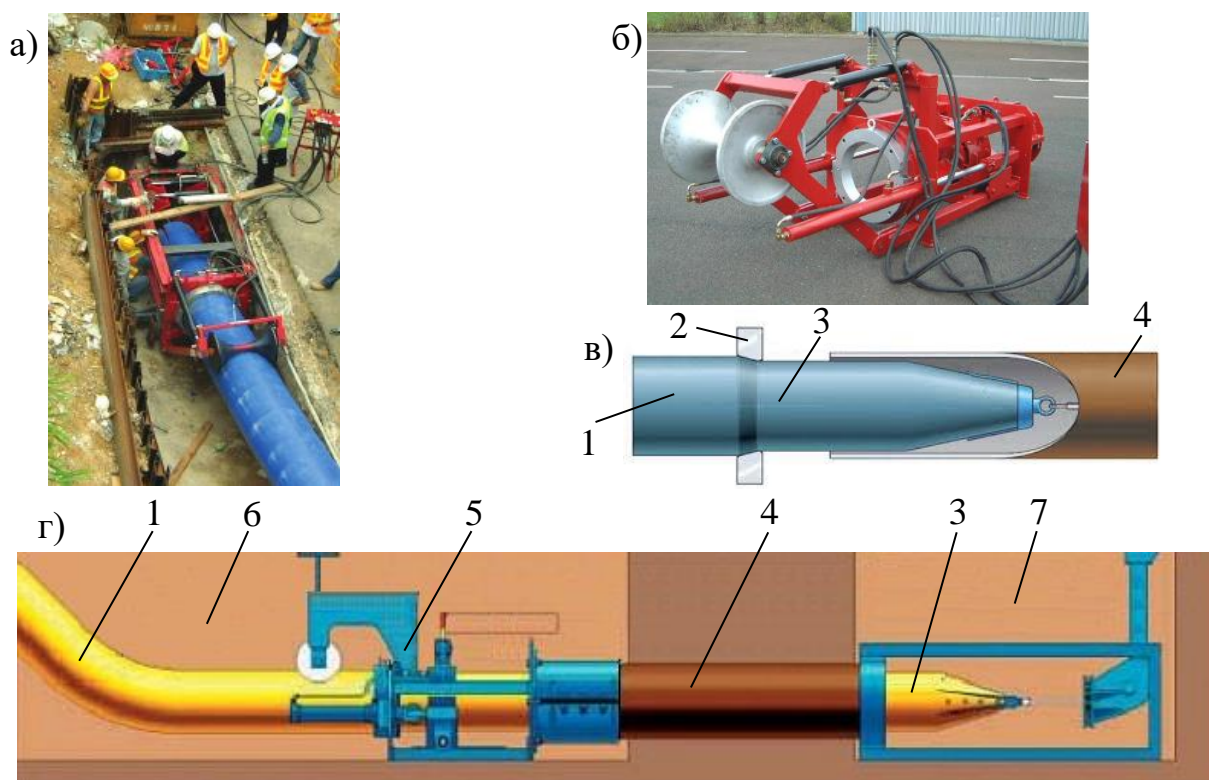
виявлення загроз або аномалій під час протягування та експлуатації трубопроводу. [69]



а) – протягування U-лайнера у дефектний сталевий трубопровід; б) – U-лайнер підготовлений до розширювання; в) – розширений U-лайнер; г) – U-лайнер під'єднаний до прилеглої ділянки трубопроводу

**Рисунок 1.6** – Безтраншейна реконструкція трубопроводу U-лайнром

Технологія “Swagelining” призначена для реконструкції трубопроводів газових і теплових мереж діаметром до 1000 мм довжиною до 300 м (рисунок 1.7, а). Вона полягає в протягуванні холодної полімерної труби через спеціальну стискаючу матрицю (рисунок 1.7, б), яка зменшує її зовнішній діаметр (рисунок 1.7, в). Після чого полімерну трубу з зменшеним діаметром протягують в дефектний сталевий трубопровід (рисунок 1.7, г). Тоді полімерну трубу розширюють до її щільного прилягання до внутрішньої стінки дефектного сталевого трубопроводу. Тимчасове термомеханічне стискання труби не призводить до порушення властивостей труб з термопластів. Протягом короткого часу вони розправляються і щільно прилягають до внутрішньої стінки старого трубопроводу. [8, 70, 71]



а) – робочий котлован; б) – стискаюча матриця; в) – стискання полімерної труби;  
 г) – загальна схема; 1 – полімерна труба до стискання; 2 – стискаюча матриця;  
 3 – стиснута полімерна труба; 4 – дефектний сталевий трубопровід; 5 – пристрій  
 для стискання полімерного трубопроводу; 6 – робочий котлован; 7 – приймальний  
 КОТЛОВАН

**Рисунок 1.7** – Безтраншейна реконструкція трубопроводу технологією  
 Swagelining

Перевагами методу протягування полімерної труби з розширенням протягнутої труби до її щільного прилягання до внутрішньої стінки дефектного сталевихого трубопроводу є виготовлення труб з поперечним перерізом на 30 – 40 % менше потрібного, що полегшує і пришвидшує протягування, незначне зменшення внутрішнього діаметра реконструйованого трубопроводу, довжина трубопроводу, який буде реконструюватись, може досягати 300 м, можливість застосування у разі наявності в дефектному трубопроводі зруйнованих ділянок або невеликих зміщень зварних з'єднань, можливість застосовувати навіть у разі наявності в дефектній трубі тріщин, зруйнованих ділянок або невеликих зміщень зварних з'єднань.

Недоліками методу протягування полімерної труби з розширенням протягнутої труби до її щільного прилягання до внутрішньої стінки дефектного сталевго трубопроводу є велика трудомісткість, потрібна додаткова техніка (компресори, парогенератори тощо), треба обстежувати внутрішню поверхню зношеного і нового трубопроводу відеокамерою.

Метод “Прімум Лайн” однойменної компанії “Primus Line” (Німеччина) – полягає в протягуванні в дефектний сталевий трубопровід діаметром до 500 мм рукава Прімум Лайн, який витримує високий тиск (рисунок 1.8, а).

Рукав Прімум Лайн протягують в очищений, обстежений трубопровід (рисунок 1.8, б). Біля робочого котловану розміщують барабан з рукавом Прімум Лайн, а біля приймального – тяговий засіб. Після протягування рукав Прімум Лайн, який на кінцях має спеціальні з’єднувачі (рисунок 1.8, в), зварюванням або з допомогою фланців під’єднують до прилеглих ділянок трубопроводу. [10, 59,

72]



а) – структура рукава; б) – підготовка до протягування рукава; в) – з’єднувачі;

1 – стійкий до стирання поліетилен; 2 – волокно кевлар (1 або 2 шари безшовної армованої тканини); 3 – термопластичний синтетичний матеріал

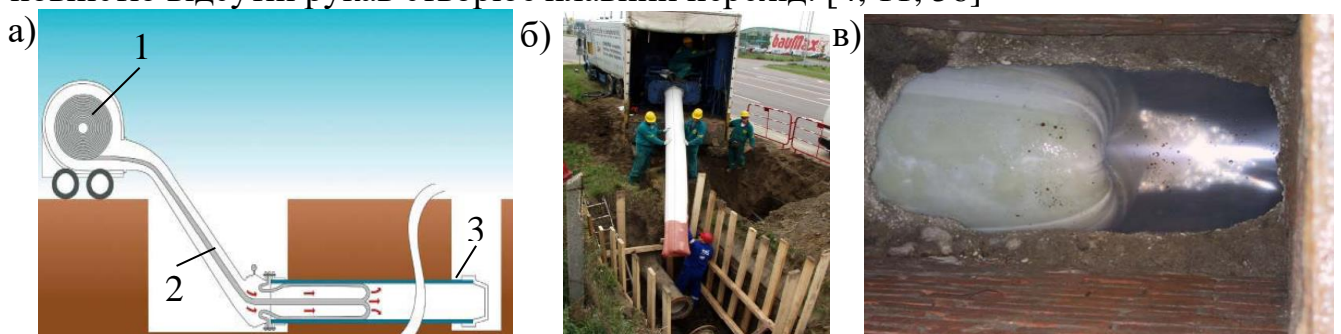
**Рисунок 1.8** – Безтраншейна реконструкція трубопроводу рукавом Прімум Лайн

Перевагами методу “Прімум Лайн” є незначне зменшення внутрішнього діаметра реконструйованого трубопроводу (рукав Прімум Лайн щільно прилягає до внутрішньої стінки дефектного трубопроводу і має малу товщину стінки), рукав “Прімум Лайн” є гнучким, що дає змогу реконструювати протяжні ділянки довжиною до 1 км, які містять криві повороту до 30°, гладкість внутрішньої поверхні рукава, що зменшує опір потоку, мінімальні технічні складнощі, широка сфера застосування, невеликі розміри ремонтного майданчика.

Недоліками методу “Прімум Лайн” є відсутність виробників рукава “Прімум Лайн” в Україні, необхідність якісного очищення внутрішньої порожнини дефектного трубопроводу.

Методом “панчохи” (метод “фенікс”) (рисунок 1.9) виконують реконструкцію трубопроводів газових і теплових мереж діаметром більше 100 мм. Кожен виробник виготовляє рукави з різних матеріалів, але в загальному вони є синтетичним полотном з поліефірних і нейлонових ниток товщиною – від 3 мм до 50 мм.

Спочатку вимірюють і відрізають необхідну довжину рукава. Змащують його внутрішню поверхню двокомпонентним епоксидним клеєм за допомогою катка і змотують один кінець, а інший затискають у прикріпленому до трубопроводу або установленому на автомашині фланці (рисунок 1.9, б). Тоді рукав тиском повітря, яке подають від компресора, вивертають внутрішньою стороною на зовні, як панчошу, проштовхуючи таким чином у дефектний трубопровід (рисунок 1.9, в). Після вивертання сторона рукава просякнута епоксидним клеєм приклеюється до внутрішньої стінки труби. Для розладжування гофр та прискорення полімеризації епоксидного клею у рукав парогенератором нагнітають пар. У місцях бокових відводів вирізають отвори дистанційно керованим роботом. У тих місцях, де зварні з’єднання зміщені або повністю відсутні рукав створює плавний перехід. [4, 11, 56]



а) – загальна схема; б) – проштовхування рукава з автомашини;

в) – проштовхування рукава в дефектний трубопровід; 1 – барабан з рукавом;

2 – рукав; 3 – дефектний трубопровід; 4 – заглушка

**Рисунок 1.9** – Безтраншейна реконструкція трубопроводу методом “панчохи”

Перевагами методу “панчохи” є можливість реконструювати ділянки трубопроводу, які мають кути повороту до  $45^\circ$ , незначне зменшення внутрішнього діаметра реконструйованого трубопроводу (рукав щільно приклеюється до внутрішньої стінки дефектного трубопроводу і має малу товщину стінки), гладкість внутрішньої поверхні рукава, віддаль між котлованами (колодязями) може складати до 500 м, широка сфера застосування.

Недоліками методу “панчохи” є відносно велика вартість матеріалів і необхідність спеціального обладнання, недостатня міцність матеріалу рукава, необхідність якісного очищення внутрішньої порожнини дефектного трубопроводу і повного її висушування, можливе нещільне прилягання рукава до внутрішньої стінки дефектного трубопроводу (особливо на кутах повороту, де можливе утворення гофрів).

Методом нанесення цементно-піщаного або цементно-полімерного покриття на внутрішню поверхню дефектного сталевих трубопроводу виконують реконструкцію трубопроводів теплових мереж діаметром більше 300 мм. Такі покриття є надійним засобом ліквідації різного роду дефектів на внутрішній поверхні трубопроводу, а також мають добрі антикорозійні властивості. [73]

Перевагами методу нанесенням цементно-піщаного та цементно-полімерного покриття є відносна простота виконання і низька вартість ремонтних робіт, що становить близько 30 % вартості нового будівництва, покриття зберігає свої властивості протягом тривалого терміну експлуатації – близько 50 років, запобігання корозії внутрішньої поверхні трубопроводів, тонка і гладка поверхня облицювання знижує гідравлічний опір і втрати напору в трубопроводі при незначному зменшенні внутрішнього діаметра.

Недоліками методу нанесенням цементно-піщаного та цементно-полімерного покриття є незначне збільшення гідравлічних втрат в результаті зменшення діаметру ділянки трубопроводу, після нанесення покриття трубопровід може бути введений в експлуатацію тільки через 3 – 5 діб, тобто технологічний цикл процесу є відносно тривалим, метод неефективний у місцях зміщення труб у стиках, деформування трубопроводу, розгалуженої мережі

трубопроводів (під час нанесення покриття може закупоритись відвід з малим поперечним перерізом), наявність вздовж траси трубопроводу кутів повороту більше  $11^\circ$ , спусків та підйомів робить неможливим проходження облицювального агрегату. В даному випадку необхідно додаткове розкопування трубопроводу.

Дані фірм виконавців робіт дають змогу оцінити питому вагу реалізації вище вказаних методів безтраншейної реконструкції трубопроводів:

- метод “труба в трубі” – 68 – 72 %;
- метод “U-лайнр”, метод “Swagelining” – 2 – 4 %;
- метод протягування полімерної труби з руйнуванням дефектного сталевго трубопроводу – 8 – 10 %;
- метод “Прімуc Лайн” – 9 – 11 %;
- метод “панчохи” – 5 – 8 %;
- метод нанесення цементно-піщаного або цементно-полімерного покриття – 6 – 8 %. [74]

Вибір оптимального методу реконструкції трубопроводів газових і теплових мереж повинен відповідати безпосереднім цілям виконуваного проекту та ґрунтуватися на всесторонньому аналізі і ні в якому разі не повинен орієнтуватися лише на один критерій. [55]

Розширенню сфери застосування безтраншейної реконструкції трубопровідних комунікацій сприяє поширення розглянутих в роботах [12, 13] новітніх гнучких композитних труб армованих скловолокном, скловолокном та епоксидом чи сталлю виробництва Канади, США. Такі труби можуть експлуатуватись під високими тиском (до 20 МПа), а тому їх все ширше застосовують для найпростішого методу реконструкції трубопровідних комунікацій – протягування труби меншого діаметра в зношений сталевий трубопровід “труба в трубі”. Застосування таких труб в Україні на сьогодні не можливе оскільки немає державного стандарту, який б встановлював вимоги до виконання робіт з будівництва, реконструкції трубопроводів з таких труб. Дана робота виконана в рамках теми ДП “Науканафтогаз” “Розроблення національного

стандарту з проектування, будівництва, контролю якості та приймання робіт для газопроводів з гнучких композитних труб”. Після надання чинності цьому стандарту в Україні можна буде застосовувати гнучкі композитні труби для реконструкції трубопроводів методом “труба в трубі”.

У дисертаційній роботі будуть розроблятися теоретичні основи та технічні засоби безтраншейної реконструкції трубопроводів газових і теплових мереж протягуванням поршнем нового поліетиленового трубопроводу чи рукава зношеним сталевим трубопроводом. Досліджень динаміки руху поршня з прикріпленням до нього поліетиленовим трубопроводом чи рукавом не виконувалось жодним вітчизняними чи зарубіжним науковцем. Динаміку руху різноматніх поршнів магістральними газопроводами та нафтопроводами без прикріплення до них трубопроводів вивчали багато науковців. Зокрема Грудз В. Я., Бакаєв В. В. та Грудз Я. В. розробили основи моделювання термогазодинамічних процесів у газопроводах під час руху ними поршнів [75], методику регулювання руху інтелектуального поршня зміною технологічної схеми лінійної ділянки [76, 77]. Грудз В. Я., Михалків В. Б. та Розгонюк В. В. розробили алгоритм керування режимом роботи газопроводу в період проведення профілактичних очищень поршнем [78], дослідили вплив профілю траси газопроводу на динаміку руху поршнів [79].

#### 1.4 Постановка задач та конкретизація мети досліджень

Переваги безтраншейних технологій реконструкції трубопроводів газових і теплових мереж є очевидними і полягають в тому, що капітальні витрати на реконструкцію знижуються в середньому на 40 – 50 %, а продуктивність робіт збільшується в рази, що дає змогу підвищити темпи виконання робіт. Безтраншейні технології є ефективними у місцях щільної міської забудови. Не потрібно багатьох і часто дорогих та довготривалих узгоджень на виконання реконструкції, не треба перекивати дороги, не руйнується дорожнє покриття,



благоустрій міст. Характерною особливістю сучасних безтраншейних технологій є високий рівень механізації і мінімальні обсяги ручної роботи.

Невирішеними на сьогодні питаннями безтраншейної реконструкції трубопроводних комунікацій є:

- великі обсяги підготовчих робіт;
- перед виконанням реконструкції треба розробляти приймальний котлован, що не завжди можливо;
- невелика швидкість протягування нового трубопроводу дефектним.

Причинами цього є те, що протягування нової поліетиленової труби або рукава в зношений сталевий трубопровід виконують лебідками, гідродомкратними установками, статичними установками Grundoburst, тракторами, бульдозерами та іншою колісною технікою. 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 сталевих трубопроводу протягуванням ним очисного поршня. Все це вимагає багато часу і фінансових витрат, а в ускладнених умовах ці методи застосувати надзвичайно складно. Тому 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.

Тому метою дисертаційної роботи є розроблення теоретичних основ та технічних засобів безтраншейної реконструкції трубопроводів газових і теплових мереж протягуванням поршнем нового поліетиленового трубопроводу чи рукава зношеним сталевим трубопроводом.

Щоб досягти поставлену мету треба вирішити такі завдання:

- аналітично дослідити динаміку процесу протягування поршнем нового поліетиленового трубопроводу чи рукава зношеним сталевим трубопроводом;
- дослідити газодинамічні процеси у внутрішній порожнині сталевих

трубопроводу під час його безтраншейної реконструкції протягуванням поршнем поліетиленового трубопроводу чи рукава;

– експериментально дослідити процес протягування поршнем поліетиленової труби зношеною сталевую;

– розробити та промислово апробувати ефективну техніку та технологію безтраншейної реконструкції трубопроводів газових і теплових мереж протягуванням поршнем:

а) нового поліетиленового трубопроводу в зношений сталевий – “Тяговий поршень<sup>®</sup>”;

б) нового поліетиленового рукава в зношений сталевий трубопровід – “Тяговий поршень<sup>®</sup>”.

Основні положення розділу опубліковані в працях [14–16].

## РОЗДІЛ 2

### ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ПРОТЯГУВАННЯ ПОРШНЕМ НОВОГО ПОЛІЕТИЛЕНОВОГО ТРУБОПРОВОДУ ТА РУКАВА В ЗНОШЕНИЙ СТАЛЕВИЙ ТРУБОПРОВІД

Запропоновано реконструкцію трубопроводів газових і теплових мереж виконувати протягуванням поршнем нового поліетиленового трубопроводу чи рукава в зношений сталевий трубопровід. Можливість виконання такої операції обґрунтовано аналітичними дослідженнями та CFD моделюванням. Виведено формули для розрахунку сил опору, які діють на рухома систему, визначено закономірності зміни тиску вздовж реконструйованого трубопроводу та на виході компресора. Встановлено залежність величини падіння тиску в міжтрубному просторі від довжини протягнутої поршнем ділянки нового поліетиленового трубопроводу чи рукава зношеним сталевим трубопроводом. Результати CFD моделювання процесу протягування поршнем нового поліетиленового трубопроводу чи рукава візуалізовані в постпроцесорі програмного комплексу Ansys Fluent побудовою ліній течії, векторів швидкості, полів тиску на контурах і в повздовжньому перерізі запоршневого простору.

#### 2.1 Дослідження процесу протягуванням поршнем нового поліетиленового трубопроводу в зношений сталевий

Щоб пришвидшили темпи виконання робіт з безтраншейної реконструкції трубопроводів газових і теплових мереж, мінімізували обсяги підготовчих робіт та полегшили виконання робіт в ускладнених умовах запропоновано ідею протягування нового поліетиленового трубопроводу в зношений сталевий виконувати поршнем. Для встановлення можливості реалізування такої ідеї треба дослідити цей процес та герметизувати міжтрубний простір, щоб з нього не виходило повітря під тиском якого буде рухатись поршень.

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 [17, 18, 21] та втрати енергії під час руху повітря міжтрубним простором [22]. 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

$$P_{\text{комп}} = P_{\text{П}} + \Delta P_L, \quad (2.1)$$

де  $P_{\text{П}}$  – тиск повітря в запоршневому просторі, який визначається силами опору, що діють на рухому систему;

$\Delta P_L$  – втрати тиску в міжтрубному просторі вздовж трубопроводу від компресора до поршня під час руху повітря міжтрубним простором.

Створення і реалізація математичної моделі руху твердих тіл трубопроводами під тиском є складною задачею. Динаміку руху поршнів трубопроводами досліджували Грудз В. Я. [75, 76, 78, 79], Грудз Я. В. [75–77], Deng T. [80], Liqiong C. [81], Minami K. [82], Nieckele A. [83], Saeidbakhsh M. [84], Short G. [85], Solghar A. [86], Tolmasquim S. [87].

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 сталевого зношеного трубопроводу, процеси тертя поліетиленової труби в місці герметизування міжтрубного простору, зміна в часі основних технологічних параметрів процесу, тощо, призводять до громіздких співвідношень між цими параметрами, що вимагає емпіричних побудов відповідних залежностей. Особливо ускладняється

моделювання процесу руху поршня трубопроводом у місцях підвищень або понижень траси. У 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

$$m_n \frac{dV_n}{dt} = \sum_{i=1}^n F_n, \quad (2.2)$$

де  $m_n$  – маса поршня;

$V_n$  – швидкість руху поршня;

$t$  – час;

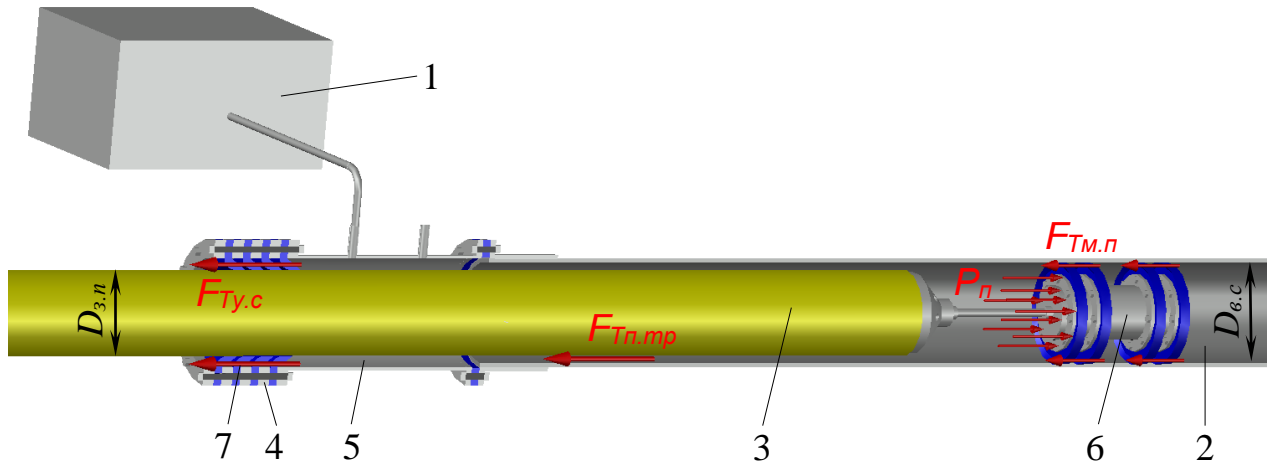
$\sum_{i=1}^n F_n$  – сума сил, які діють на рухому систему.

Поршень з прикріпленим до нього поліетиленовим трубопроводом рухається під дією сили, яка спричинена тиском повітря в запоршневому просторі  $P_{II}$ . До сил опору, які діють на рухому систему на горизонтальних ділянках траси відноситься сила механічного тертя манжет поршня до стінок сталевго трубопроводу  $F_{Тм.н}$ , сила тертя поліетиленової труби до сталевго  $F_{Тн.мп}$ , сила тертя поліетиленової труби в кільцевих гумових манжетах ущільнювальної системи  $F_{Ту.с}$  (рисунк 2.1). Ущільнювальна система містить затиснуті фланцями кільцеві гумові манжетові ущільнення, які не повинні випускати повітря з міжтрубного простору та забезпечити можливість протягування нового поліетиленового трубопроводу зношеним сталевим.

Тоді сума сил, які діють на рухому систему буде рівна

$$\sum_{i=1}^n F_n = P_{II} \frac{\pi D_{г.с}^2}{4} - F_{Тм.н} - F_{Тн.мп} - F_{Ту.с}, \quad (2.3)$$

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



1 – компресор; 2 – зношений сталевий трубопровід; 3 – протягуваний поліетиленовий трубопровід; 4 – фланець; 5 – ущільнювальна система; 6 – поршень; 7 – гумові ущільнення

**Рисунок 2.1** – Розрахункова схема протягування поршнем поліетиленового трубопроводу горизонтальною ділянкою сталевго трубопроводу

У разі рівномірного руху поршня

$$\sum_{i=1}^n F_n = P_{\Pi} \frac{\pi D_{в.с}^2}{4} - F_{Тм.н} - F_{Тн.мп} - F_{Ту.с} = 0. \quad (2.4)$$

Сила механічного тертя манжет поршня до стінок сталевго трубопроводу

$$F_{Тм.н} = n_{м.н} f_{м.н} F_H, \quad (2.5)$$

де  $n_{м.н}$  – кількість манжет поршня;

$f_{м.н}$  – 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.

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

$$\sigma = \varepsilon E, \quad (2.6)$$

де  $\varepsilon$  – відносна деформація манжет поршня;

$E$  – модуль пружності гуми ( $E = 2 \text{ МПа}$ ).

Відносна деформація манжет поршня

$$\varepsilon = \frac{\Delta R}{R_{m.n}}, \quad (2.7)$$

де  $R_{m.n}$  – радіус манжет поршня ( $R_{m.n} = D_{m.n} / 2$ , де  $D_{m.n}$  – діаметр манжет поршня до його запасування в трубопроводі);

$\Delta R$  – абсолютне стиснення манжет поршня, яке рівне

$$\Delta R = \frac{D_{m.n} - D_{в.с}}{2}. \quad (2.8)$$

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

$$\sigma = \frac{F_H}{S}, \quad (2.9)$$

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

$$S = D_{в.с} h_m, \quad (2.10)$$

де  $h_m$  – товщина манжети поршня.

Тоді підставивши (2.6), (2.7), (2.8) і (2.10) в (2.9) отримаємо

$$F_H = Eh_m D_{e.c} \frac{D_{m.n} - D_{e.c}}{D_{m.n}}. \quad (2.11)$$

Підставивши (2.11) в (2.5) отримаємо формулу для розрахунку сили механічного тертя манжет поршня до стінок сталевго трубопроводу

$$F_{Tm.n} = n_{m.n} f_{m.n} Eh_m D_{e.c} \frac{D_{m.n} - D_{e.c}}{D_{m.n}}. \quad (2.12)$$

Сила тертя поліетиленової труби до сталевго

$$F_{Tn.mp} = f_{n.mp} q_{n.mp} L, \quad (2.13)$$

де  $f_{n.mp}$  – коефіцієнт тертя ковзання поліетилену до сталі (знаходиться в діапазоні 0,1...0,2);

$q_{n.mp}$  – рівномірно розподілене навантаження від власної ваги поліетиленового трубопроводу;

$L$  – довжина реконструйованого трубопроводу.

Рівномірно розподілене навантаження від власної ваги поліетиленового трубопроводу

$$q_{n.mp} = g \rho_n \frac{\pi (D_{z.n}^2 - D_{e.n}^2)}{4}, \quad (2.14)$$

де  $\rho_n$  – густина поліетилену;

$D_{z.n}$  – зовнішній діаметр поліетиленової труби;

$D_{e.n}$  – внутрішній діаметр поліетиленової труби.

Підставивши (2.14) в (2.13) отримаємо формулу для розрахунку сили тертя поліетиленової труби до сталевго



$$F_{Tn.mp} = f_{n.mp} g \rho_n \frac{\pi(D_{з.н}^2 - D_{в.н}^2)}{4} L. \quad (2.15)$$

Сила тертя поліетиленової труби в манжетах ущільнювальної системи

$$F_{Ty.c} = n_{м.у.с} \pi D_{з.н} B P_{к} f_{y.c}, \quad (2.16)$$

де  $n_{м.у.с}$  – кількість манжет в ущільнювальній системі;

$B$  – ширина контакту манжети з поліетиленовим трубопроводом;

$P_{к}$  – контактний тиск, який виникає під час протягування поліетиленового трубопроводу манжетами ущільнювальної системи (знаходиться в діапазоні 0,5...0,9 МПа);

$f_{y.c}$  – коефіцієнт тертя поліетилену до гуми (знаходиться в діапазоні 0,1...0,13).

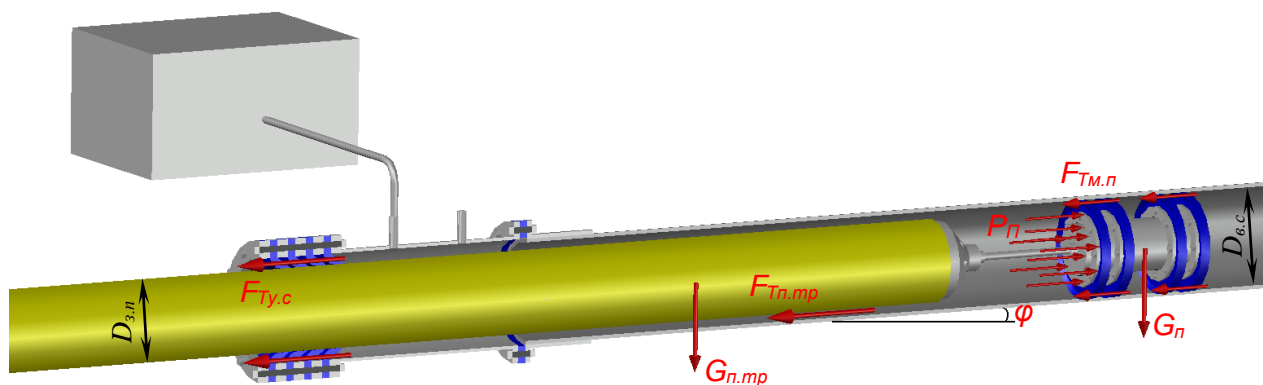
Підставивши (2.12), (2.15), (2.16) в (2.4) отримаємо

$$P_{\Pi} \frac{\pi D_{в.с}^2}{4} - n_{м.л} f_{м.л} E h_{м} D_{в.с} \frac{D_{м.н} - D_{в.с}}{D_{м.н}} - f_{n.mp} g \rho_n \frac{\pi(D_{з.н}^2 - D_{в.н}^2)}{4} L - n_{м.у.с} \pi D_{з.н} B P_{к} f_{y.c} = 0. \quad (2.17)$$

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

$$P_{\Pi} = \frac{4 \left( n_{м.л} f_{м.л} E h_{м} D_{в.с} \frac{D_{м.н} - D_{в.с}}{D_{м.н}} + f_{n.mp} g \rho_n \frac{\pi(D_{з.н}^2 - D_{в.н}^2)}{4} L + n_{м.у.с} \pi D_{з.н} B P_{к} f_{y.c} \right)}{\pi D_{в.с}^2}. \quad (2.18)$$

На похилих ділянках траси на поршень і прикріплений до нього поліетиленовий трубопровід діють значні гравітаційні сили (рисунок 2.2). Причому, якщо на висхідних ділянках траси сила тяжіння спричиняє опір рухові поршню і прикріпленому до нього поліетиленовому трубопроводу, тобто є гальмівною силою, то на низхідних ділянках сила тяжіння є рухомою силою.



**Рисунок 2.2** – Розрахункова схема протягування поршнем поліетиленового трубопроводу похилою ділянкою трубопроводу

На похилих ділянках траси рівняння (2.4) матиме вигляд

$$\sum_{i=1}^n F_n = P_{II} \frac{\pi D_{6,c}^2}{4} - F_{Tm,n} - F_{Tn,mp} - F_{Ty,c} - G_n \sin \varphi - G_{n,mp} \sin \varphi = 0, \quad (2.19)$$

де  $G_n$  – сила тяжіння поршня;

$G_{n,mp}$  – сила тяжіння поліетиленового трубопроводу;

$\varphi$  – кут нахилу сталевого трубопроводу до горизонту.

Сила тяжіння поршня

$$G_n = m_n g \sin \varphi, \quad (2.20)$$

де  $m_n$  – маса поршня.

Сила тяжіння поліетиленового трубопроводу

$$G_{n,mp} = q_{n,mp} L \sin \varphi = g \rho_n \frac{\pi (D_{3,n}^2 - D_{6,n}^2)}{4} L \sin \varphi. \quad (2.21)$$

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

$$P_{II} = \frac{4 \left( n_{m,n} f_{m,n} E h_m D_{6,c} \frac{D_{m,n} - D_{6,c}}{D_{m,n}} + n_{m,y,c} \pi D_{3,n} B P_{\kappa} f_{y,c} + m_n g \sin \varphi + g \rho_n \frac{\pi (D_{3,n}^2 - D_{6,n}^2)}{4} L (f_{n,mp} + \sin \varphi) \right)}{\pi D_{6,c}^2}. \quad (2.22)$$

2.2 Дослідження газодинамічних процесів у трубопроводі під час його безтраншейної реконструкції протягуванням поршнем нового поліетиленового трубопроводу в зношений сталевий

При великій довжині реконструйованого сталевого трубопроводу, щоб дослідити процес протягування поліетиленового трубопроводу в зношений сталевий поршнем, визначити, яким повинен бути тиск на виході компресора для його підбору, треба враховувати сили, які діють на поршень, що зроблено в підрозділі 2.1, та втрати енергії під час руху повітря міжтрубним простором, оскільки, на величину необхідного тиску на виході компресора впливають втрати тиску вздовж трубопроводу від компресора до поршня.

Створення і реалізація математичної моделі руху твердих тіл трубопроводами під тиском є складною задачею. Досліджень газодинамічних процесів у трубопроводі під час його безтраншейної реконструкції протягуванням поршнем нового поліетиленового трубопроводу в зношений сталевий не виконувалось.

Нестаціонарний характер руху повітря в міжтрубному просторі між рухомим новим поліетиленовим і зношеним сталевим трубопроводом, які мають різну шорсткість стінки, та складні динамічні і кінематичні процеси зумовлені рухом поршня створюють труднощі в побудові та реалізації математичних моделей.

Потрібно виконати моделювання нестаціонарних газодинамічних процесів в міжтрубному просторі, зумовлених рухом поршня зношеним сталевим трубопроводом з прикріпленим до нього новим поліетиленовим трубопроводом.

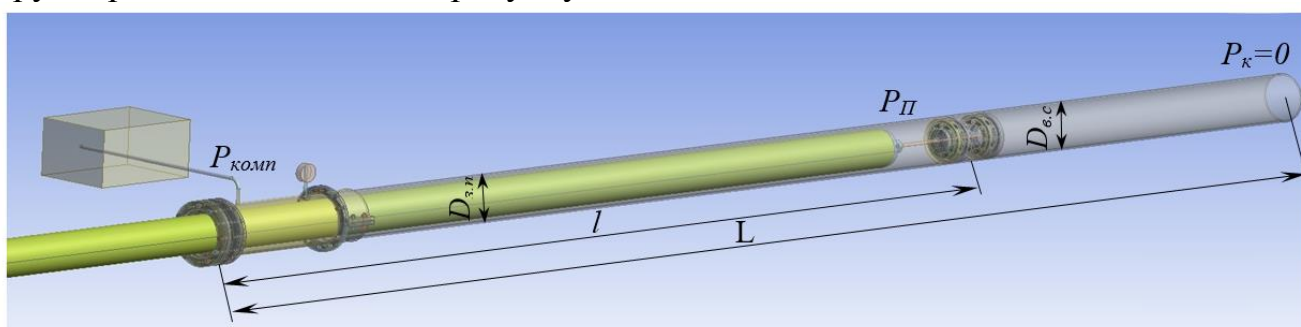
Ізотермічний характер руху повітря в міжтрубному та запоршневому просторі може бути змодельований фундаментальними рівняннями газової динаміки, а саме рівняння Нав'є – Стокса (2.23), яке виражає собою закон збереження імпульсу, і нерозривності потоку (2.24), яке виражає собою закон збереження маси

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \bar{u}_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \bar{u}_i \bar{u}_j) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \mu \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \right) + \bar{f}_i, \quad (2.23)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + c^2 \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j) = 0, \quad (2.24)$$

де  $x_i, x_j$  – координати;  $t$  – час;  $\bar{u}_i, \bar{u}_j$  – компоненти швидкості;  $\rho$  – густина газу;  $\mu$  – молекулярна динамічна в'язкість газу;  $\bar{f}_i$  – доданок, який враховує дію масових сил;  $\bar{p}$  – сили тиску;  $c$  – швидкість звуку у повітрі. [88–90]

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 рисунку 2.3.



**Рисунок 2.3** – Розрахункова схема газодинамічних процесів під час протягування поршнем поліетиленового трубопроводу дефектним сталевим

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  $P_{комп}$ , а в кінці сталевго трубопроводу і перед поршнем рівний нулю;

– тиск на поршень визначається силою тертя манжет поршня до стінок сталевго трубопроводу, силою тертя поліетиленової труби до сталевго, силою тертя поліетиленової труби в манжетах ущільнювальної системи;

– треба дослідити динаміку руху поршня  $l(t)$  в часі та динаміку руху повітря в міжтрубному та запоршневому просторі;

– вважається, що швидкість руху поршня рівна лінійній швидкості руху повітря в перерізі, де поршень контактує з повітрям.

Щоб реалізувати поставлену задачу початкові умови для рівнянь (2.23) і (2.24) будуть

$$P_{комп} = 0, \quad (2.25)$$

$$P_{\kappa} = 0. \quad (2.26)$$

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

$$P_{комп}(0, t) = P_{комп}, \quad (2.27)$$

$$P_{\kappa}(L, t) = 0. \quad (2.28)$$

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

$$v_1(l, t) = \frac{dl}{dt}, \quad (2.29)$$

де  $v_1$  – лінійна швидкість повітря за поршнем.

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

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

Оскільки швидкість поршня у початковий момент руху дорівнює швидкості повітря  $w_0$ , то шлях, пройдений поршнем за проміжок часу  $\Delta t$ , дорівнює

$$l_0 = w_0 \Delta t. \quad (2.30)$$

Реалізувати такий алгоритм з врахуванням різної шорсткості внутрішньої стінки сталевого зношеного трубопроводу та зовнішньої стінки нового поліетиленового трубопроводу, руху поршня та прикріпленого до нього поліетиленового трубопроводу можна комп'ютерним моделюванням тривимірних турбулентних течій у програмному комплексі ANSYS Fluent R19.1 Academic з застосуванням динамічних сіток. [16, 91 –93]

Програмний комплекс ANSYS Fluent базується на рівняннях Нав'є – Стокса (2.23) і нерозривності потоку (2.23), замкнених широко відомою двопараметричною  $k - \varepsilon$  моделлю турбулентності Лаундера-Шарма із застосуванням пристінної функції з відповідними початковими (2.25), (2.26) і граничними (2.27), (2.28) умовами.

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

– рівняння кінетичної енергії турбулентного потоку  $k$

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla(\rho u k) = \nabla \left( \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right) + \mu_t G - \rho \varepsilon; \quad (2.31)$$

– рівняння дисипації турбулентної кінетичної енергії  $\varepsilon$

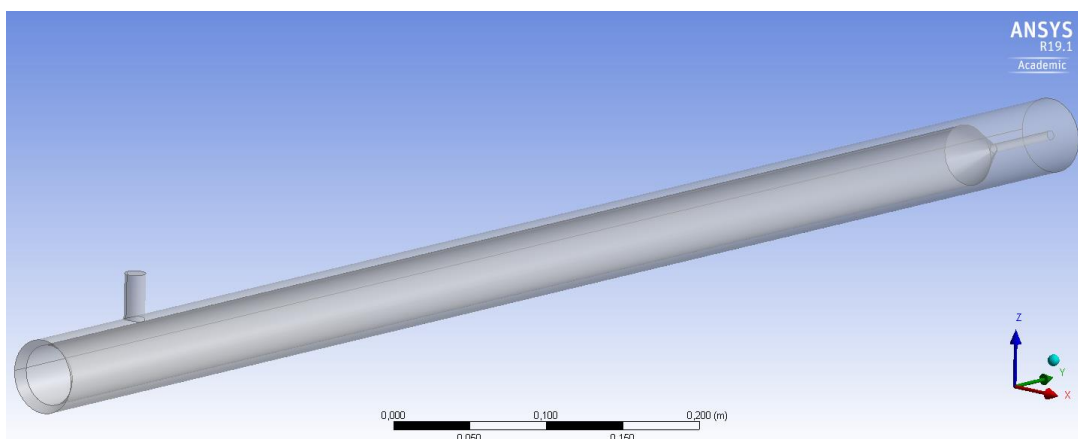
$$\frac{\partial(\rho\varepsilon)}{\partial t} + \nabla(\rho u\varepsilon) = \nabla\left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\nabla\varepsilon\right) + C_1\frac{\varepsilon}{k}\mu_t G - C_2\rho\frac{\varepsilon^2}{k}, \quad (2.32)$$

де  $u$  – швидкість потоку газу;  $\mu_t$  – турбулентна динамічна в'язкість газу;  $\sigma_k$  – коефіцієнт, який рівний одиниці;  $G$  – розрахунковий параметр;  $\sigma_\varepsilon$  – коефіцієнт, який рівний  $\sigma_\varepsilon=1,3$ ;  $C_1$  – коефіцієнт, який рівний  $C_1=1,44$ ;  $C_2$  – коефіцієнт, який рівний  $C_2=1,92$ . [94–97]

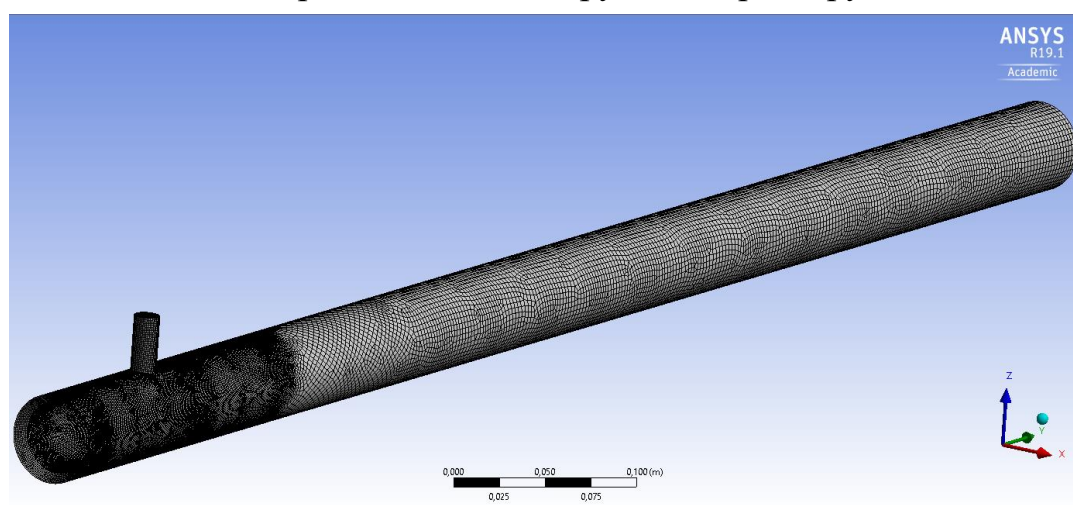
Модель турбулентності  $k-\varepsilon$  є так званою "високореїнольдсовою" моделлю, створеною на основі методу усереднення рівнянь Нав'є-Стокса і призначена для розрахунку турбулентних процесів.

Тривимірні модель заборшневого та міжтрубного простору між дефектним сталевим трубопроводом та новим поліетиленовим, де відбувається складний турбулентний рух потоку повітря, була змодельована в системі автоматизованого проектування і креслення AutoCAD, зберігались з розширенням AutoCAD (.iges) та імпортувались у програмний комплекс ANSYS Fluent (рисунок 2.4). Причому модель була змодельована з простором у середині патрубку, яким повітря подається від компресора в сталевий трубопровід.

Для моделювання потоку повітря в препроцесорі Fluent – Meshing генерувалась об'ємна розрахункова сітка Hex Dominant – об'єм заповнювався гексаєдричними 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. У місці приєднання патрубка до сталевих трубопроводу виконувалось подрібнення сітки для кращого візуалізування потоку в цій зоні до розміру елементів сітки – 0,001 м (рисунок 2.5). Для такого розміру елементів сітки результати розрахунку були якісно візуалізовані, а час розрахунку складав близько півтори години.



**Рисунок 2.4** – Імпортована в програмний комплекс ANSYS Fluent модель запоршневого та міжтрубного простору



**Рисунок 2.5** – Розрахункова об'ємна сітка

Відкриваючи програму ANSYS Fluent задавались подвійною точністю. В програмі ANSYS Fluent було вибрано нестационарний процес та стандартну двопараметричну  $k-\varepsilon$  модель турбулентності. Дана модель має три модифікації (стандартна, RNG і Realizable). В полі опцій моделей турбулентності було вибрано модифікацію Realizable.

Модель турбулентності  $k-\varepsilon$  не дає змогу повною мірою змодельовати ефекти, які відбуваються поблизу стінок. Тому для якісного моделювання течій поблизу стінки в програмі ANSYS Fluent застосовуються пристінні функції. Вибиралась пристінна функція Enhanced Wall treatment – розширене пристінне моделювання.



З бази даних матеріалів ANSYS Fluent вибиралось повітря і присвоювалось розрахунковій сітці. Для розв'язання задач газодинаміки треба враховувати стискуваність повітря. Тому задавалась залежність густини повітря від параметрів потоку. Для цього в меню Materials в списку Density вибирався пункт Real-gas. Пори цьому до розв'язуваних рівнянь автоматично додається рівняння енергії (Energy) і під час задавання граничних умов треба задавати температуру повітря.

Для дослідження динаміку руху повітря міжтрубним і запоршневим простором задавались наступні граничні умови. На вході в міжтрубний простір задавалась масова витрата Mass flow inlet. Крім задавання масової витрати на вході в вікні Mass flow inlet задавалась інтенсивність турбулентності (Intensity) 5 %, гідравлічний діаметр (Hydraulic Diameter) і температура повітря на вході.

Також задавалась гранична умова стінка (Wall). Для внутрішньої стінки сталевого зношеного трубопроводу задавався коефіцієнт еквівалентної шорсткості труби  $h_{s,c} = 0,75 \text{ мм}$ , а для зовнішньої стінки нового поліетиленового трубопроводу  $h_{s,n} = 0,007 \text{ мм}$ .

Внутрішній діаметр сталевого трубопроводу приймався рівним  $D_{e,c} = 49 \text{ мм}$ , зовнішній діаметр поліетиленової труби  $D_{z,n} = 40 \text{ мм}$ . Внутрішній діаметр патрубку, яким повітря подається від компресора в міжтрубний простір  $D_{e,nam} = 14 \text{ мм}$  і він рівний гідравлічному діаметру на вході, 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 умови на вході (рисунок 2.6):

- масова витрата повітря  $M_{ex} = 0,00645 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$ ;
- інтенсивність турбулентності 5 %;
- гідравлічний діаметр  $D_{ex} = 0,014 \text{ м}$ ;
- температура повітря  $T_{ex} = 293 \text{ К}$ .

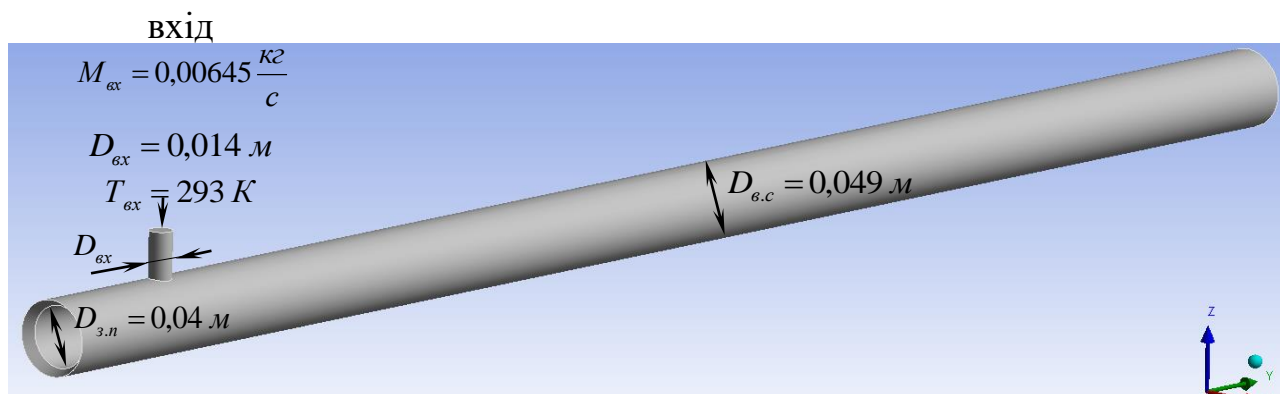
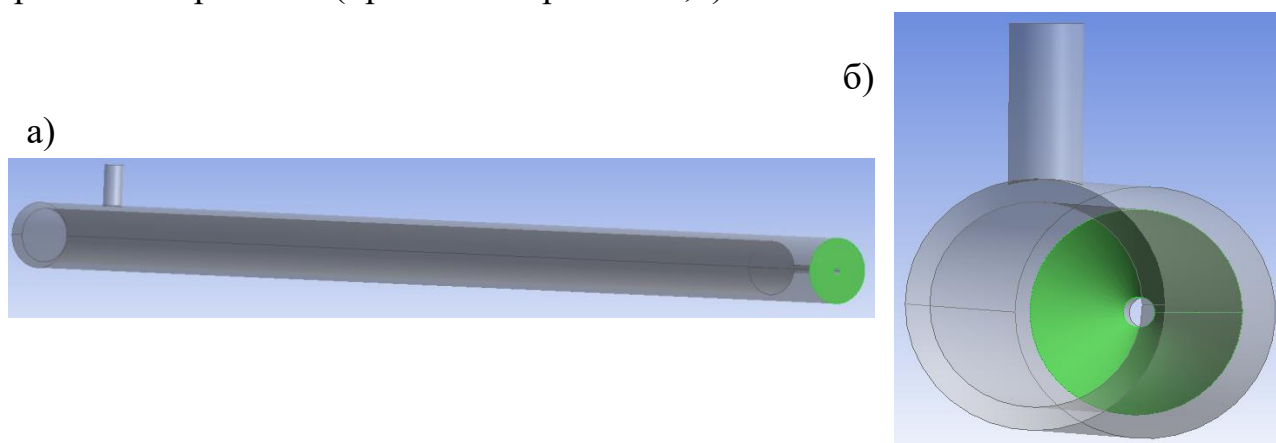


Рисунок 2.6 – Розрахункова схема

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 у 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.

Для задавання динамічної моделі руху сітки і її основних параметрів у меню ANSYS Fluent було вибрано опцію Dynamic Mesh. У полі опцій моделі Dynamic Mesh 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 (рисунок 2.7, а), ґратки сітки повинні додаватись, а від грані, яка є внутрішньою поверхнею прикріпленого до поліетиленового трубопроводу оголовка (рисунок 2.7, б) – видалятись. У вкладці Options динамічної сітки Layering задавалось висота на яку буде додаватись рядок

граток Split factor (приймалась рівною 0,2) та висота на яку буде видалятися рядок гратки Collaps factor (приймалась рівною 0,2).



а) – задана грань, яка є задньою частиною поршня; б) – задана грань, яка є внутрішньою поверхнею прикріпленого до поліетиленового трубопроводу оголовка

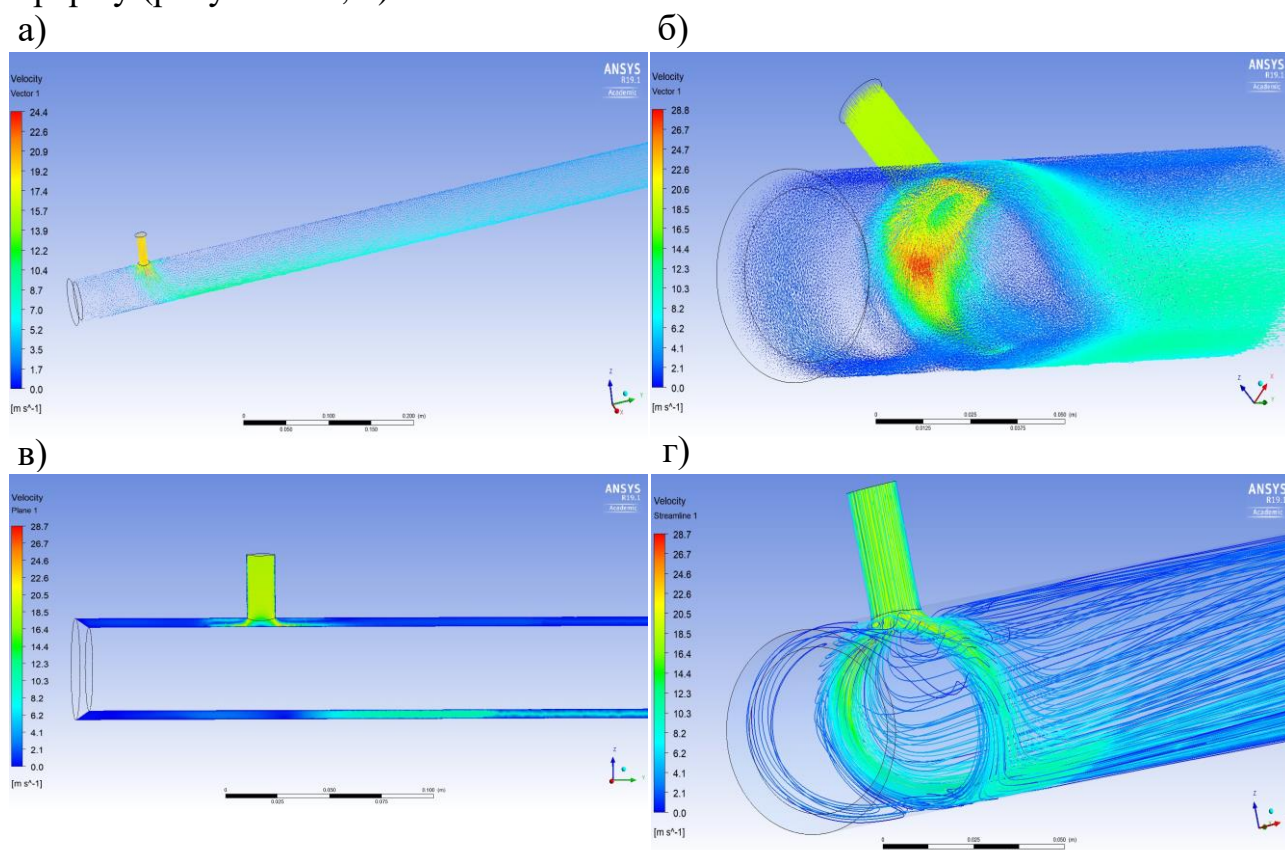
**Рисунок 2.7** – Схема задавання рухомих граней

Після задавання динамічної моделі руху сітки налаштовувались параметри вирішувача. У дереві проекту вибиралась вкладка Solution methods, де в зоні Pressure-Velocity Coupling вибирався алгоритм зв'язку рівняння руху повітря і нерозривності. Вибирався алгоритм Coupled, який вважається окремим видом вирішувача Pressure-based coupled. Для зв'язування полів швидкості і тиску застосовується алгоритм розщеплення, а для решти параметрів – алгоритм установлення. Цей алгоритм дає змогу отримати якісні стійкі результати практично для усіх класів задач. Для покращення стійкості розв'язування число Куранта (Courant number) треба зменшити до 50. Також під час налаштування параметрів вирішувача для всіх рівнянь вибирався другий порядок точності.

Після налаштування параметрів вирішувача здійснювалась гібридна ініціалізація.

Повна збіжність ітераційного процесу досягалась приблизно за однакову кількість ітерацій – 300. Така кількість ітерацій виконувалась близько півтори години процесором intel core i3, (частота 2,2 ГГц, оперативної пам'яті 4 ГБ).

Результати моделювання були візуалізовані в постпроцесорах програмних комплексів ANSYS Fluent, ANSYS CFX, що дало змогу побачити структуру потоку повітря в міжтрубному та запоршневому просторі під час протягування поршнем нового поліетиленового трубопроводу зовнішнім діаметром 40 мм в дефектний сталевий і зібрати вичерпні дані про нього. Було побудовано вектори швидкості (рисунок 2.8, а, б), поля швидкості в площині вертикального повздовжнього перерізу (рисунок 2.8, в), лінії течії (рисунок 2.8, г), поля тиску на контурах (рисунок 2.9, а) та поля тиску в площині вертикального повздовжнього перерізу (рисунок 2.9, б).



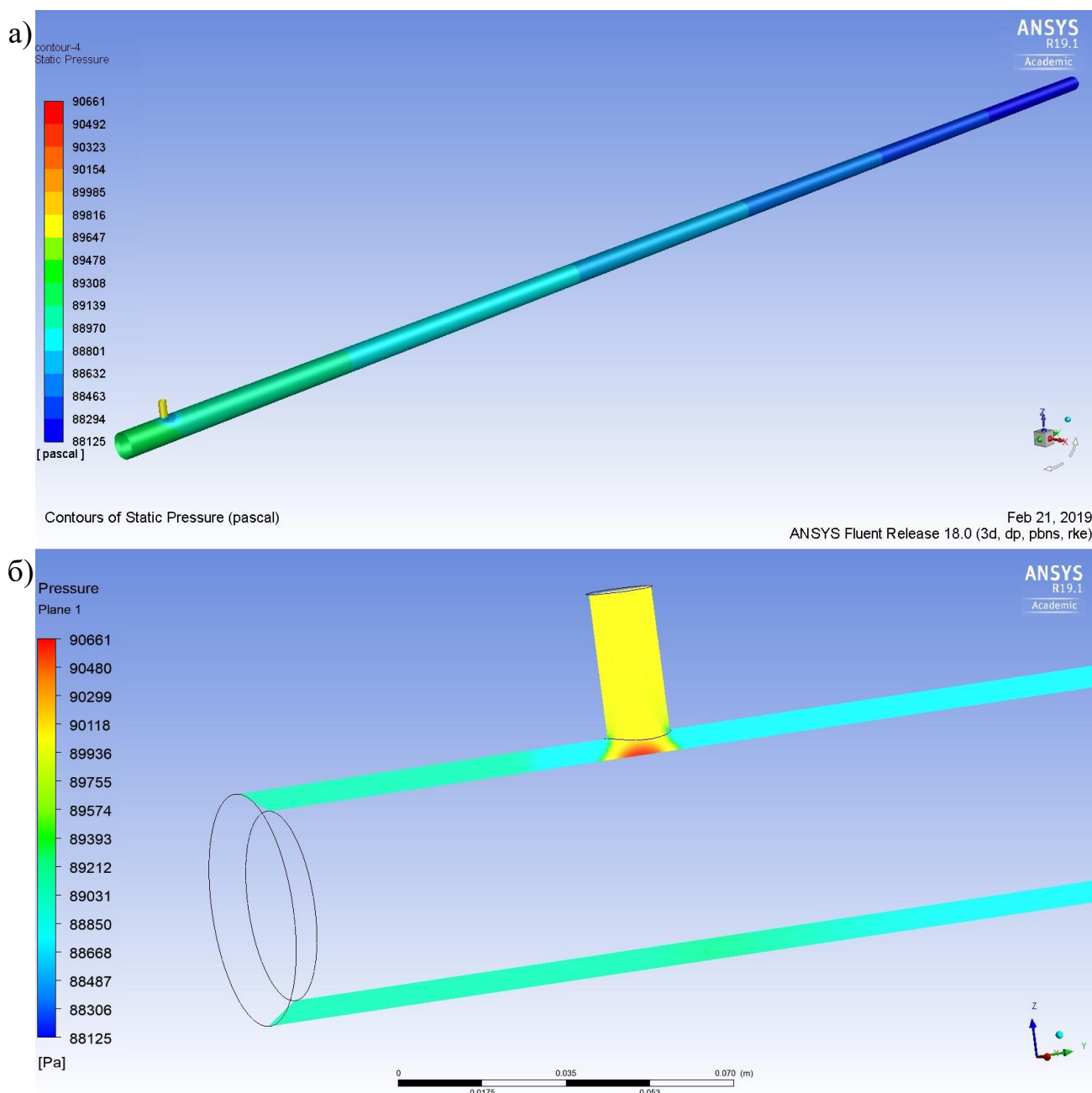
а), б) – вектори швидкості; в) – поля швидкості в площині вертикального повздовжнього перерізу; г) – лінії течії

**Рисунок 2.8** – Результати моделювання швидкості руху повітря в міжтрубному просторі під час протягування поршнем нового поліетиленового трубопроводу зовнішнім діаметром 40 мм в зношений сталевий

За результатами розрахунку в програмному комплексі ANSYS Fluent (рисунок 2.8, г) 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 зношений сталевий трубопровід у якому протягується поліетиленовий трубопровід. В зношеному сталевому трубопроводі потік повітря спрямовується на зовнішню поверхню поліетиленового трубопроводу, який протягується поршнем, у результаті чого розходиться в різні сторони на кут  $360^\circ$ . При цьому в центрі такого розходження навпроти вхідного патрубка відбувається сповільнення потоку повітря до 12 м/с, а на краях (за межами вхідного патрубка) пришвидшення до 24,5 м/с (рисунок 2.8, б). Після такого розходження потоку повітря в міжтрубному просторі основна частина потоку повітря перетікає бічною частиною міжтрубного простору до низу (рисунок 2.8, б, г), 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 (рисунок 2.8, а). Біля верхньої частини труби за вхідним патрубком швидкість течії є незначною і складає біля 1 м/с (рисунок 2.8). На віддалі біля 3 м від вхідного патрубка швидкість потоку в поперечному перерізі міжтрубного простору вирівнюється і складає біля 1,7 м/с.

Як видно з полів тиску (рисунок 2.9, а, б), тиск у міжтрубному і запоршневому просторі під час протягування 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 (рисунок 2.9, б), а довкола вхідного патрубка тиск падає до 88461 Па (рисунок 2.9, а). 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 за поршнем 88125 Па. Втрати тиску на тертя до стінок зношеної сталевий труби та рухомої нової поліетиленової труби в міжтрубному просторі, якщо довжина протягнутої ділянки труби  $L=4$  м, складають 1477 Па.



а) – поля тиску на контурах;

б) – поля тиску в площині вертикального повздовжнього перерізу

**Рисунок 2.9** – Результати моделювання розподілу тиску в міжтрубному просторі під час протягування поршнем нового поліетиленового трубопроводу зовнішнім діаметром 40 мм у дефектний сталевий

Оскільки була задана динамічна модель руху сітки і моделювався рух поршня та прикріпленого до нього поліетиленового трубопроводу то втрати тиску в міжтрубному просторі визначались для різної довжини протягнутої ділянки

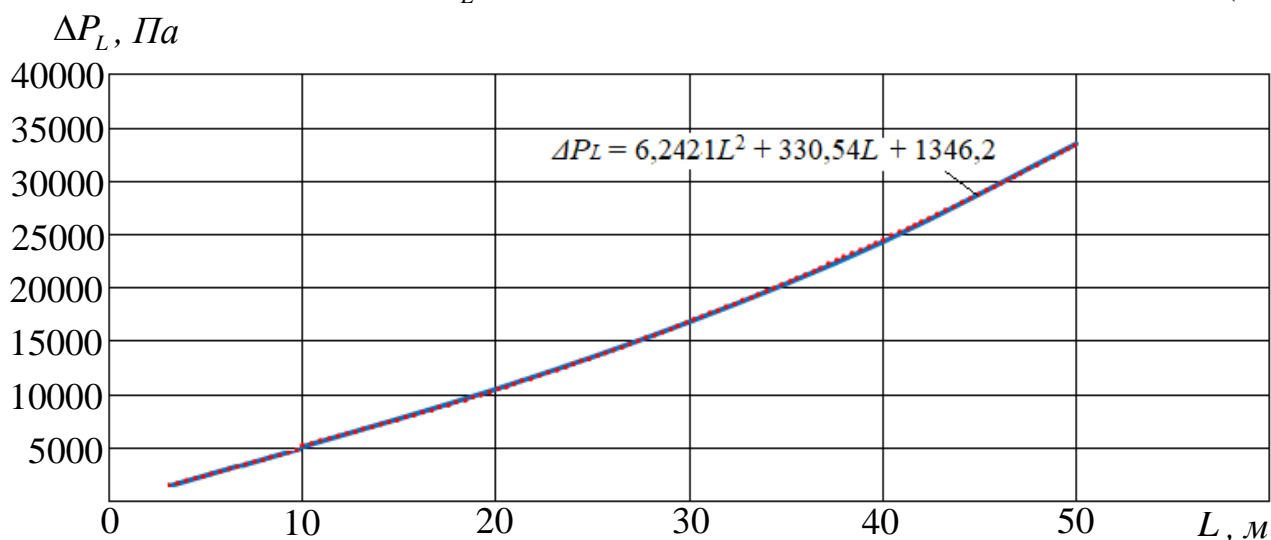
поліетиленової труби зовнішнім діаметром 40 мм. Результати такого моделювання занесені в таблицю 2.1 та подані графічно (рисунок 2.10).

**Таблиця 2.1** – Результати моделювання втрат тиску в міжтрубному просторі

$L, \text{ м}$	4	10	20	30	40	50
$\Delta P_L, \text{ Па}$	1477	5237	10676	16897	24387	33560

Як бачимо (рисунок 2.10) з збільшенням довжини протягнутої ділянки поліетиленового трубопроводу збільшуються втрати тиску в міжтрубному просторі. Оскільки втрати тиску в міжтрубному просторі відбуваються за нелінійною залежністю було побудовано лінію тренду і за нею було визначено рівняння залежності втрат тиску в міжтрубному просторі вздовж трубопроводу від компресора до рухомого поршня, які є одним з доданків в (2.1), від довжини протягнутої ділянки поліетиленового трубопроводу зовнішнім діаметром 40 мм

$$\Delta P_L = 6,242L^2 + 330,5L + 1346,2. \quad (2.33)$$



**Рисунок 2.10** – Залежність втрат тиску в міжтрубному просторі від довжини протягнутої поршнем ділянки поліетиленового трубопроводу зовнішнім діаметром 40 мм

Підставивши (2.18) та (2.33) в (2.1) отримуємо рівняння для розрахунку необхідного тиску на виході компресора, щоб поршень протягнув новий поліетиленовий трубопровід зовнішнім діаметром 40 мм усією довжиною зношеного сталевого

$$P_{\text{комп}} = \frac{4 \left( n_{\text{м.н}} f_{\text{м.н}} E h_{\text{м}} D_{\text{в.с}} \frac{D_{\text{м.н}} - D_{\text{в.с}}}{D_{\text{м.н}}} + f_{\text{н.мп}} g \rho_n \frac{\pi (D_{\text{з.н}}^2 - D_{\text{в.н}}^2)}{4} L + n_{\text{м.у.с}} \pi D_{\text{з.н}} B P_{\text{к}} f_{\text{у.с}} \right)}{\pi D_{\text{в.с}}^2} + 6,242L^2 + 330,5L + 1346,2. \quad (2.34)$$

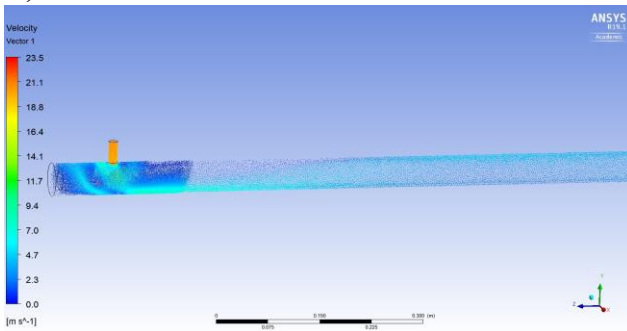
Аналогічне моделювання в програмному комплексі ANSYS Fluent R19.1 Academic з застосуванням динамічних сіток було виконано для внутрішнього діаметра сталевих трубопроводу  $D_{\text{в.с}} = 49 \text{ мм}$  та зовнішнього діаметра поліетиленової труби  $D_{\text{з.н}} = 32 \text{ мм}$ . Результати моделювання були візуалізовані в постпроцесорах програмних комплексів ANSYS Fluent, ANSYS CFX, що дало змогу побачити структуру потоку повітря в міжтрубному та запоршневому просторі під час протягування поршнем нового поліетиленового трубопроводу зовнішнім діаметром 32 мм в дефектний сталевий і зібрати вичерпні дані про нього. Було побудовано вектори швидкості (рисунок 2.11, а, б), поля швидкості в площині вертикального повздовжнього перерізу (рисунок 2.11, в), лінії течії (рисунок 2.11, г), поля тиску на контурах (рисунок 2.12, а) та поля тиску в площині вертикального повздовжнього перерізу (рисунок 2.12, б).

За результатами розрахунку в програмному комплексі ANSYS Fluent (рисунок 2.11, з) було визначено, що у вхідному патрубку швидкість потоку повітря вздовж осі складає 20,1 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  $360^\circ$ . При цьому в центрі такого розходження

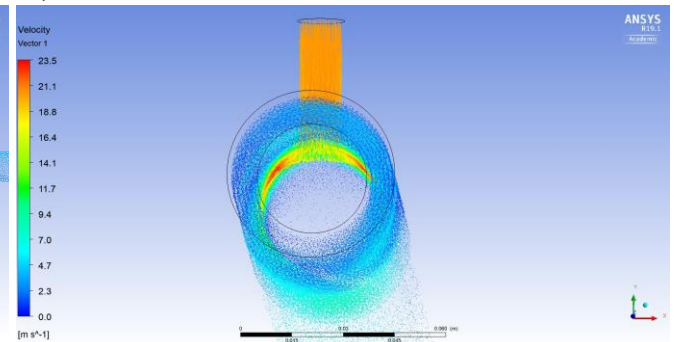


навпроти вхідного патрубка відбувається сповільнення потоку повітря до 5,2 м/с, а на краях

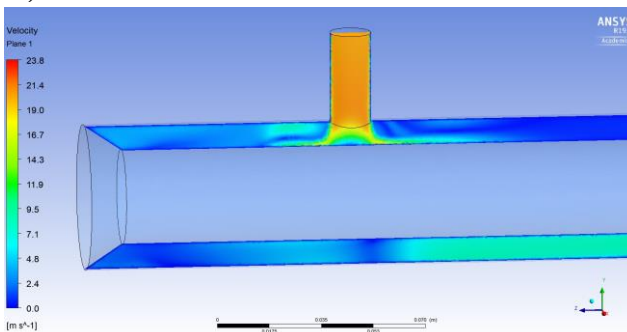
а)



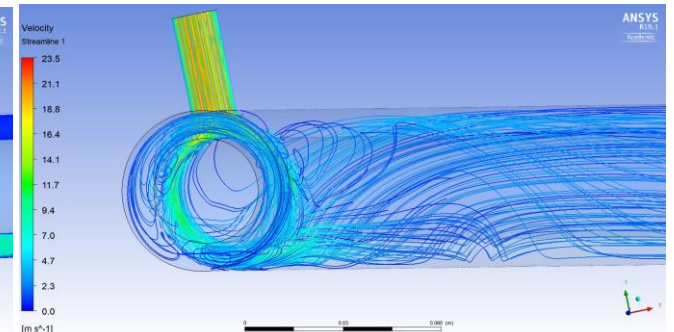
б)



в)



г)

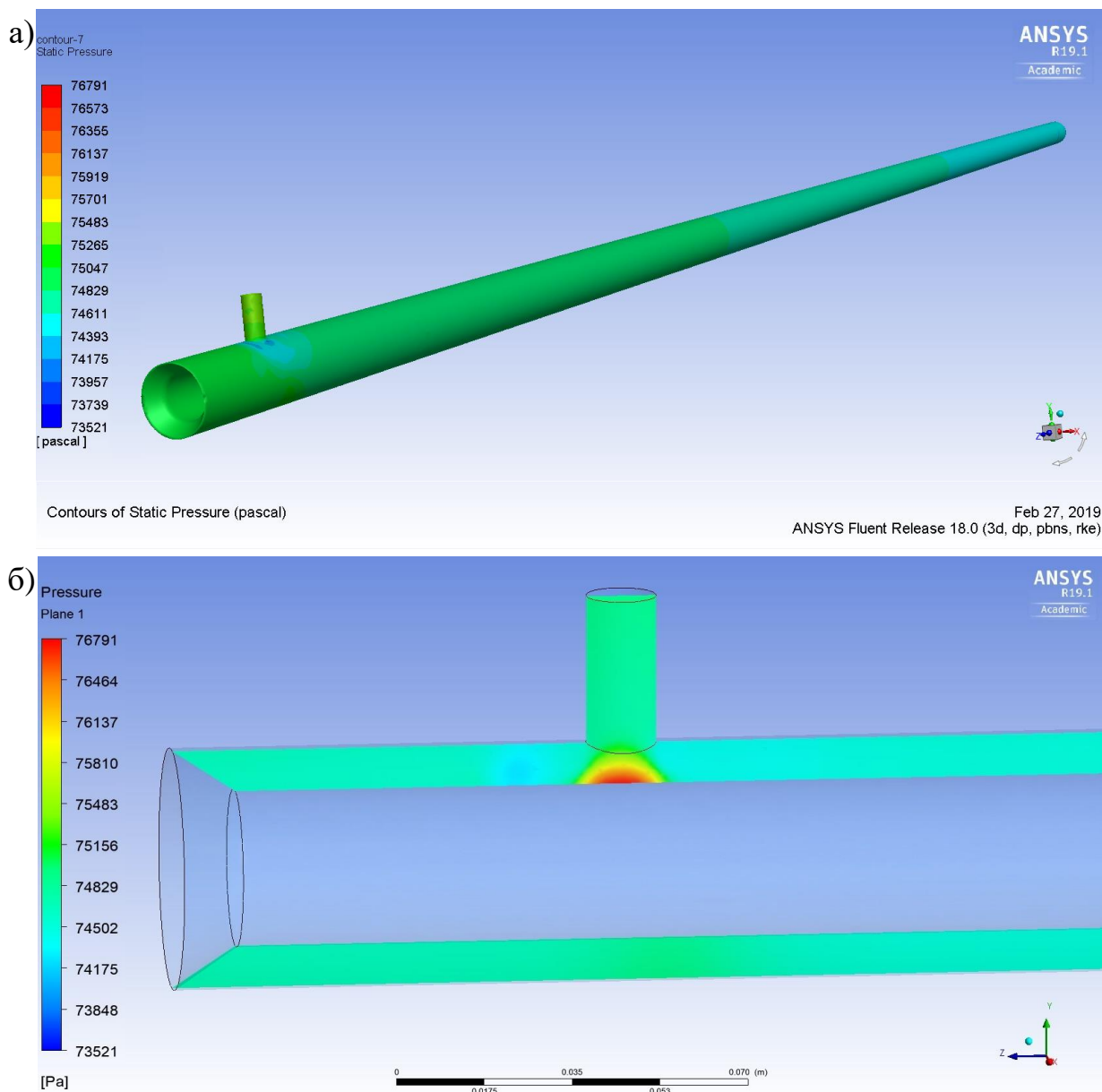


а), б) – вектори швидкості; в) – поля швидкості в площині вертикального поперечного перерізу; г) – лінії течії

**Рисунок 2.11** – Результати моделювання швидкості руху повітря в міжтрубному просторі під час протягування поршнем нового поліетиленового трубопроводу зовнішнім діаметром 32 мм в дефектний сталевий

(за межами вхідного патрубка) пришвидшення до 23,5 м/с (рисунок 2.11, б). Після такого розходження потоку повітря в міжтрубному просторі основна частина потоку повітря перетікає бічною частиною міжтрубного простору до низу (рисунок 2.11, б, г), де швидкість потоку складає 14,4 м/с. Далі більша частина потоку рухається вздовж нижньої частини труби в напрямку протягування з швидкістю біля 7 м/с, яка вздовж міжтрубного простору зменшується (рисунок 2.11, а). Біля верхньої частини труби за вхідним патрубком швидкість течії є незначною і складає біля 1 м/с (рисунок 2.11). На віддалі біля 3 м від вхідного патрубка швидкість потоку в поперечному перерізі міжтрубного простору вирівнюється і складає біля 2 м/с.

Як видно з полів тиску (рисунок 2.12, а, б), тиск в міжтрубному і запоршневому просторі під час протягування нового поліетиленового трубопроводу в дефектний



а) – поля тиску на контурах; б) – поля тиску в площині вертикального повздовжнього перерізу

**Рисунок 2.12** – Результати моделювання розподілу тиску в міжтрубному просторі під час протягування поршнем нового поліетиленового трубопроводу зовнішнім діаметром 32 мм в дефектний сталевий

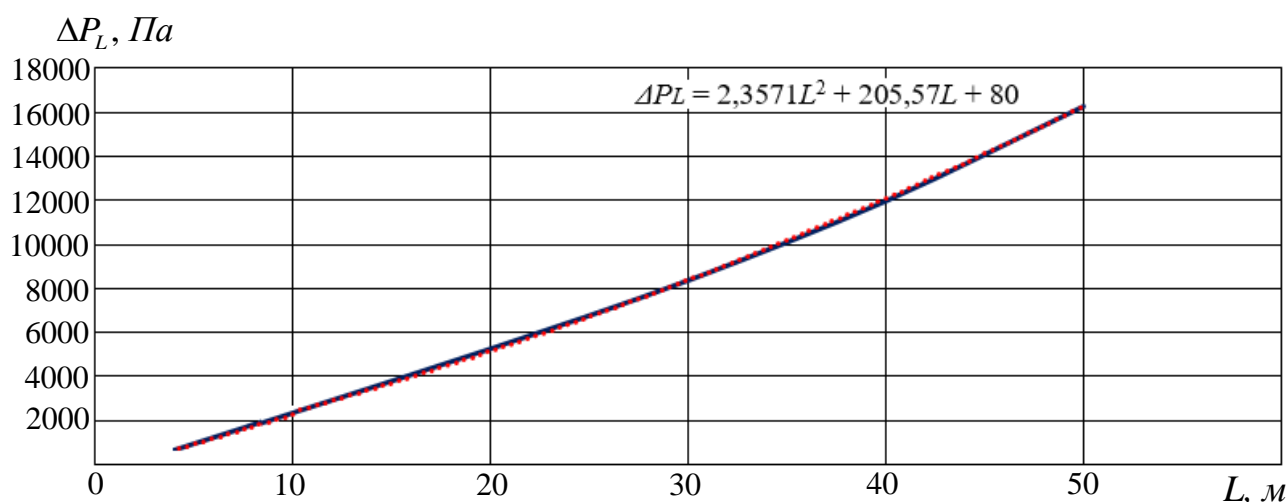
сталевий розподілений нерівномірно. У вхідному патрубку тиск складає 75270 Па. З полів тиску було помічено, що в міжтрубному просторі навпроти вхідного

патрубка відбувається збільшення тиску до 76791 Па (рисунок 2.12, б), а довкола вхідного патрубка тиск падає до 74230 Па (рисунок 2.12, а). 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 поліетиленового трубопроводу складає 75120 Па, а за поршнем 74190 Па. Втрати тиску на тертя до стінок зношеної сталевий труби та рухомої нової поліетиленової труби зовнішнім діаметром 32 мм у міжтрубному просторі, якщо довжина протягнутої ділянки труби  $L=4$  м, складають 930 Па.

Оскільки, була задана динамічна модель руху сітки і моделювався рух поршня та прикріпленого до нього поліетиленового трубопроводу зовнішнім діаметром 32 мм то втрати тиску в міжтрубному просторі визначались для різної довжини протягнутої ділянки поліетиленової труби. Результати такого моделювання занесені в таблицю 2.2 та подані графічно (рисунок 2.13).

**Таблиця 2.2** – Результати моделювання втрат тиску в міжтрубному просторі

$L, \text{ м}$	4	10	20	30	40	50
$\Delta P_L, \text{ Па}$	930	2320	5240	8360	11980	16300



**Рисунок 2.13** – Залежність втрат тиску в міжтрубному просторі від довжини протягнутої поршнем ділянки поліетиленового трубопроводу зовнішнім діаметром 32 мм

Як бачимо, (рисунок 2.13) з збільшенням довжини протягнутої ділянки поліетиленового трубопроводу збільшуються втрати тиску в міжтрубному просторі. Оскільки втрати тиску в міжтрубному просторі відбуваються за нелінійною залежністю було побудовано лінію тренду і за нею було визначено рівняння залежності втрат тиску в міжтрубному просторі вздовж трубопроводу від компресора до рухомого поршня, які є одним з доданків в (2.1), від довжини протягнутої ділянки поліетиленового трубопроводу зовнішнім діаметром 32 мм

$$\Delta P_L = 2,357L^2 + 205,57L + 80. \quad (2.35)$$

Підставивши (2.18) та (2.35) в (2.1) отримуємо рівняння для розрахунку необхідного тиску на виході компресора, щоб поршень протягнув новий поліетиленовий трубопровід зовнішнім діаметром 32 мм усією довжиною зношеного сталевого

$$P_{\text{комп}} = \frac{4 \left( n_{m,n} f_{m,n} E h_m D_{e,c} \frac{D_{m,n} - D_{e,c}}{D_{m,n}} + f_{n,mp} g \rho_n \frac{\pi (D_{3,n}^2 - D_{e,n}^2)}{4} L + n_{m,y,c} \pi D_{3,n} B P_{\kappa} f_{y,c} \right)}{\pi D_{e,c}^2} + 2,357L^2 + 205,57L + 80. \quad (2.36)$$

За (2.34) та (2.36) було виконано розрахунки необхідного тиску на виході компресора для протягування нового поліетиленового трубопроводу зовнішнім діаметром 32 мм та 40 мм усією довжиною реконструйованої ділянки зношеного сталевого трубопроводу. При цьому змінювалась довжина цієї реконструйованої ділянки  $L$ .

Розрахунки виконувались для поліетиленового трубопроводу зовнішнім діаметром 32 мм і товщиною стінки 4 мм та зовнішнім діаметром 40 мм і товщиною стінки 6 мм. Вихідні дані до розрахунку наступні: внутрішній діаметр сталевого трубопроводу  $D_{e,c} = 0,049$  м; кількість манжет поршня  $n_{m,n} = 4$ ; коефіцієнт тертя ковзання гумових манжет поршня до стінок сталевого

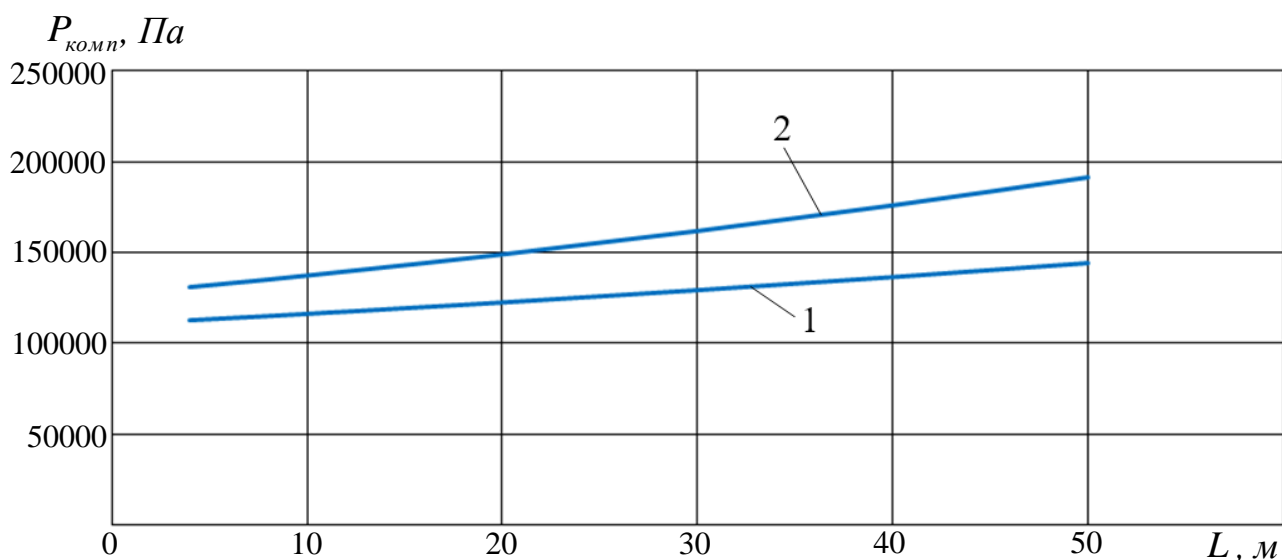
трубопроводу  $f_{m,n} = 0,6$ ; модуль пружності гуми  $E = 2 \text{ МПа}$ ; товщина манжети поршня  $h_m = 0,010 \text{ м}$ ; діаметр манжет поршня до його запасування в трубопроводі  $D_{m,n} = 0,051 \text{ м}$ ; коефіцієнт тертя ковзання поліетилену до сталі  $f_{n,mp} = 0,2$ ; густина поліетилену  $\rho_n = 970 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ ; кількість манжет в ущільнювальній системі  $n_{m,y.c} = 4$ ; ширина контакту манжети з поліетиленовим трубопроводом  $B = 0,003 \text{ м}$ ; контактний тиск, який виникає під час протягування поліетиленового трубопроводу манжетами ущільнювальної системи  $P_k = 0,8 \cdot 10^6 \text{ МПа}$ ; коефіцієнт тертя поліетилену до гуми  $f_{y.c} = 0,12$ .

Результати розрахунків наведені в таблиці 2.3 та подані графічно (рисунок 2.14).

**Таблиця 2.3** – Результати розрахунків необхідного тиску на виході компресора

$D_{z,n}$ , мм	$L$ , м					
	4	10	20	30	40	50
$P_{комп}$ , Па						
32	112711	116272	122584	129366	136618	144339
40	131060	137448	149093	161987	176130	191520

Як бачимо для реконструкції ділянки зношеного сталевго трубопроводу внутрішнім діаметром 49 мм довжиною до 50 м протягуванням поршнем нового поліетиленового трубопроводу потрібен незначний тиск – до 0,2 МПа, а отже ідею реконструкції трубопроводів газових і теплових мереж протягуванням поршнем нового поліетиленового трубопроводу в зношений сталевий можливо реалізувати, оскільки, можливо підібрати ущільнення міжтрубного простору, які будуть витримувати такий тиск, та компресор для виконання робіт.



1 – зовнішній діаметр поліетиленового трубопроводу 32 мм;

2 – зовнішній діаметр поліетиленового трубопроводу 40 мм

**Рисунок 2.14** – Залежність тиску на виході компресора від довжини реконструйованої ділянки зношеного сталевих трубопроводу

2.3 Дослідження процесу протягуванням поршнем рукава в зношений сталевий трубопровід

Щоб мінімізувати зменшення пропускної здатності реконструйованого зношеного сталевих трубопроводу максимальним наближенням до його внутрішньої стінки нового трубопроводу, реконструювати ділянки зношеного сталевих трубопроводу, які містять кути повороту до  $30^\circ$  застосовують рукави [98, 99].

Для встановлення можливості реалізувати ідею реконструкції трубопроводів газових і теплових мереж протягуванням поршнем нового рукава в зношений сталевий трубопровід треба дослідити цей процес. Треба визначити сили, які діють на поршень та втрати енергії під час руху повітря зношеним сталевим трубопроводом, яким протягується рукав [19]. Оскільки, на величину необхідного тиску на виході компресора впливають як сил опору, які діють на рухому систему, так і втрати тиску в зношеному сталевому трубопроводі від компресора до поршня, то тиск на виході компресора буде рівний

$$P_{\text{ком.р}} = P_{\text{п.р}} + \Delta P_{L.p}, \quad (2.37)$$

де  $P_{\text{п.р}}$  – тиск повітря в запоршневому просторі, який визначається силами опору, що діють на рухому систему під час протягування поршнем рукава;  
 $\Delta P_{L.p}$  – втрати тиску в сталевому трубопроводі, яким протягується рукав, під час руху ним повітря.

Вихідне рівняння руху поршня з прикріпленим до нього рукавом є таке ж, як і рівняння руху поршня з прикріпленим до нього поліетиленовим трубопроводом (2.2).

Поршень з прикріпленим до нього рукавом рухається під дією сили, яка спричинена тиском повітря в запоршневому просторі  $P_{\text{п.р}}$ . До сил опору, які діють на рухому систему на горизонтальних ділянках траси відноситься сила механічного тертя манжет поршня до стінок сталевго трубопроводу  $F_{T.m.n}$ , сила тертя рукава до сталевго труби  $F_{T.p}$ , сила тертя ковзання осей барабана на якому намотаний рукав  $F_{T.o.b}$  (рисунок 2.15). Тоді сума сил, які діють на рухому систему буде рівна

$$\sum_{i=1}^n F_n = P_{\text{п.р}} \frac{\pi D_{\text{в.с}}^2}{4} - F_{T.m.n} - F_{T.p} - F_{T.o.b}, \quad (2.38)$$

де  $D_{\text{в.с}}$  – внутрішній діаметр сталевго трубопроводу.

У разі рівномірного руху поршня

$$\sum_{i=1}^n F_n = P_{\text{п.р}} \frac{\pi D_{\text{в.с}}^2}{4} - F_{T.m.n} - F_{T.p} - F_{T.o.b} = 0. \quad (2.39)$$

Сила механічного тертя манжет поршня до стінок сталевго трубопроводу визначається за (2.5).

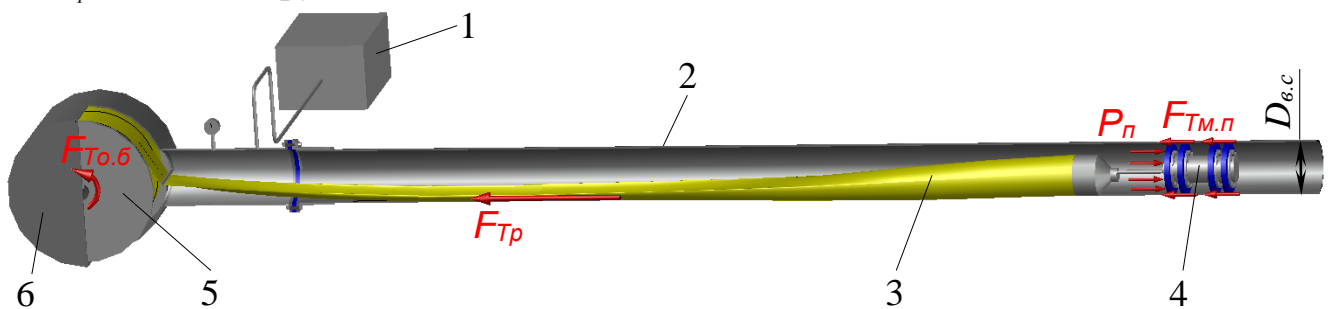
## Сила тертя рукава до сталевї труби

$$F_{Tp} = f_p q_p L_p, \quad (2.40)$$

де  $f_p$  – коефіцієнт тертя ковзання рукава до сталі;

$q_p$  – вага погонного метра рукава;

$L_p$  – довжина рукава.



1 – компресор; 2 – зношений сталевий трубопровід; 3 – протягуваний рукав; 4 – поршень; 5 – барабан; 6 – герметична циліндрична камера

**Рисунок 2.15** – Розрахункова схема протягування поршнем рукава горизонтальною ділянкою сталевого трубопроводу

## Сила тертя ковзання осей барабана на якому намотаний рукав

$$F_{To.б} = \frac{q_б f_{ков} r_{в.б}}{R_б}, \quad (2.41)$$

де  $q_б$  – вага барабана;

$f_{ков}$  – коефіцієнт тертя виступів барабана в пазах;

$r_{в.б}$  – радіус циліндричних виступів барабана;

$R_б$  – радіус осердя барабана.

Підставивши (2.5), (2.40), (2.41) в (2.39) отримаємо



$$P_{П.р} \frac{\pi D_{в.с}^2}{4} - n_{м.п} f_{м.п} E h_m D_{в.с} \frac{D_{м.п} - D_{в.с}}{D_{м.п}} - f_p q_p L_p - \frac{q_{\delta} f_{ков} r_{в.б}}{R_{\delta}} = 0. \quad (2.42)$$

Тоді необхідний тиск повітря в запоршневому просторі, щоб поршень з прикріпленим до нього рукавом рухався зношеним сталевим трубопроводом

$$P_{П.р} = \frac{4 \left( n_{м.п} f_{м.п} E h_m D_{в.с} \frac{D_{м.п} - D_{в.с}}{D_{м.п}} + f_p q_p L_p + \frac{q_{\delta} f_{ков} r_{в.б}}{R_{\delta}} \right)}{\pi D_{в.с}^2}. \quad (2.43)$$

2.4 Дослідження газодинамічних процесів у трубопроводі під час його безтраншейної реконструкції протягуванням поршнем рукава в зношений сталевий трубопровід

При великій довжині реконструйованого сталевого трубопроводу, щоб дослідити процес протягування поршнем рукава треба враховувати сили, які діють на поршень, що зроблено в підрозділі 2.3, та втрати енергії під час руху повітря зношеним сталевим трубопроводом в якому протягується рукав. Оскільки, на величину необхідного тиску на виході компресора впливають втрати тиску вздовж зношеного сталевого трубопроводу від компресора до поршня.

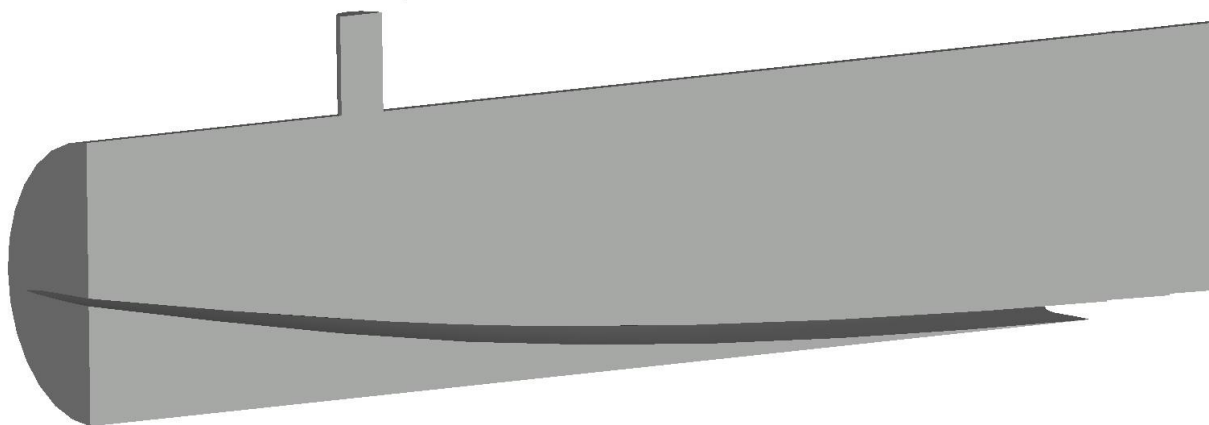
Нестаціонарний характер руху повітря зношеним сталевим трубопроводом в якому протягується поршнем рукав, різна шорсткість стінки зношеного сталевого трубопроводу та рукава, складні динамічні і кінематичні умови зумовлені рухом поршня створюють труднощі в побудові та реалізації математичних моделей.

Потрібно виконати моделювання нестаціонарних газодинамічних процесів зумовлених рухом поршня зношеним сталевим трубопроводом з прикріпленим до нього рукавом.

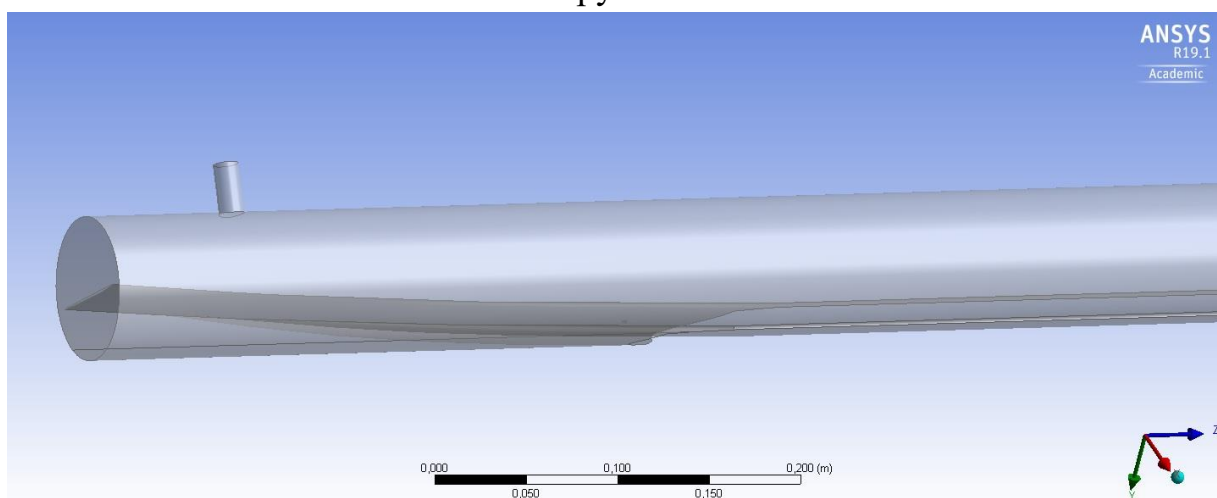
Ізотермічний характер руху повітря в сталевому трубопроводі, яким протягується поршнем рукав, може бути змодельований тими ж фундаментальними рівняннями газової динаміки, що і рух повітря в міжтрубному

просторі під час протягування поршнем поліетиленового трубопроводу (2.22) та (2.23). Початкові (2.24), (2.25) та граничні (2.26), (2.27) умови поставленої задачі також є такими ж.

Реалізація поставленої задачі виконувалась в програмному комплексі ANSYS Fluent. Тривимірні модель внутрішньотрубного простору сталевого трубопроводу, в якому протягується рукав у результаті чого відбувається складний турбулентний рух потоку повітря, була змодельована в AutoCAD (рисунок 2.16) та імпортувались в ANSYS Fluent (рисунок 2.17). Модель була змодельована з простором у середині патрубка, яким повітря подається від компресора в сталевий трубопровід.

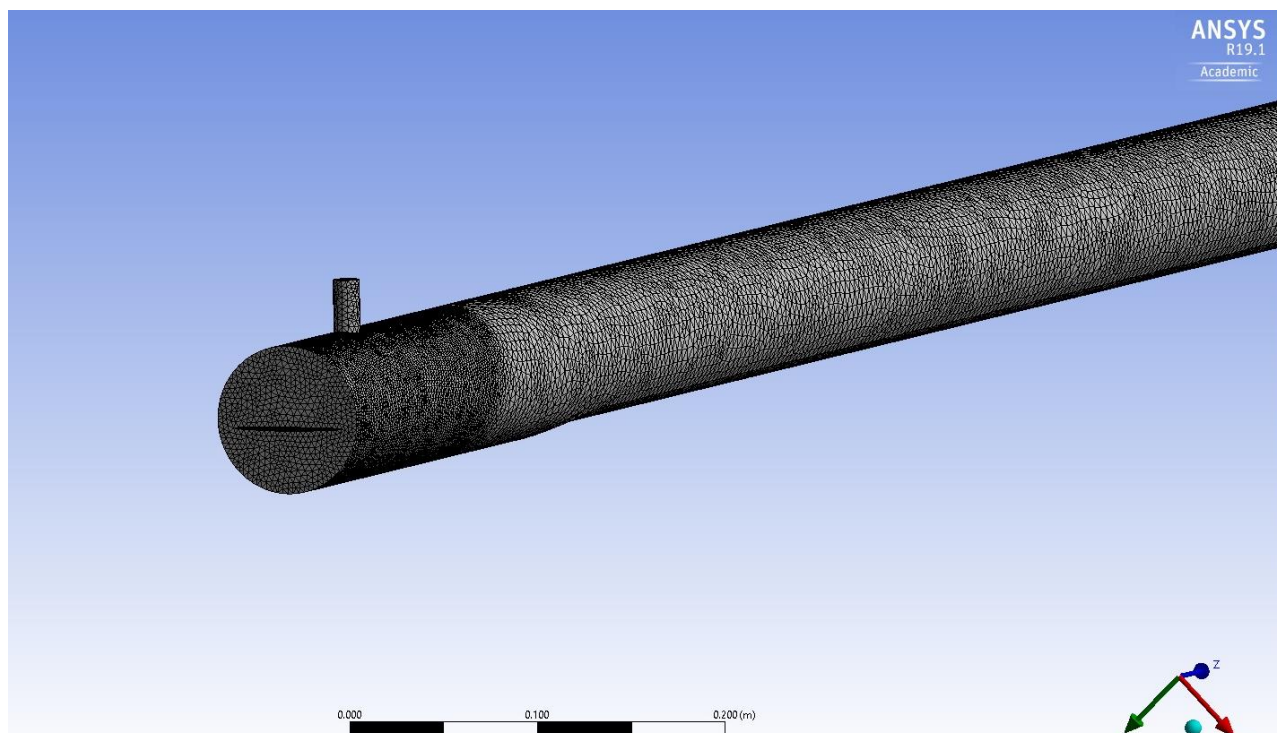


**Рисунок 2.16** – Повздовжній переріз змодельованого в AutoCAD моделі внутрішньотрубного простору сталевого трубопроводу в якому протягується рукав



**Рисунок 2.17** – Імпортована в програмний комплекс ANSYS Fluent модель внутрішньотрубного простору сталевого трубопроводу в якому протягується рукав

Для моделювання потоку повітря в препроцесорі Fluent – Meshing генерувалась об'ємна розрахункова сітка. 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 патрубка до сталевого трубопроводу виконувалось подрібнення сітки для кращого візуалізування потоку в цій зоні до розміру елементів сітки – 0,001 м (рисунок 2.18). Для такого розміру елементів сітки результати розрахунку були якісно візуалізовані, а час розрахунку складав близько півтори години.



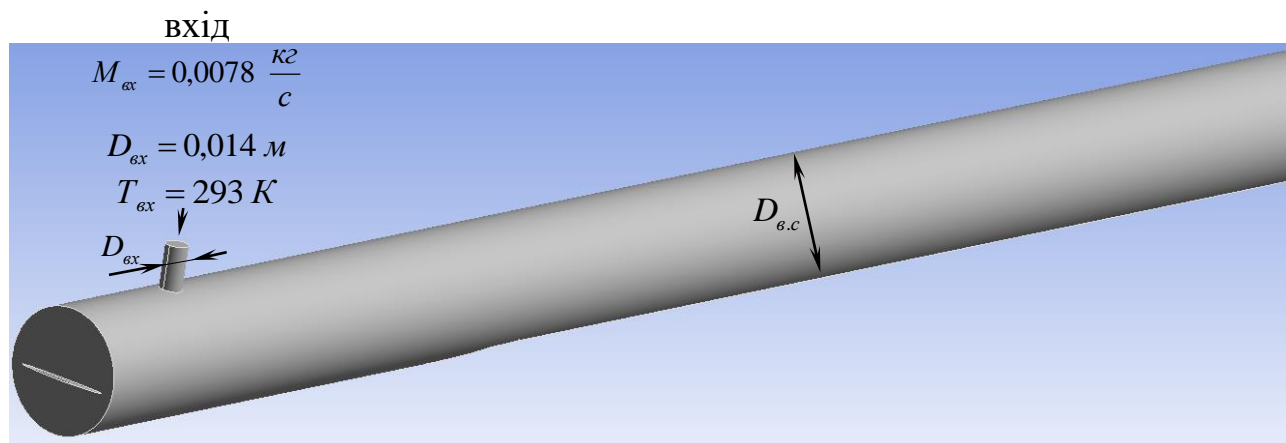
**Рисунок 2.18** – Розрахункова об'ємна сітка

Для дослідження динаміку руху повітря запоршневим простором задавались наступні граничні умови. На вході потоку в сталевий трубопровід задавалась масова витрата Mass flow inlet. Крім задавання масової витрати на вході в вікні Mass flow inlet задавалась інтенсивність турбулентності (Intensity) 5 %, гідравлічний діаметр (Hydraulic Diameter) і температура повітря на вході.

Також задавалась гранична умова стінка (Wall). Для внутрішньої стінки сталевого зношеного трубопроводу задавався коефіцієнт еквівалентної шорсткості труби  $h_{s,c} = 0,75 \text{ мм}$ , а для зовнішньої стінки рукава  $h_{s,n} = 0,01 \text{ мм}$ .

Внутрішній діаметр сталевого трубопроводу приймався рівним  $D_{в.с} = 49 \text{ мм}$ . Внутрішній діаметр патрубку, яким повітря подається від компресора в міжтрубний простір  $D_{в.нат} = 14 \text{ мм}$  і він рівний гідравлічному діаметру, який задавався в ANSYS Fluent.

Для дослідження динаміку руху повітря запоршневим простором під час протягування рукава в дефектний сталевий трубопровід задавались такі граничні умови на вході (рисунок 2.19):



**Рисунок 2.19** – Розрахункова схема

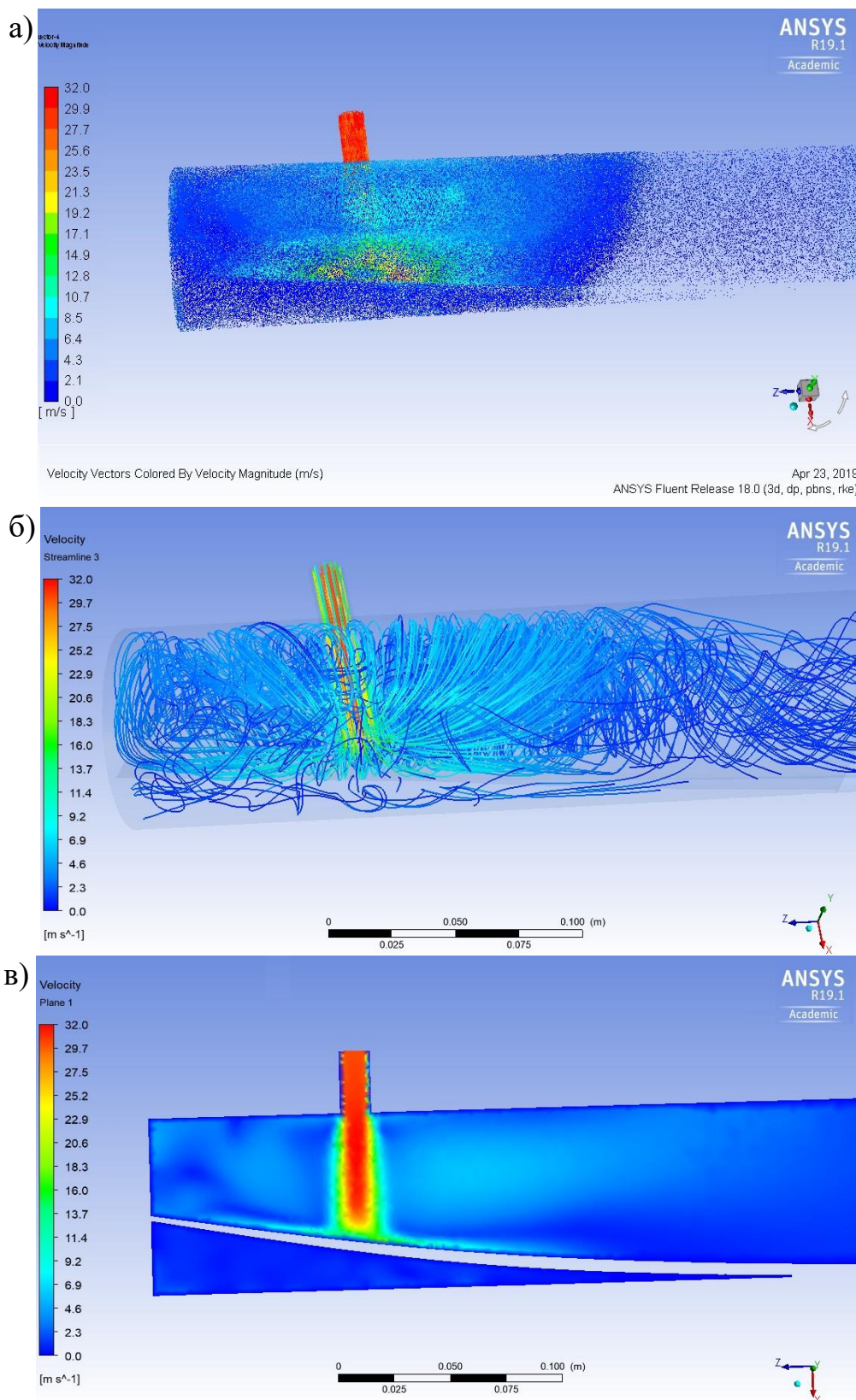
- інтенсивність турбулентності 5 %;
- масова витрата  $M_{ex} = 0,0078 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$ ;
- гідравлічний діаметр  $D_{ex} = 0,014 \text{ м}$ ;
- температура повітря  $T_{ex} = 293 \text{ К}$ .

Процес протягування рукава в дефектний сталевий трубопровід є динамічний – в дефектному сталевому трубопроводі рухається поршень і прикріплений до нього рукав. Для дослідження газодинамічних процесів у внутрішній порожнині зношеного сталевого трубопроводу під час такого руху в ANSYS Fluent застосовувалась модель динамічної сітки.

Результати моделювання були візуалізовані в постпроцесорах програмних комплексів ANSYS Fluent, ANSYS CFX, що дало змогу побачити структуру потоку повітря в запоршневому просторі під час протягування поршнем нового поліетиленового рукава в дефектний сталевий трубопровід і зібрати вичерпні дані

про нього. Було побудовано вектори швидкості (рисунок 2.20, *a*), лінії течії (рисунок 2.20, *б*), поля швидкості в площині вертикального повздовжнього перерізу (рисунок 2.20, *в*), поля тиску на контурах (рисунок 2.21, *a*) та поля тиску в площині вертикального повздовжнього перерізу (рисунок 2.21, *б*).

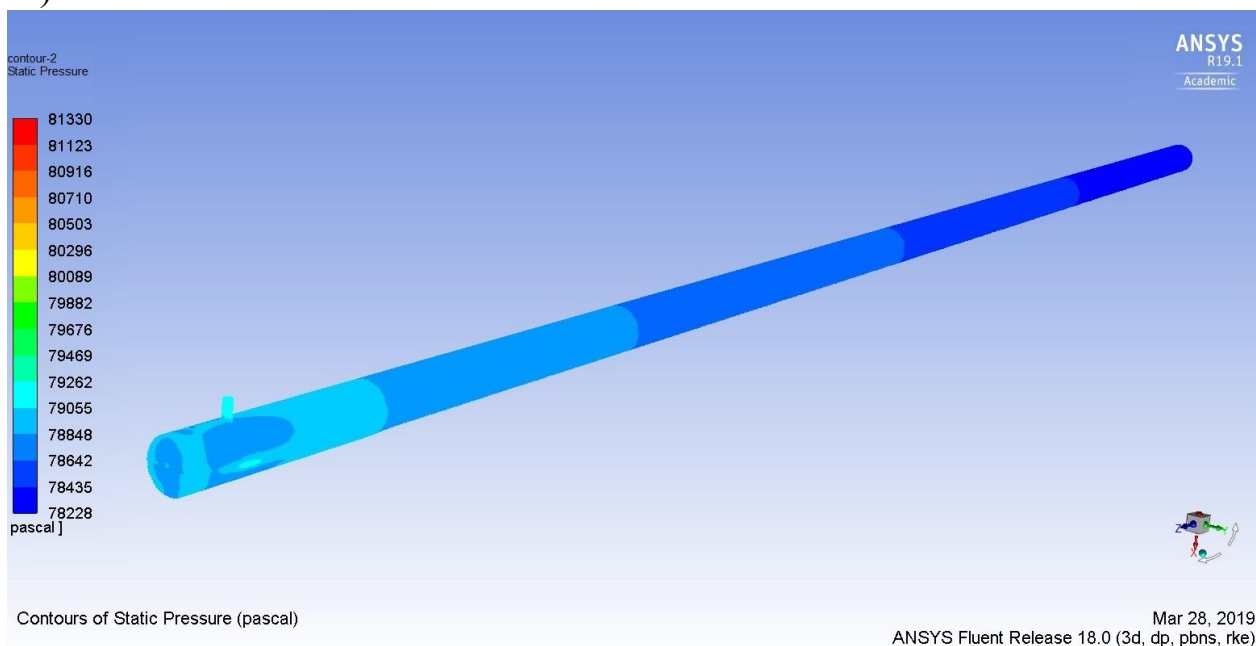
За результатами розрахунку в програмному комплексі ANSYS Fluent (рисунок 2.20, *a*) було визначено, що у вхідному патрубку швидкість потоку повітря є максимальною і вздовж осі складає 32 м/с. Від осі потоку в напрямі стінки відбувається незначне зниження швидкості потоку, а біля стінки швидкість потоку газу знижується різко. З вхідного патрубка потік повітря перетікає у зношений сталевий трубопровід в якому протягується рукав. У зношеному сталевому трубопроводі потік повітря спрямовується на зовнішню поверхню рукава, який протягується поршнем, в результаті чого розходить в різні сторони на кут 360°. Після такого розходження весь потік у внутрішній порожнині зношеного сталевого трубопроводу (над протягуваним рукавом) вздовж бічної стінки по обидві сторони від вхідного патрубка (площиною симетрії є площина вертикального повздовжнього перерізу) піднімається у верх у сторону вхідного патрубка під різними кутами (рисунок 2.20, *б*). Наблизившись до верхньої частини зношеного сталевого трубопроводу (з сторони вхідного патрубка) потік повітря, який рухався в сторону вхідного патрубка з однієї сторони вхідного патрубка (площиною симетрії є площина повздовжнього перерізу), зустрічається з газовим потоком повітря, який рухався з другої сторони вхідного патрубка, в результаті чого відбувається закручування потоку повітря. Таке закручування потоку повітря відбувається і в напрямі барабану з рукавом і в напрямі протягування (з правої і лівої сторони від вхідного патрубка). Швидкість закрученого потоку повітря значно знижується до 2 м/с. Після такого закручування потік спрямовується в напрямку протягування. На віддалі біля 3 м від вхідного патрубка він починає вирівнюватись і його турбулентність зменшується. Швидкість потоку повітря на такій віддалі складає біля 2,1 м/с.



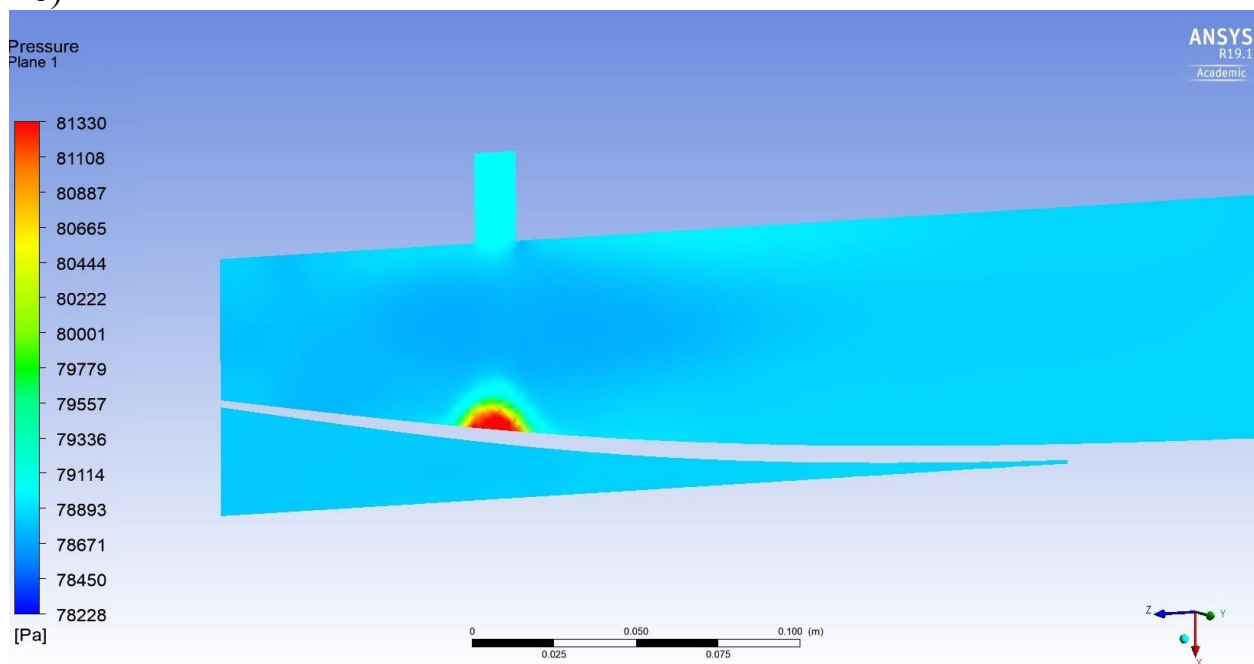
а) – вектори швидкості; б) – лінії течії; в) – поля швидкості в площині вертикального повздожнього перерізу

**Рисунок 2.20** – Результати моделювання швидкості руху повітря в зношеному сталевому трубопроводі під час протягування поршнем нового рукава

a)



б)



а) – поля тиску на контурах; б) – поля тиску в площині вертикального повздовжнього перерізу

**Рисунок 2.21** – Результати моделювання розподілу тиску в зношеному сталевому трубопроводі під час протягування поршнем нового рукава

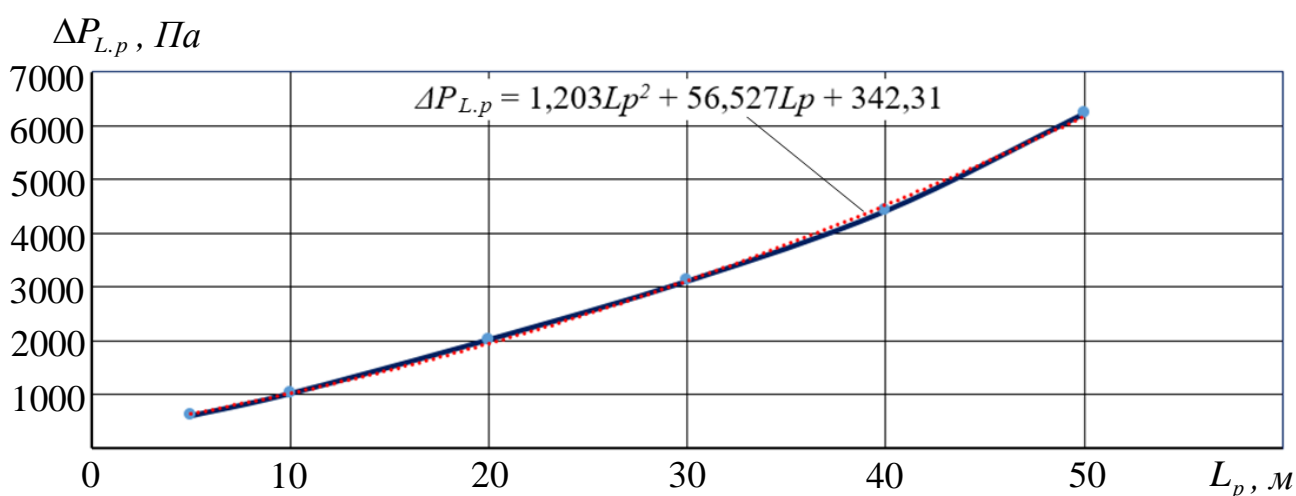
Як видно з полів тиску (рисунок 2.21, а, б), тиск у запоршневому просторі під час протягування нового рукава в дефектний сталевий трубопровід розподілений нерівномірно. У вхідному патрубку тиск складає 79205 Па. З полів

тиску в площині вертикального повздовжнього перерізу (рисунок 2.21, б) було помічено, що у внутрішній порожнині зношеного сталевго трубопроводу, навпроти вхідного патрубка, над протягваним рукавом, відбувається збільшення тиску до 81330 Па, а між вхідним патрубком і рукавом тиск падає до 78730 Па. Вздовж зношеного сталевго трубопроводу від вхідного патрубка до рухомого поршня відбувається падіння тиску. Так, якщо поршень знаходиться на віддалі 5 м від вхідного патрубка тиск на вході рукава в зношений сталевий трубопровід складає 78848 Па, а за поршнем 78228 Па. Втрати тиску на тертя до стінок зношеної сталевго труби та рухомого поліетиленового рукава, якщо довжина протягнутого рукава  $L_p=5$  м, складають 620 Па.

Оскільки була задана динамічна модель руху сітки і моделювався рух поршня та прикріпленого до нього рукава то втрати тиску в зношеному сталевому трубопроводі визначались для різної довжини протягнутого рукава. Результати такого моделювання занесені в таблицю 2.4 та подані графічно (рисунок 2.22).

**Таблиця 2.4** – Результати моделювання втрат тиску в зношеному сталевому трубопроводі

$L_p, \text{ м}$	5	10	20	30	40	50
$\Delta P_{L,p}, \text{ Па}$	620	1034	2035	3120	4423	6231



**Рисунок 2.22** – Залежність втрат тиску в зношеному сталевому трубопроводі від довжини протягнутого рукава



Як бачимо (рисунок 2.22), з збільшенням довжини протягнутого рукава збільшуються втрати тиску в зношеному сталевому трубопроводі. Оскільки, втрати тиску в зношеному сталевому трубопроводі відбуваються за нелінійною залежністю було побудовано лінію тренду і за нею було визначено рівняння залежності втрат тиску вздовж зношеного сталевого трубопроводу від компресора до рухомого поршня, які є одним з доданків в (2.37), від довжини протягнутого рукава

$$\Delta P_{L.p} = 1,203L_p^2 + 56,527L_p + 342,31. \quad (2.44)$$

Підставивши (2.44) та (2.43) в (2.37) отримуємо рівняння для розрахунку необхідного тиску на виході компресора, щоб поршень протягнув рукав усією довжиною зношеного сталевого трубопроводу

$$P_{\text{комп.р}} = \frac{4 \left( n_{m.n} f_{m.n} E h_m D_{в.с} \frac{D_{m.n} - D_{в.с}}{D_{m.n}} + f_p q_p L_p + \frac{q_b f_{ков} r_{в.б}}{R_b} \right)}{\pi D_{в.с}^2} + 1,203L_p^2 + 56,527L_p + 342,31. \quad (2.43)$$

За (2.43) було виконано розрахунки необхідного тиску на виході компресора для протягування нового рукава усією довжиною реконструйованої ділянки зношеного сталевого трубопроводу. При цьому змінювалась довжина цієї ділянки і відповідно довжина протягнутого рукава  $L_p$ .

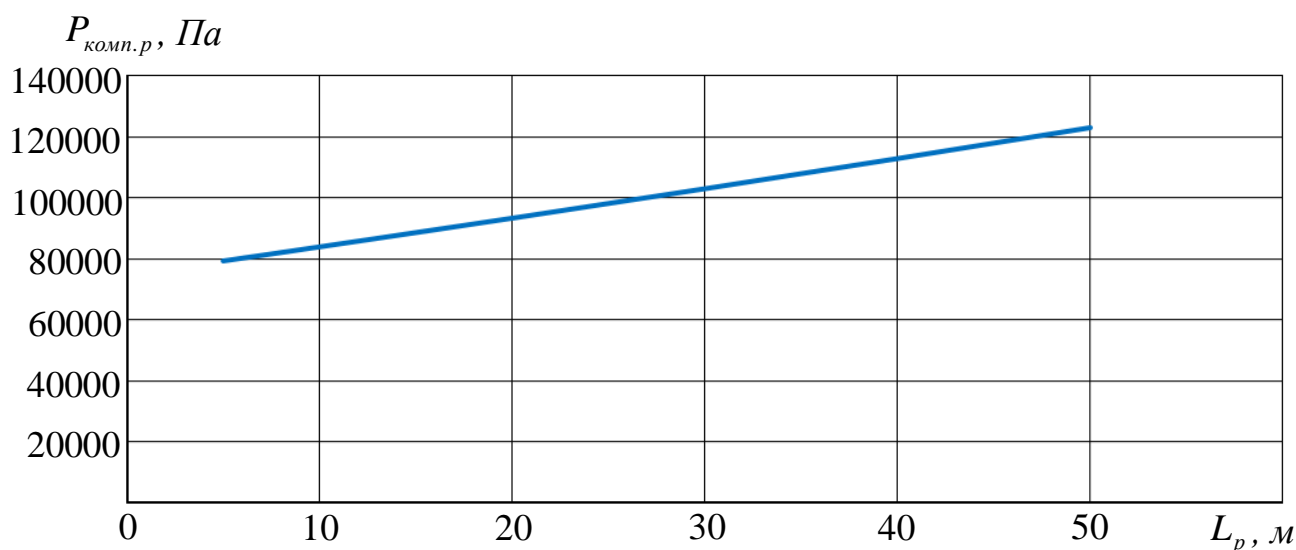
Вихідні дані до розрахунку наступні: внутрішній діаметр сталевого трубопроводу  $D_{в.с} = 0,049 \text{ м}$ ; кількість манжет поршня  $n_{m.n} = 4$ ; коефіцієнт тертя ковзання гумових манжет поршня до стінок сталевого трубопроводу  $f_{m.n} = 0,6$ ; модуль пружності гуми  $E = 2 \text{ МПа}$ ; товщина манжети поршня  $h_m = 0,01 \text{ м}$ ; діаметр манжет поршня до його запасування в трубопроводі  $D_{m.n} = 0,051 \text{ м}$ ; коефіцієнт тертя ковзання рукава до сталі  $f_p = 0,4$ ; вага погонного метра рукава  $q_p = 4 \frac{\text{Н}}{\text{м}}$ ; вага

барабана  $q_{\delta} = 600 \text{ Н}$ ; коефіцієнт тертя виступів барабана в пазах  $f_{\text{коб}} = 0,2$ ; радіус циліндричних виступів барабана  $r_{\delta} = 0,04 \text{ м}$ ; радіус осердя барабана  $R_{\delta} = 0,1 \text{ м}$ .

Результати розрахунків наведені в таблиці 2.5 та подані графічно (рисунок 2.23).

**Таблиця 2.5** – Результати розрахунків необхідного тиску на виході компресора під час протягування рукава

$L_p, \text{ м}$	5	10	20	30	40	50
$P_{\text{комп.р}}, \text{ Па}$	79303	83920	93335	102991	112888	123025



**Рисунок 2.23** – Залежність тиску на виході компресора від довжини реконструйованої рукавом ділянки зношеного сталевго трубопроводу

Як бачимо для реконструкції ділянки зношеного сталевго трубопроводу діаметром 49 мм довжиною до 50 м протягуванням поршнем нового рукава потрібен незначний тиск – до 0,12 МПа, а отже ідею реконструкції трубопроводів газових і теплових мереж протягуванням поршнем рукава в зношений сталевий трубопровід можливо реалізувати.

## Висновки до розділу 2

1. На базі математичного та CFD моделювання встановлено, що ідеї реконструкції трубопроводів газових і теплових мереж протягуванням поршнем нового поліетиленового трубопроводу чи нового рукава в зношений сталевий трубопровід можливо реалізувати, оскільки, для виконання таких операцій потрібний незначний тиск на виході компресора. Для реконструкції ділянки зношеного сталевих трубопроводу внутрішнім діаметром 49 мм довжиною 50 м протягуванням поршнем нового поліетиленового трубопроводу зовнішнім діаметром 40 мм потрібен тиск до 0,2 МПа, а для протягування поршнем на таку ж довжину рукава – 0,12 МПа.

2. Виведено формули для розрахунку сил опору, які діють на рухому систему, під час протягування поршнем нового поліетиленового трубопроводу чи рукава в зношений горизонтальний та похилий сталевий трубопровід. Такі результати дають змогу встановити вплив кожного чинника на процес протягування.

3. На основі CFD моделюванням газодинамічних процесів у запоршневому просторі під час протягування поршнем поліетиленового трубопроводу чи рукава зношеним сталевим трубопроводом виявлено місця сповільнення та пришвидшення потоку повітря, падіння та зростання тиску. Встановлено залежність втрат тиску в запоршневому просторі від довжини протягнутої ділянки поліетиленового трубопроводу чи рукава. Так, якщо поршнем протягнути п'ятдесят метрів поліетиленового трубопроводу зовнішнім діаметром 40 мм падіння тиску в міжтрубному просторі буде складати 33560 Па, а якщо п'ятдесят метрів рукава втрати тиску у зношеному сталевому трубопроводі складуть 6231 Па.

4. Розроблено методику розрахунку необхідного тиску на виході компресора, щоб поршень протягнув новий поліетиленовий трубопровід чи рукав усією довжиною реконструйованого сталевих трубопроводу. Встановлено закономірності зміни тиску на виході компресора залежно від довжини

реконструйованої ділянки зношеного сталевого трубопроводу та зовнішнього діаметра протягнутого поршнем поліетиленового трубопроводу.

Основні наукові результати розділу опубліковані в працях [16–22].

### **3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ПРОТЯГУВАННЯ ПОРШНЕМ НОВОГО ПОЛІЕТИЛЕНОВОГО ТРУБОПРОВОДУ ЗНОШЕНИМ СТАЛЕВИМ**

Обґрунтовано доцільність експериментального дослідження процесів безтраншейної реконструкції трубопроводів газових і теплових мереж протягуванням поршнем нового поліетиленового трубопроводу зношеним сталевим. Розроблено та виготовлено експериментальну установку, наведено її принципову схему, розроблено методику виконання експериментальних досліджень. Експериментально підтверджено можливість безтраншейної реконструкції трубопроводів газових і теплових мереж протягуванням поршнем нового поліетиленового трубопроводу зношеним сталевим. Експериментально визначено сили опору, які діють на рухому систему, під час протягування поршнем нового поліетиленового трубопроводу в зношеній сталевий та порівняно їх з результатами теоретичних розрахунків. Експериментально досліджено зміну тиску на початку трубопроводу в часі під час протягування поліетиленової труби сталевією. Методом математичного планування експерименту досліджено вплив об'ємної витрати повітря, діаметра поліетиленового трубопроводу та геометричного нахилу трубопроводу до горизонту на швидкість протягування поршнем поліетиленової труби. Експериментально досліджено залежність швидкості протягування від довжини протягнутої поршнем ділянки поліетиленової труби.

#### **3.1 Задачі експериментальних досліджень**

Для практичної реалізації ідеї безтраншейної реконструкції трубопроводів газових і теплових мереж протягуванням поршнем нового поліетиленового трубопроводу зношеним сталевим потрібно підібрати компресор для виконання робіт, визначити вплив основних чинників на динаміку процесу, визначити, які з них підвищують ефективність процесу. Для підбору компресора треба визначити,

яким повинен бути тиск на виході компресора, щоб поршень з прикріпленим до нього поліетиленовим трубопроводом рухався усією довжиною реконструйованої ділянки трубопроводу.

Задачами експериментальних досліджень є:

– перевіряння можливості протягування поршнем нового поліетиленового трубопроводу в зношений сталевий;

– перевіряння технологічності виконання операцій безтраншейної реконструкції трубопроводів газових і теплових мереж протягуванням поршнем нового поліетиленового трубопроводу в зношений сталевий;

– експериментальне визначення сил опору, які діють на рухому систему, під час протягування поршнем нового поліетиленового трубопроводу в зношений сталевий;

– експериментальні дослідження динаміки протягування поршнем нового поліетиленового трубопроводу в зношений сталевий.

### 3.2 Експериментальне визначення сил опору

Експериментальні дослідження виконано в лабораторії спорудження магістральних трубопроводів кафедри газонафтопроводів та газонафтосховищ Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу, а їх методику і основні результати викладено в [17, 23].

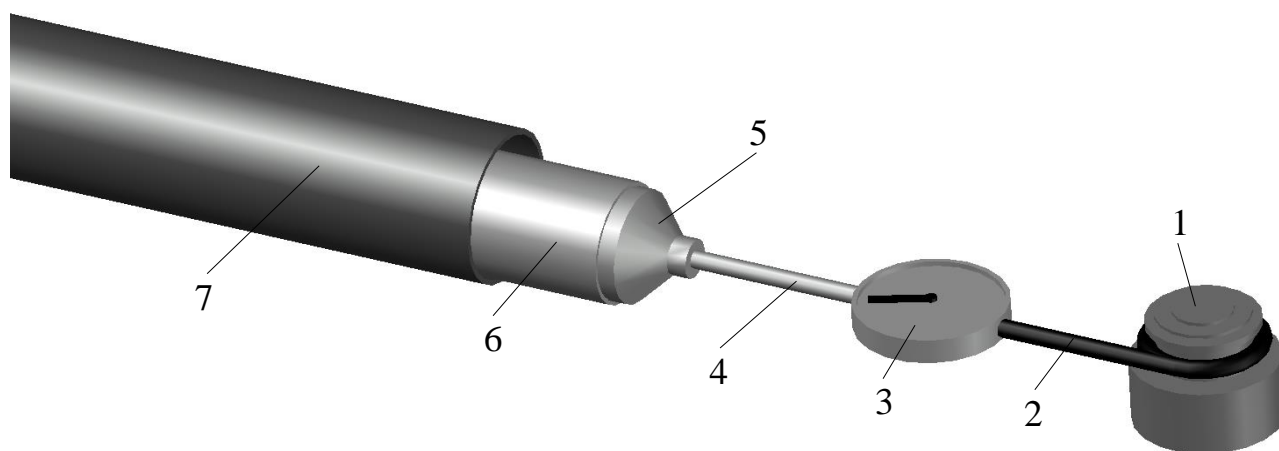
Основною операцією під час безтраншейної реконструкції трубопроводів газових і теплових мереж є протягування нового поліетиленового трубопроводу в зношений сталевий. Виконувати таку операцію запропоновано поршнем. Для експериментального визначення сил опору, які діють на рухому систему, під час протягування поршнем нового поліетиленового трубопроводу в зношений сталевий розроблено універсальний експериментальний стенд.

Універсальність експериментального стенду полягає в можливості:

– дослідження процесів протягування нового поліетиленового трубопроводу зношеним сталевим;

- дослідження руху поршнів сталевими трубопроводами;
- дослідження процесів очищення трубопроводу.

Стенд складається з електродвигуна 1 та динамометра 3 (рисунок 3.1). Динамометром 3 вимірюють силу з якою електродвигун 1 тягне нову поліетиленову трубу 6 зношеною сталеву 7. Динамометр 3 з'єднаний з електродвигуном 1 ланцюгом 2, кінець якого закладений на зірочку електродвигуна 1. Також динамометр 3 з'єднаний з оголовком 5 поліетиленової труби 6 тягою 4. Для легкої та швидкої заміни динамометра 3 його з'єднання з ланцюгом 2 і тягою 4 виконано карабінами.



- 1 – електродвигун; 2 – ланцюг; 3 – динамометр; 4 – тяга; 5 – оголовок;  
6 – протягувана поліетиленова труба; 7 – зношена сталевая труба

**Рисунок 3.1** – Схема експериментального стенду для визначення сил опору, які діють на рухому систему, під час протягування поршнем нової поліетиленової труби в зношену сталеву

У середину сталевій труби 7 замість поліетиленової труби 6 можна помістити поршень і динамометром 3 вимірювати силу тертя манжет поршня до стінок зношеного сталевий трубопроводу. Також поліетиленову трубу 6 можна проштовхнути в ущільнювальну систему і динамометром 3 виміряти силу тертя поліетиленової труби в манжетах ущільнювальної системи.

За допомогою розробленого стенду експериментально визначали силу тертя поліетиленової труби до сталевій (рисунок 3.2), силу тертя манжет поршня до

стінок зношеної сталевій труби (рисунок 3.3) та силу тертя поліетиленової труби в манжетах ущільнювальної системи (рисунок 3.4).



**Рисунок 3.2** – Експериментальне визначення сили тертя поліетиленової труби до сталевій



**Рисунок 3.3** – Експериментальне визначення сили тертя манжет поршня до стінок зношеної сталевій труби

Методика виконання експериментальних досліджень наступна. До кінця нової поліетиленової труби 6 кріпиться оголовок 5 (рисунок 3.1). Після чого поліетиленову трубу 6 проштовхують у середину зношеної сталевій труби 7. Тоді один кінець металевій тяги 4 з'єднуємо з оголовком 5 поліетиленової труби 6, а інший з динамометром 3. Протилежний кінець динамометра 3 з'єднують з ланцюгом 2, який закладають на зірочку електродвигуна 1. Для створення тягових зусиль необхідно включити електродвигун 1, який потягне поліетиленову трубу 6 зношеною сталевією трубою 7. При цьому динамометр 3 покаже силу тертя поліетиленової труби 6 до сталевій 7. Такий дослід виконувався п'ять разів для двох різних зовнішніх діаметрів поліетиленової труби і розраховувалось середнє





**Рисунок 3.4** – Експериментальне визначення сили тертя поліетиленової труби в манжетах ущільнювальної системи

арифметичне значення для кожної поліетиленової труби. Середнє арифметичне значення ділилось на довжину поліетиленової труби і заносились в таблицю 3.1. Отримані значення є зусиллями, які потрібні для протягування одного погонного метра поліетиленового трубопроводу зношеним сталевим трубопроводом. Сталева труба є зношеною трубою теплової мережі. Внутрішній діаметр сталеві труби складає  $D_{в.с} = 49 \text{ мм}$ . Протягувана поліетиленова труба є призначена для теплових мереж металопластикова труба. Вимірювання виконувалось для двох труб різних діаметрів. Зовнішній діаметр першої поліетиленової труби складав  $D_{з.н1} = 32 \text{ мм}$ , а внутрішній –  $D_{в.н1} = 21 \text{ мм}$ . Другої відповідно зовнішній діаметр складав  $D_{з.н2} = 40 \text{ мм}$ , а внутрішній  $D_{в.н2} = 28 \text{ мм}$ . Довжина поліетиленових труб була рівною  $L_n = 4 \text{ м}$ .

**Таблиця 3.1** – Результати експериментальних визначень сили тертя поліетиленової труби до сталеві

№	$D_{з.н}, \text{ мм}$	$F_{T \text{ н.мп}1}, \frac{H}{M}$	$F_{T \text{ н.мп}2}, \frac{H}{M}$	$F_{T \text{ н.мп}3}, \frac{H}{M}$	$F_{T \text{ н.мп}4}, \frac{H}{M}$	$F_{T \text{ н.мп}5}, \frac{H}{M}$	$F_{T \text{ н.мп.ср}}, \frac{H}{M}$
1	32	1,1	1,0	1,0	0,9	1,0	1,0
2	40	1,4	1,3	1,3	1,2	1,4	1,3

Після досліджень з поліетиленою трубою у середину сталевого трубопроводу замість поліетиленої труби поміщався поршень. Для експериментальних досліджень виготовлено поршень (рисунок 3.5), який складається з циліндричного корпусу на якому шайбами та болтами закріплені дві ущільнювальні гумові манжети товщиною  $h_m=10$  мм кожна. За наведеною вище методикою виконувались експериментальні визначення сили тертя манжет поршня до стінок зношеного сталевго трубопроводу (рисунок 3.3). Результати досліджень наведено в таблиці 3.2. Діаметр манжет поршня до його запасування в трубопровід був рівний  $D_{m.n}=51$  мм.



**Рисунок 3.5** – Поршень

**Таблиця 3.2** – Результати експериментальних визначень сили тертя манжет поршня до стінок зношеного сталевго трубопроводу

№	$F_{T.m.n1}, H$	$F_{T.m.n2}, H$	$F_{T.m.n3}, H$	$F_{T.m.n4}, H$	$F_{T.m.n5}, H$	$F_{T.m.n.cp}, H$
1	42,1	43,3	41,8	42,2	43,9	42,7

Також за такою ж методикою було визначено силу тертя поліетиленових труб зовнішнім діаметром 32 мм, 40 мм в манжетах ущільнювальної системи (таблиця 3.3). Для цього поліетиленова труба проштовхувалася в ущільнювальну систему і динамометром визначалась сила тертя поліетиленових труб в манжетах ущільнювальної системи (рисунок 3.4). В ущільнювальній системі було три кільцеві гумові манжети товщиною 3 мм кожна.

Сума експериментально визначених сил опору, які діють на рухоми систему, під час протягування поршнем нового поліетиленового трубопроводу в зношений сталевий рівня

$$\sum F^C = F_{T_{н.мр.ср}}^C L + F_{T_{м.л.ср}}^C + F_{T_{г.с.ср}} \cdot \quad (3.1)$$

**Таблиця 3.3** – Результати експериментальних визначень сили тертя поліетиленової труби в манжетах ущільнювальної системи

№	$D_{з.л}, мм$	$F_{T_{г.с1}}, Н$	$F_{T_{г.с2}}, Н$	$F_{T_{г.с3}}, Н$	$F_{T_{г.с4}}, Н$	$F_{T_{г.с5}}, Н$	$F_{T_{г.с.ср}}, Н$
1	32	85,2	84,6	84,1	84,2	85,5	84,7
2	40	103,4	104,9	103,7	103,4	104,0	103,9

Для поліетиленового трубопроводу зовнішнім діаметром 32 мм  $\sum F^C = 131,4$  Н, а 40 мм –  $\sum F^C = 151,8$  Н.

Отримані значення порівнювались з результатами експериментального одночасного визначення усіх сил опору, які діють на рухоми систему під час протягування поршнем нового поліетиленового трубопроводу в зношений сталевий (рисунок 3.6). Такі експериментальні дослідження виконувались за тією ж методикою, що і попередні. Для цього поліетиленова труба проштовхувалася в ущільнювальну систему і кріпилася до поршня, який запасовувався в дефектний сталевий трубопровід. Тоді ущільнювальна система фланцем приєднувалась до зношеної сталевій труби, поліетиленовою трубою поршень проштовхувався до тих пір поки вся поліетиленова труба не буде в сталевій. Тоді динамометр кріпився до поршня і визначалась сила необхідна для протягування усієї системи. Результати таких визначень занесені в таблицю 3.4.

Як бачимо розрахована за (3.1) сума експериментально визначених сил опору наближено рівна експериментально визначеній силі опору, яка діє на всю рухоми систему під час протягування поршнем нового поліетиленового трубопроводу в зношений сталевий.



**Рисунок 3.6** – Експериментальне визначення усіх сили опору, які діють на рухому систему під час протягування поршнем нового поліетиленового трубопроводу в зношений сталевий

**Таблиця 3.4** – Результати експериментальних визначень сили опору, яка діє на всю рухому систему під час протягування поршнем нового поліетиленового трубопроводу в зношений сталевий

№	$D_{з.п}$ , мм	$F_1$ , Н	$F_2$ , Н	$F_3$ , Н	$F_4$ , Н	$F_5$ , Н	$F_{cp}$ , Н
1	32	128,3	129,1	128,9	128,1	127,2	128,3
2	40	147,8	148,6	147,2	148,8	147,9	148,1

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 мізерна і знаходиться в межах від 1 Н до 2 Н, а отже протягуванням поршнем нового поліетиленового трубопроводу зношеним сталевим можна реконструювати протяжні ділянки трубопроводів газових і теплових мереж.

Для перевіряння достовірності виведених в другому розділі теоретичних залежностей за (2.2), (2.3), (2.4) виконано розрахунки сил опору, які діють на рухому систему під час протягування поршнем нового поліетиленового трубопроводу в зношений. Результати розрахунків наведені в таблиці 3.5. Розрахунки виконувались для поліетиленових труб зовнішнім діаметром 32 мм і товщиною стінки 4 мм та зовнішнім діаметром 40 мм і товщиною стінки 6 мм.

Вихідні дані до розрахунку: кількість манжет поршня  $n_{m.n} = 2$ ; коефіцієнт тертя ковзання гумових манжет поршня до стінок сталевого трубопроводу  $f_{m.n} = 0,6$ ; модуль пружності гуми  $E = 2 \text{ МПа}$ ; товщина манжети поршня  $h_m = 0,010 \text{ м}$ ; діаметр манжет поршня до його запасування в трубопровід  $D_{m.n} = 0,051 \text{ м}$ ; коефіцієнт тертя ковзання поліетилену до сталі  $f_{n.mp} = 0,2$ ; густина поліетилену  $\rho_n = 970 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ ; кількість манжет в ущільнювальній системі  $n_{m.y.c} = 3$ ; ширина контакту манжети з поліетиленою трубою  $B = 0,003 \text{ м}$ ; контактний тиск, який виникає під час монтажу манжет  $P_k = 0,8 \cdot 10^6 \text{ МПа}$ ; коефіцієнт тертя поліетилену до гуми  $f_{y.c} = 0,12$ .

**Таблиця 3.5** – Експериментальні та розрахункові значення сил опору, які діють на рухома систему під час протягування поршнем нового поліетиленового трубопроводу в зношений сталевий

Значення	$D_{з.п}, \text{ мм}$	$F_{T_{n.mp}}, \frac{\text{Н}}{\text{м}}$	$F_{T_{m.n}}, \text{ Н}$	$F_{T_{y.c}}, \text{ Н}$	$F, \text{ Н}$
Експериментальне	32	1,0	42,7	84,7	128,3
	40	1,3	42,7	103,9	148,1
Розрахункове	32	1,0	46,1	86,8	136,9
	40	1,2	46,1	108,5	155,8

Експериментальні значення сил опору, які діють на рухома систему під час протягування поршнем нового поліетиленового трубопроводу в зношений сталевий наближено рівні розрахунковим, що підтверджує достовірність виведених теоретичних залежностей.

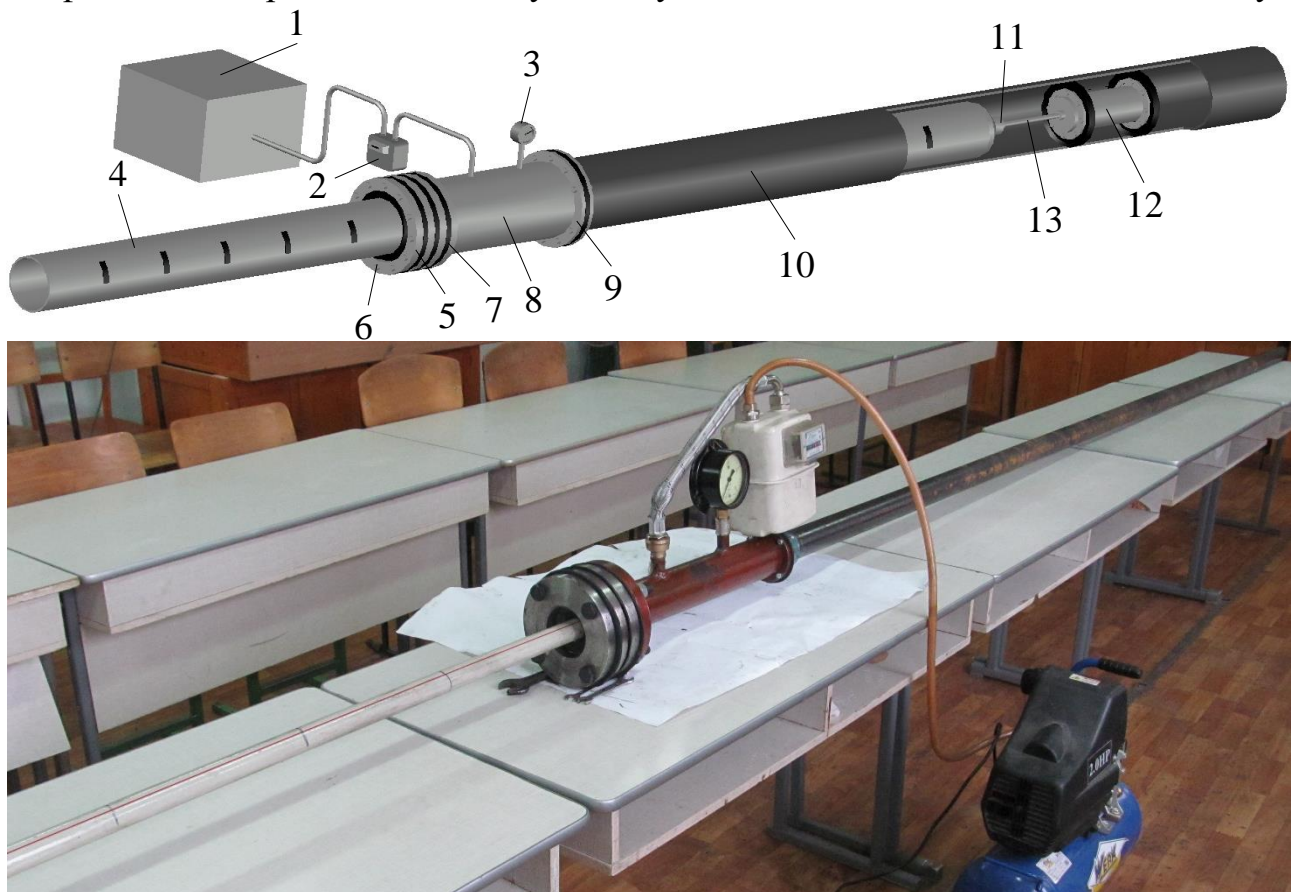
### 3.3 Експериментальні дослідження динаміки протягування поршнем нового поліетиленового трубопроводу в зношений сталевий

Експериментальні дослідження динаміки протягування поршнем нового поліетиленового трубопроводу в зношений сталевий полягають в:

– перевірянні можливості протягування поршнем нового поліетиленового трубопроводу в зношений сталевий;

- перевірянні технологічності виконання операцій безтраншейної реконструкції трубопроводів газових і теплових мереж поршнем;
- дослідженні динаміки протягування поршнем нового поліетиленового трубопроводу в зношений сталевий.

Для експериментальних досліджень динаміки протягування поршнем нового поліетиленового трубопроводу в зношений розроблено і побудовано експериментальну установку (рисунок 3.7), яка складається з зношеної сталевій труби 10 внутрішнім діаметром 49 мм і довжиною 4 м. До сталевій труби 10 фланцем 9 кріпиться ущільнювальна система, яка складається з трубної котушки 8, фланців 5 і трьох кільцевих гумових ущільнень 7 товщиною 3 мм затиснутих



1 – компресор; 2 – витратомір; 3 – манометр; 4 – протягуваний поліетиленовий трубопровід; 5, 9 – фланець; 6 – болт; 7 – кільцеве гумове ущільнення; 8 – трубна котушка; 10 – зношена сталева труба; 11 – оголовок; 12 – поршень; 13 – тяга

**Рисунок 3.7** – Експериментальна установка для досліджень динаміки протягування поршнем нового поліетиленового трубопроводу в зношений сталевий

болтами 6, манометра 3 та патрубку до якого приєднано витратомір 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.

Для перевіряння можливості протягування поліетиленового трубопроводу поршнем та перевіряння технологічності виконання операцій безтраншейної реконструкції трубопроводу поршнем зношена труба була замінена прозорою скляною трубою (рисунок 3.8, а). Експериментальними випробуваннями встановлено, що протягування поршнем нового поліетиленового трубопроводу



а) – експериментальна установка підготовлена до протягування;

б) – протягування поліетиленової труби поршнем

**Рисунок 3.8** – Експериментальне перевіряння можливості протягування поршнем поліетиленової труби

зношеним сталевим є можливим та технологічним і може застосовуватись для реконструкції трубопроводів газових і теплових мереж міст, а час підготовки обладнання до виконання робіт складає від 1 хв до 2 хв. Результати таких випробувань були підтверджені протягуванням поліетиленової труби поршнем (рисунок 3.8, б).

Перед виконанням експериментальних досліджень було визначено масу поршня та поліетиленових труб. Маса поршня склала 0,13 кг, одного погонного метра поліетиленової труби зовнішнім діаметром 32 мм – 0,5 кг, а зовнішнім діаметром 40 мм – 0,7 кг.

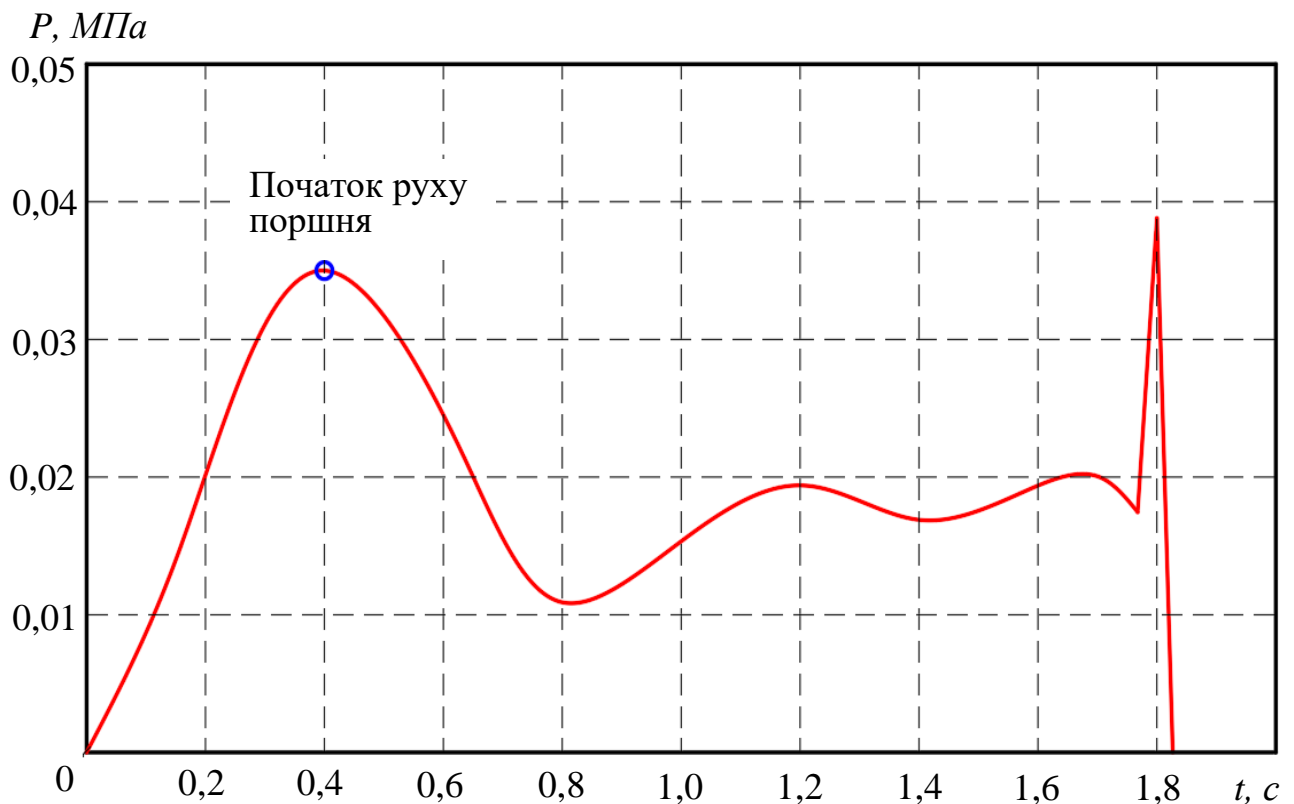
Дослідження виконують таким чином. Поліетиленову трубу 4 з оголовком 11 (рисунок 3.7) проштовхують в ущільнювальну систему через кільцеві гумові ущільнення 9 до тих пір поки вона не вийде з трубної котушки 8 з протилежного боку. Тоді в оголовок 11 вкручують тягу 13 до якої кріплять поршень 12. Після чого поршень 12 запасовують у зношену трубу 10. Тоді до торця сталеві труби 10 кріплять ущільнювальну систему. Після чого до патрубку ущільнювальної системи приєднують витратомір 2 та компресор 1, яким починають закачувати повітря в простір між сталеві трубою 10 і новою поліетиленові трубою 4. Міжтрубним простором повітря поступає в запоршневий простір. Оскільки, ущільнювальна система не випускає повітря з міжтрубного простору, то тиск за поршнем 12 зростає і він починає рухатись затулюючи за собою поліетиленову трубу 4 в сталеву 10. При цьому під час протягування поршнем 12 поліетиленові труби 4 вимірюється тиск манометром 3, об'ємна витрата повітря витратоміром 2. Під час виконання експериментальних досліджень визначають зміну швидкості протягування поліетиленові труби 4 сталеві трубою 10 з часом (фіксують час, за який нанесені на поліетиленову трубу з кроком 0,25 м чорні позначки заходять в кільцеві гумові ущільнення 7). Для цього виконується відеозапис.

Дослід повторюють для різних нахилів зношеного сталеві трубопроводу до горизонту, різних об'ємних витрат повітря.

На першому етапі експериментально досліджувалась динаміка руху поршня сталеві трубою без прикріпленої до нього поліетиленові труби. Для цього



замість кільцевого гумового ущільнення 7 (рисунок 3.7) монтувалась гума прокладка без отвору в центральній частині, а поршень запасувався в сталеву трубу 10. Під час руху поршня вимірювався тиск манометром 3, об'ємна витрата повітря витратоміром 2 та фіксувався час. Для точного визначення усіх цих значень виконувався відеозапис і уповільнений перегляд. При об'ємній витраті повітря  $0,0079 \frac{м^3}{с}$  час руху поршня склав 1,2 с. Розрахункова середня швидкість руху поршня складала  $3,33 \frac{м}{с}$ . За виконаним рядом вимірювань значень тиску побудовано криву (рисунок 3.9) зміни тиску на початку трубопроводу в часі під час руху поршня. З графіка видно, що тиск після відкриття крана на виході компресора до початку руху поршня збільшується до 0,035 МПа і є в два рази більшим ніж тиск під час його руху, що обумовлено силою тертя спокою манжет поршня до стінок сталеві труби. Після початку руху поршня тиск падає до 0,011 МПа, що обумовлено різким збільшенням швидкості руху поршня, яке в свою чергу призводить до зменшення сили тертя манжет поршня до стінок сталевого



**Рисунок 3.9** – Зміна тиску на початку трубопроводу в часі під час руху поршня сталеві трубою

трубопроводу. Після чого тиск збільшується до 0,019 МПа і відбуваються його незначні коливання. В момент вилітання поршня з труби відбувається надзвичайно різке збільшення тиску до 0,039 МПа з миттєвим падінням до нуля. При цьому чутно звуковий сигнал “хлопок”.

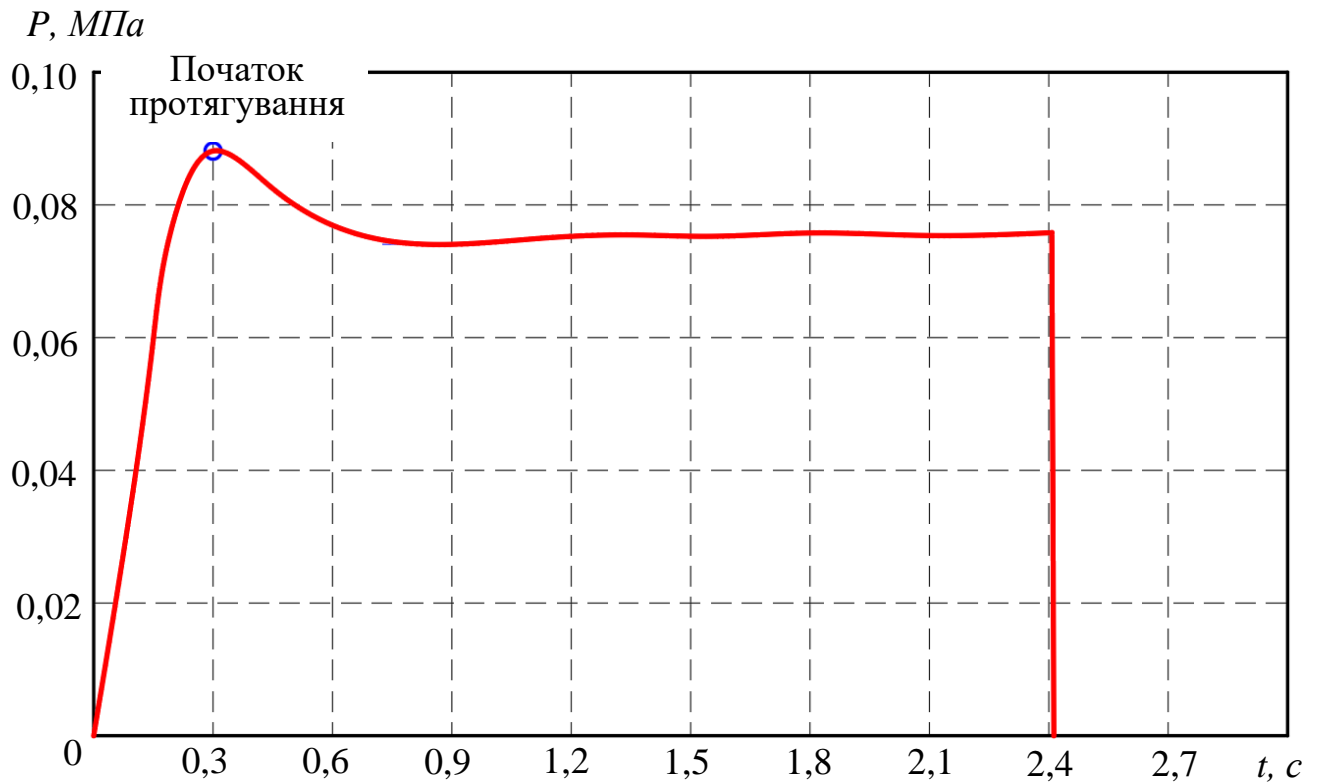
З зменшенням об’ємної витрати повітря відбувається незначне зменшення середньої швидкості руху поршня. У разі збільшення нахилу сталевого трубопроводу до 8° відбувається незначне збільшення тиску на початку трубопроводу порівняно з тиском, який був коли труба була горизонтальною, протягом усього часу руху поршня.

На другому етапі експериментально досліджувалась динаміка протягування поршнем поліетиленових труб зовнішнім діаметром 32 мм та 40 мм зношеною сталевією трубою. Експериментальна установка наведена на рисунку 3.7. Під час протягування виконувалось вимірювання тиску манометром 3, об’ємної витрати повітря витратоміром 2 та фіксувався час. Для точного фіксування усіх цих значень виконувалась відеозапис і уповільнений перегляд.

Спочатку дослідження виконувались для зовнішнього діаметра поліетиленової труби 32 мм.

При об’ємній витраті повітря  $0,005 \frac{м^3}{с}$  час протягування склав 2,1 с.

Розрахункова середня швидкість протягування  $1,9 \frac{м}{с}$ . За виконаним рядом вимірювань тиску побудовано криву (рисунок 3.10) зміни тиску на початку трубопроводу в часі під час протягування поршнем поліетиленової труби зовнішнім діаметром 32 мм. З графіка видно, що тиск після відкриття крана на виході компресора 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 відбувається незначне коливання тиску з його незначним збільшенням до 0,075 МПа. У момент вильоту поліетиленової труби з кільцевих гумових манжет ущільнювальної системи відбувається різке падіння тиску до нуля при цьому чутно звуковий сигнал “хлопок”.



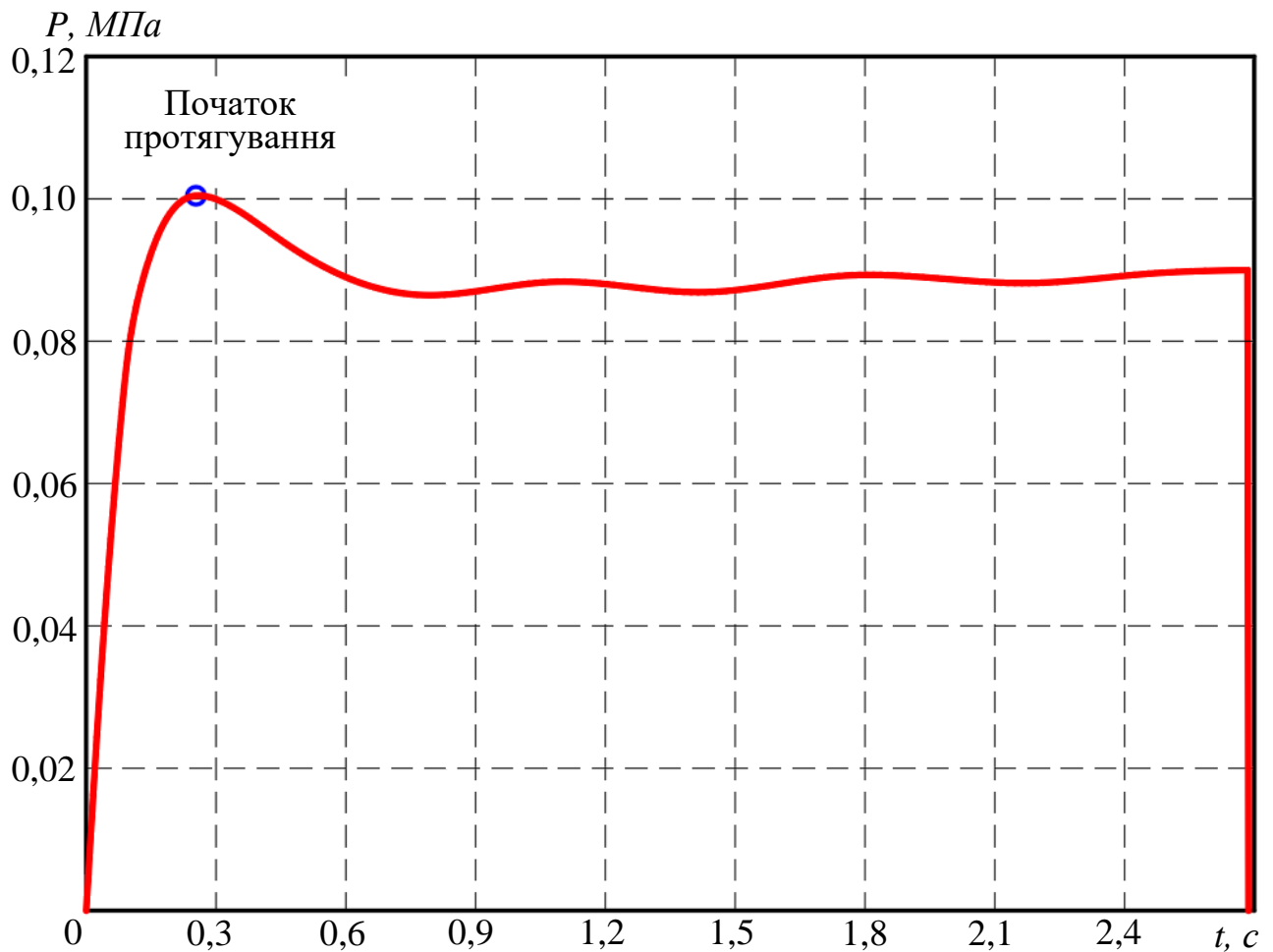
**Рисунок 3.10** – Зміна тиску на початку труби в часі під час протягування поршнем поліетиленової труби зовнішнім діаметром 32 мм зношеною сталевую

Для перевірення достовірності теоретично виведеної формули (2.36) порівняно розраховане за нею значення необхідного тиску на початку трубопроводу, щоб поршень протягував поліетиленовий трубопровід горизонтальним сталевим трубопроводом, з експериментально визначеним. Усі вихідні дані для розрахунку такі ж, як в підрозділі 3.2. Розрахований за формулою (2.36) необхідний тиск на виході компресора, щоб поршень з прикріпленим до нього поліетиленовим трубопроводом рухався горизонтальним трубопроводом складає 0,071 МПа і є наближено рівний експериментально визначеному 0,075 МПа, що підтверджує достовірність теоретично виведених залежностей.

У разі збільшення нахилу сталеві труби до  $8^\circ$  відбувається незначне (до 0,03 МПа) збільшення тиску на початку труби 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  $1,64 \text{ м/с}$ . Крива зміни тиску

на початку труби в часі під час протягування поршнем поліетиленової труби зовнішнім діаметром 40 мм наведена на рисунку 3.11.



**Рисунок 3.11** – Зміна тиску на початку труби в часі під час протягування поршнем поліетиленової труби зовнішнім діаметром 40 мм зношеною сталевною

З графіка (рисунок 3.11) видно, що тиск після відкриття крана на виході компресора до початку протягування збільшується до 0,1 МПа, що обумовлено силою тертя спокою. Після початку протягування тиск падає до 0,086 МПа. Далі відбувається незначне коливання тиску з його збільшенням до 0,09 МПа. Розрахований за формулою (2.34) необхідний тиск на виході компресора, щоб поршень з прикріпленим до нього поліетиленовою трубою рухався горизонтальною трубою для діаметра поліетиленової труби 40 мм склав 0,083 МПа, що підтверджує достовірність теоретично виведених залежностей.

Для виконання повних і якісних експериментальних досліджень треба виконати наступні заходи [100]:

- скласти план експериментального дослідження;
- якісно виконати експерименти;
- скласти математичну модель явища;
- перевірити адекватність моделі;
- перевірити значимість коефіцієнтів моделі.

Для вивчення одночасного впливу ряду чинників (багаточинниковий експеримент) на досліджуваний об'єкт застосовують методи математичного планування експерименту. Математичні методи планування експерименту дозволяють дослідити та оптимізувати складні системи та процеси, забезпечуючи високу ефективність експерименту та точність визначення досліджуваних параметрів [101, 102].

Математична теорія планування експериментальних досліджень полягає в знаходженні таких умов і правил виконання експериментальних досліджень, при яких вдасться отримати надійну та достовірну інформацію про об'єктивність досліджень з найменшою затратою праці, подати цю інформацію в компактній та зручній формі з кількісною оцінкою точності. [103]

Основна особливість методів математичного планування експерименту полягає в тому, що на основі мінімальної кількості дослідів виявляють загальні закономірності в межах зміни кожного заданого чинника. Це досягається завдяки тому, що кожний експеримент відрізняється від інших неповторним сполученням обраних чинників.

За результатами виконаного експерименту треба знайти математичну модель об'єкта дослідження, під якою розуміють рівняння, що зв'язує показники процесу з чинниками, що діють на нього

$$y = \varphi(x_1, x_2, \dots, x_n). \quad (3.2)$$

Головним завданням планування експерименту є розкриття механізму явища, тобто визначення такого аналітичного виразу

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n), \quad (3.3)$$

який у межах допустимих значень чинників досить точно збігається з невідомою залежністю (3.2).

Об'єкт дослідження може мати кілька змінних, що визначають його стан, причому чим їх буде менше, тим стислішим буде план експерименту. Існують різні способи зменшення кількості змінних:

- зміна мети дослідження;
- розподіл досліджуваного об'єкта на складові;
- установлення зв'язку між змінними стану.

Досвід показує, що здебільшого вдається обмежитись однією змінною стану. Якщо ж таких змінних кілька, досліди повторюють щодо кожної з них.

Вибираючи змінну стану, необхідно враховувати такі вимоги:

- вона повинна мати кількісне значення, тобто вимірюватись;
- має однозначно описувати об'єкт дослідження;
- під час виконання дослідів має бути статистично ефективною, тобто з найменшою дисперсією.

Вибір чинників – це найвідповідальніший етап підготовки до планування експерименту, від нього залежить правильність розв'язання поставленої задачі.

Під час виконання експерименту беруть до уваги усі чинники, які можуть суттєво впливати на процес, що вивчається. Вони повинні бути керовані і однозначні. Керувати чинником – значить мати можливість встановлювати потрібне його значення і підтримувати його сталим на час дослідження. Чинники мають безпосередньо діяти на об'єкт дослідження.

Вибираючи чинники, зважаємо на таке:

- кожен чинник має бути регульованим;
- зміна одного чинника немає спричиняти зміни інших;
- точність вимірювання і керування чинниками має бути відомою і достатньо високою.

До чинників та змінних стану водночас висувають і такі вимоги:

– чинники і змінні стану повинні мати області визначення, задані технологічними або принциповими обмеженнями;

– між чинниками та змінними стану має бути однозначна відповідність.  
[101]

Під час дослідження впливу чинників на динаміку протягування поршнем нової поліетиленової труби в зношену сталеву трубу змінною стану будемо вважати середню швидкість протягування, яку будемо визначати фіксуючи час, за який буде виконано протягування. До чинників, які впливають на хід процесу належать:

– об’ємна витрата повітря, яку регулюють краном на виході компресора 1 та вимірюють витратоміром 2 (рисунок 3.7);

– зовнішній діаметр протягуваної поршнем поліетиленової труби;

– геометричний нахил сталеві зношені труби до горизонту, який можна змінювати.

Отже середня швидкість протягування є функцією від наступних параметрів: об’ємна витрата повітря, зовнішній діаметр протягуваної поршнем поліетиленової труби, геометричний нахил труби до горизонту

$$V = f(Q, D_{3,n}, i). \quad (3.4)$$

Щоб спростити планування експерименту значення чинників перетворюємо в умовні одиниці, тобто так, щоб вони відповідали числам  $-1$ ;  $+1$ .

В умовні одиниці їх перетворюємо так:

– встановлюємо мінімальні, максимальні значення (рівні) відповідно до найвигіднішого значення даного чинника:  $x_{i\min}$ ,  $x_{i\max}$ ;

– задаємо інтервал або крок зміни  $h_i$ , тобто таке значення чинників в натуральних одиницях, додавання якого до нульового рівня дає верхній, а віднімання – нижній рівень

$$h_i = x_{i\max} - x_{i\min}; \quad (3.5)$$

– вираховуємо умовне значення рівнів чинників  $(-1; +1)$ .

Кодування чинників означає перехід від системи координат у натуральних одиницях до системи координат у кодованій формі.

Об'ємну витрату повітря, зовнішній діаметр протягнутої поршнем поліетиленової труби, геометричний нахил труби до горизонту змінюватимемо відповідно від 0,002 до 0,005  $\frac{M^3}{c}$ , від 3 мм до 40 мм та від 0 до 0,13.

Уведемо позначення:  $x_1 = Q$ ,  $x_2 = D_{з.н}$ ,  $x_3 = i$ ,  $y = V$ ,

де  $Q$  – об'ємна витрата повітря,  $\frac{M^3}{c}$ ;

$D_{з.н}$  – зовнішній діаметр протягнутої поршнем поліетиленової труби, мм;

$i$  – геометричний нахил труби;

$V$  – середня швидкість протягування поршнем поліетиленової труби,  $\frac{M}{c}$ .

Тоді чинники матимуть такі значення

$$\begin{array}{lll} x_{1\min} = 0,002 \frac{M^3}{c} & x_{2\min} = 32 \text{ мм} & x_{3\min} = 0 \\ x_{1\max} = 0,005 \frac{M^3}{c} & x_{2\max} = 40 \text{ мм} & x_{3\max} = 0,13. \end{array}$$

Інтервали зміни значень чинників дорівнюють

$$h_1 = 0,03 \frac{M^3}{c}, \quad h_2 = 8 \text{ мм}, \quad h_3 = 0,13.$$

Складаємо матрицю планування експерименту, тобто план, який вміщує запис усіх комбінацій чинників у кодованій формі, та робочу матрицю, де усі кодовані значення чинників замінюємо дійсними (таблиця 3.6), і згідно з нею виконуємо експерименти. Дослідження виконуємо для маси поршня 0,13 кг і сили тертя ущільнювальних манжет поршня до стінки сталевого трубопроводу 42,7 Н.



Для експерименту, в якому змінюються три чинники, усі можливі комбінації чинників під час їх зміни на двох рівнях (мінімальному та максимальному) будуть визначені вісьмома експериментами.

**Таблиця 3.6** – Матриця планування експерименту

Номер експерименту	$x_0$	Значення чинників					
		Умовна одиниця			Фактична величина		
		$x_1$	$x_2$	$x_3$	$Q, \frac{M^3}{c}$	$D_{з.п}, мм$	$i$
1	+1	+1	+1	+1	0,005	40	0,13
2	+1	-1	+1	+1	0,002	40	0,13
3	+1	+1	-1	+1	0,005	32	0,13
4	+1	-1	-1	+1	0,002	32	0,13
5	+1	+1	+1	-1	0,005	40	0
6	+1	-1	+1	-1	0,002	40	0
7	+1	+1	-1	-1	0,005	32	0
8	+1	-1	-1	-1	0,002	32	0

**Примітка.**  $x_0$  – це стовпець значень фіктивної величини

Зважаючи на те, що на значення вихідної змінної впливають похибки, досліди повторюємо кілька разів. Отримуємо  $m$  паралельних значень змінної стану. Після отримання результатів експериментів визначаємо середнє значення функції відгуку  $\bar{y}_u$   $u$ -го рядка матриці планування (таблиця 3.7).

За середніми значеннями функції відгуку знаходимо рівняння лінійної моделі або рівняння регресії

Таблиця 3.7 – Експериментальні значення функції відгуку

Номер експерименту	Експериментальні значення функції відгуку				$\bar{y}_u$
	$y_1$	$y_2$	$y_3$	$y_4$	
1	1,39	1,37	1,38	1,39	1,38
2	0,37	0,38	0,39	0,39	0,38
3	1,69	1,69	1,67	1,68	1,68
4	0,81	0,80	0,82	0,80	0,81
5	1,65	1,64	1,65	1,63	1,64
6	0,55	0,55	0,55	0,56	0,55
7	1,91	1,89	1,90	1,89	1,90
8	1,01	0,99	0,99	1,00	1,00

$$y = b_0x + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3. \quad (3.6)$$

Коефіцієнти рівняння визначаємо за формулою

$$b_n = \frac{1}{N} \sum_{u=1}^N x_{nu} \bar{y}_u, \quad (3.7)$$

де  $N$  – кількість рядків матриці планування.

Коефіцієнти рівняння регресії дорівнюють

$$b_0 = 1,168, \quad b_1 = 0,483, \quad b_2 = -0,18, \quad b_3 = -0,105.$$

Тоді лінійне рівняння регресії матиме вигляд

$$V = 1,168 + 0,483Q - 0,18D_{3,n} - 0,105i. \quad (3.8)$$

Після визначення коефіцієнтів рівняння регресії виконуємо статистичний аналіз рівняння регресії, що складається з трьох етапів:

- оцінки дисперсії відтворення або помилки експерименту;
- оцінки значимості коефіцієнтів рівняння регресії;
- оцінки адекватності моделі.

Помилку досліду або дисперсію відтворення  $S_0^2$  оцінюємо за паралельними дослідами. Перед розрахунком помилки досліду необхідно перш за все переконатися, що розсіювання результатів дослідів не перевищує деякого значення. З цією метою розраховуємо рядкові дисперсії  $S_u^2$  і перевіряємо їх однорідність. Розраховуємо за формулою

$$S_u^2 = \frac{1}{m-1} \sum_{k=1}^m (y_{uk} - \bar{y}_u)^2, \quad (3.9)$$

де  $m$  – кількість паралельних дослідів.

Рядкові дисперсії дорівнюють

$$S_1^2 = 0,0011, S_2^2 = 0,0011, S_3^2 = 0,0011, S_4^2 = -0,0011,$$

$$S_5^2 = 0,0011, S_6^2 = 0,0011, S_7^2 = -0,0011, S_8^2 = -0,0011.$$

Перевірити однорідність дисперсії  $S_u^2$  можна за критерієм Кохнера, розрахункове значення якого становить

$$G_p = \frac{S_{u\max}^2}{\sum_{u=1}^N S_u^2}, \quad (3.10)$$

де  $S_{u\max}^2$  – максимальне значення з розрахованих рядкових дисперсій;

$\sum_{u=1}^N S_u^2$  – сума усіх дисперсій за  $N$  рядками матриці планування.

Критерій Кохнера дорівнює  $G_p = 0,5$ .

Якщо виконується умова  $G_p < G_T$  то гіпотеза про однорідність дисперсії справедлива.

Для чисел ступенів свободи  $f_1 = m - 1 = 4 - 1 = 3$  і  $f_2 = N = 8$  та при 5 % значимості (у технічних розрахунках приймають 5 % рівень значимості)  $G_T = 0,52$  [104]. У нашому випадку дисперсія однорідна, тому що  $G_p < G_T$ , а отже можемо визначити помилку експерименту  $S_0^2$  за формулою

$$S_0^2 = \frac{1}{N} \sum_{u=1}^N S_u^2. \quad (3.11)$$

Помилка експерименту дорівнює  $S_0^2 = 2,78 \cdot 10^{-4}$ .

Середньоквадратичне відхилення або похибка відтворюваності дорівнює  $S_0 = 1,67 \cdot 10^{-2}$ .

На другому етапі аналізу рівняння регресії перевіряємо значимість коефіцієнтів рівняння регресії. Щоб оцінити вплив чинників на змінну стану, перевіряємо значимість кожного коефіцієнта двома рівноцінними способами. В обох випадках спочатку визначаємо дисперсію коефіцієнтів регресії за формулою

$$S_{bn}^2 = \frac{S_0^2}{Nm}. \quad (3.12)$$

Дисперсія коефіцієнтів регресії дорівнює  $S_{bn}^2 = 8,68 \cdot 10^{-6}$ .

За першим способом значимість коефіцієнтів регресії оцінюємо за критерієм Стьюдента, розрахункове значення якого дорівнює

$$t_{np} = \frac{|b_n|}{\sqrt{S_{bn}^2}}, \quad (3.13)$$

$$t_{0p} = 484,00, \quad t_{1p} = 79,42, \quad t_{2p} = 61,43, \quad t_{3p} = 44,46.$$

Тоді значимість коефіцієнтів регресії оцінюють, порівнюючи розрахункові  $t_{np}$  і табличне  $t_T$  значення критерію Стюдента. Якщо  $t_{np} > t_T$ , то  $n$ -й коефіцієнт вважається значимим.

Для числа степенів свободи  $f_0 = N(m-1) = 8(4-1) = 24$  та при 5 % значимості табличне значення критерію Стюдента дорівнює  $t_T = 2,06$  [103]. У нашому випадку умова  $t_{np} > t_T$  виконується для кожного коефіцієнта регресії, а отже вони значимі.

За другим способом перевірки значимості коефіцієнтів регресії використовують довірчий інтервал  $\Delta b_n$ , який внаслідок рівності  $S_{bn}$  для всіх коефіцієнтів регресії, буде однаковим для всіх  $b_n$

$$\Delta b_n = \pm \sqrt{S_{bn}^2}, \quad (3.14)$$

$$\Delta b_n = \pm 0,0029. \quad (3.15)$$

Тоді значимість оцінюють, порівнюючи абсолютні значення коефіцієнта регресії і довірчого інтервалу  $|b_n| > |\Delta b_n|$ . У нашому випадку умова  $|b_n| > |\Delta b_n|$  виконується для кожного коефіцієнта, а отже вони значимі.

Третій етап аналізу рівняння регресії – перевірка його адекватності.

Придатність лінійного рівняння для розв'язання задачі пошуку області оптимуму (оптимум – сукупність найсприятливіших умов) перевіряємо порівнянням двох дисперсій: адекватності  $S_{ao}^2$  та помилки досліду  $S_0^2$ .

Дисперсія адекватності показує розсіювання середніх дослідних даних змінної стану  $\bar{y}_u$  відносно тих значень змінної стану  $\tilde{y}_u$ , які розраховують за отриманим рівнянням регресії, значення якої розраховують за формулою

$$S_{ad}^2 = \frac{m}{N-l} \sum_{u=1}^N (\bar{y}_u - \tilde{y}_u)^2, \quad (3.16)$$

де  $l$  – кількість членів у рівнянні регресії, що залишилися після перевірки їх значимості.

Визначаємо значення змінної стану  $\tilde{y}_u$  для кожного рядка за отриманим рівнянням регресії

$$\begin{aligned} \tilde{y}_1 &= 1,402, \quad \tilde{y}_2 = 0,365, \quad \tilde{y}_3 = 1,649, \quad \tilde{y}_4 = 0,829, \\ \tilde{y}_5 &= 1,656, \quad \tilde{y}_6 = 0,545, \quad \tilde{y}_7 = 1,976, \quad \tilde{y}_8 = 1,049. \end{aligned}$$

Дисперсію адекватності обчислюємо за (3.16)  $S_{ad}^2 = 6,12 \cdot 10^{-4}$ .

Адекватність перевіряємо, оцінюючи співвідношення  $F_p = \frac{S_{ad}^2}{S_0^2} = 2,2$  за критерієм Фішера  $F_p < F_T$ .

Табличне значення критерію Фішера при ступенях свободи  $f_{ad} = N-l = 8-4 = 4$  та  $f_0 = N(m-1) = 8(4-1) = 24$  і при 5 % значимості дорівнює  $F_T = 2,78$  [104].

Умова  $F_p < F_T$  виконується, лінійне рівняння регресії адекватне, тобто розсіювання експериментальних даних змінної стану відносно рівняння регресії має такий самий порядок, як і розсіювання, спричинене випадковими змінами в об'ємі дослідження (помилка досліду).

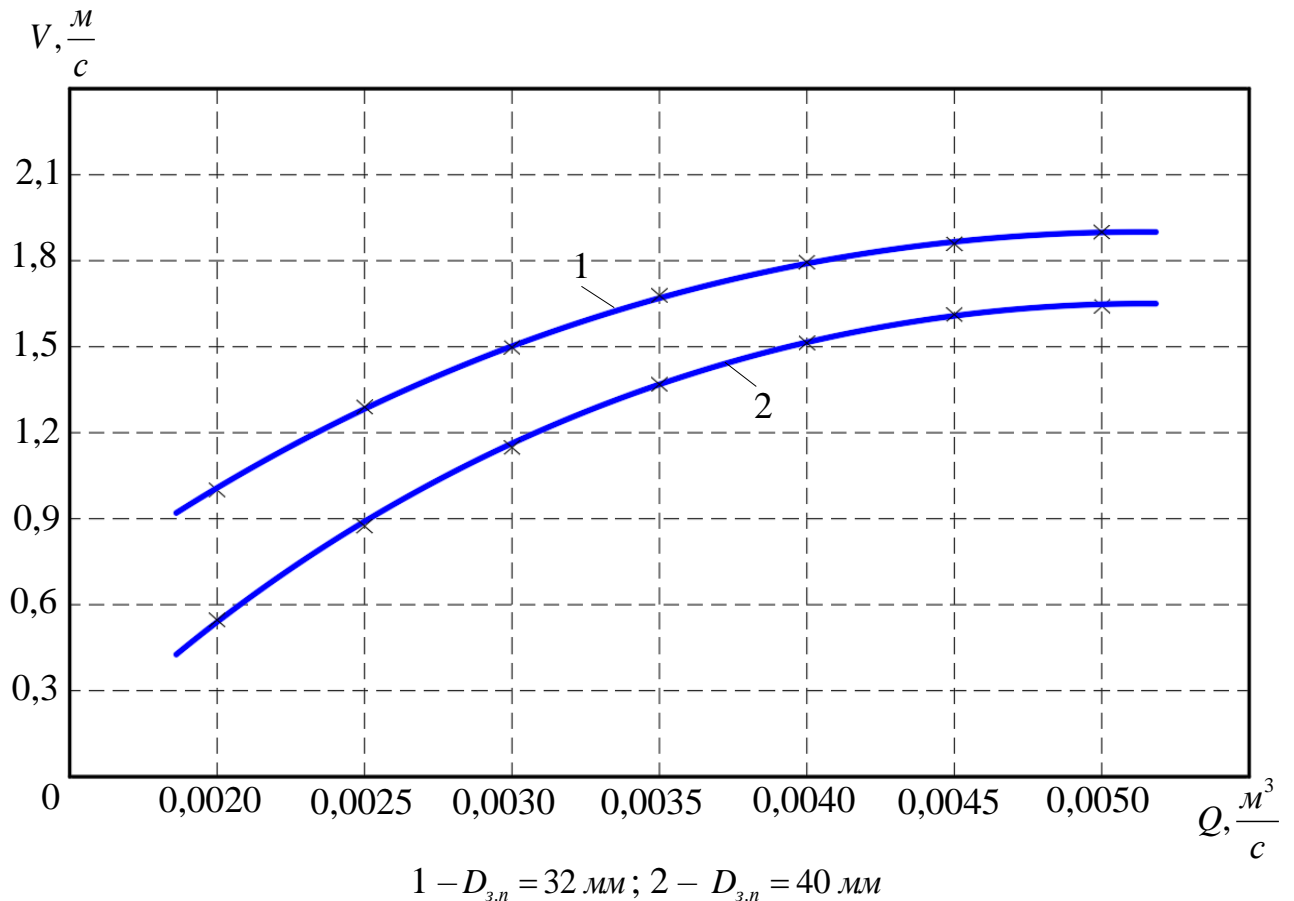
Як видно з результатів перевірки значимості коефіцієнтів рівняння регресії, найбільший вплив на змінну стану (швидкість протягування) має об'ємна витрата повітря, якщо геометричний нахил трубопроводу не перевищує 0,1.

Основним методом регулювання швидкості протягування поршнем поліетиленової труби є зміна об'ємної витрати повітря зміною величини відкривання крана компресора. Тому потрібно експериментально дослідити вплив об'ємної витрати повітря на швидкість протягування поршнем поліетиленової труби.

Для експериментального вивчення функціональної залежності середньої швидкості протягування поршнем поліетиленової труби від об'ємної витрати повітря виконано ряд визначень середньої швидкості протягування  $V$  для різних значень об'ємної витрати повітря  $Q$ , зовнішніх діаметрів протягуваних поліетиленових труб (32 мм та 40 мм). Нахил труби до горизонту відсутній і не змінюється. Вимірювання (для одних і тих самих значень чинників) виконано кілька разів. Середні значення результатів вимірювань занесено у таблицю 3.8 та подано графічно (рисунок 3.12). Такі дослідження дали можливість регулювати швидкість протягування зміною об'ємної витрати повітря.

**Таблиця 3.8** – Результати визначень середньої швидкості протягування поршнем поліетиленової труби для різних значень об'ємної витрати повітря

Номер експерименту	$Q, \frac{m^3}{c}$	$V, \frac{m}{c}$	
		$D_{з.н} = 32 \text{ мм}$	$D_{з.н} = 40 \text{ мм}$
1	0,0020	1,00	0,55
2	0,0025	1,29	0,87
3	0,0030	1,50	1,15
4	0,0035	1,68	1,37
5	0,0040	1,79	1,51
6	0,0045	1,86	1,61
7	0,0050	1,90	1,64



**Рисунок 3.12** – Залежність швидкості протягування поршнем поліетиленової труби від об'ємної витрати повітря

Для дослідження функціонального зв'язку  $V = f(Q)$ , щоб виявити можливість отримати аналітичну залежність середньої швидкості протягування  $V$  від об'ємної витрати повітря  $Q$  для кожного зовнішнього діаметра поліетиленової труби ( $D_{3.n} = 32 \text{ мм}$ ,  $D_{3.n} = 40 \text{ мм}$ ), застосовуємо кореляційний аналіз. Ступінь тісності зв'язку оцінюємо за коефіцієнтом кореляції  $r$ , який визначаємо за формулою

$$r = \frac{n \sum Q_i V_i - \sum Q_i \sum V_i}{\sqrt{(n \sum Q_i^2 - (\sum Q_i)^2) (n \sum V_i^2 - (\sum V_i)^2)}}, \quad (3.17)$$

де  $n$  – кількість вимірів;



$Q_i, V_i$  – значення вимірів.

Властивості коефіцієнту кореляції такі, що коли  $r = \pm 1$ , то між корелюючими величинами існує функціональна лінійна залежність. Чим далі абсолютна величина  $r$  від одиниці й ближча, тим слабший зв'язок. Якщо значення  $r$  позитивне, то між змінними існує пряма залежність. Значення коефіцієнта кореляції визначене за (3.5)  $r = 0,974$  для зовнішнього діаметра поліетиленової труби 32 мм і  $r = 0,967$  для зовнішнього діаметра поліетиленової труби 40 мм свідчить про тісний зв'язок між об'ємною витратою повітря  $Q$  та середньою швидкістю протягування  $V$ .

Графічна залежність між отриманими дослідними значеннями (рисунок 3.12) свідчить про схильність рівняння регресії до степеневій функції типу

$$V = aQ^b. \quad (3.18)$$

Щоб знайти значення коефіцієнтів  $a$  і  $b$ , рівняння (3.18) лінеаризуємо методом логарифмування  $\lg V = \lg a + b \lg Q$  і замінено  $x = \lg Q$ ,  $y = \lg V$ ,  $a_1 = b$ ,  $b_1 = \lg a$ .

Отже отримуємо лінійне рівняння

$$y = a_1 x + b_1. \quad (3.19)$$

Параметри  $a_1$  і  $b_1$  перетвореної залежності визначаємо методом найменших квадратів, який заснований на тому, що найкраще рівняння емпіричної регресії дає функція, для якої сума квадратів відхилень експериментальних значень функції від розрахункових за рівнянням регресії має найменше значення, тобто

$$a_1 = \frac{n \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} = \frac{n \sum \lg Q_i \lg V_i - \sum \lg Q_i \sum \lg V_i}{n \sum \lg^2 Q_i - (\sum \lg Q_i)^2}, \quad (3.20)$$

$$b_1 = \frac{\sum y_i - a_1 \sum x_i}{n} = \frac{\sum \lg V_i - a_1 \sum \lg Q_i}{n}. \quad (3.21)$$

Для зовнішнього діаметра поліетиленової труби 32 мм підставивши відповідні значення в рівняння (3.20) і (3.21), отримуємо  $a_1 = 0,694$ ,  $b_1 = 1,907$ . Враховуючи, що  $a_1 = b$ , а  $b_1 = \lg a$ , визначаємо  $a = 80,65$ ,  $b = 0,694$ .

Тоді для зовнішнього діаметра поліетиленової труби 40 мм отримане емпіричне рівняння матиме вигляд

$$V = 80,65Q^{0,694}. \quad (3.22)$$

Для зовнішнього діаметра поліетиленової труби 40 мм  $a_1 = 1,178$ ,  $b_1 = 2,984$ ,  $a = 964,2$ ,  $b = 1,178$ .

Тоді для зовнішнього діаметра поліетиленової труби 40 мм отримане емпіричне рівняння матиме вигляд

$$V = 964,2Q^{1,178}. \quad (3.23)$$

Експериментально досліджено залежність швидкості протягування від довжини протягнутої поршнем ділянки поліетиленової труби зношеною сталевією для різних об'ємних витрат повітря. Вимірювалась швидкість протягування (фіксувався час, за який нанесені на поліетиленову трубу з кроком 0,25 м чорні

позначки заходять в кільцеві гумові ущільнення (рисунок 3.7)), при сталій об'ємній витраті повітря.

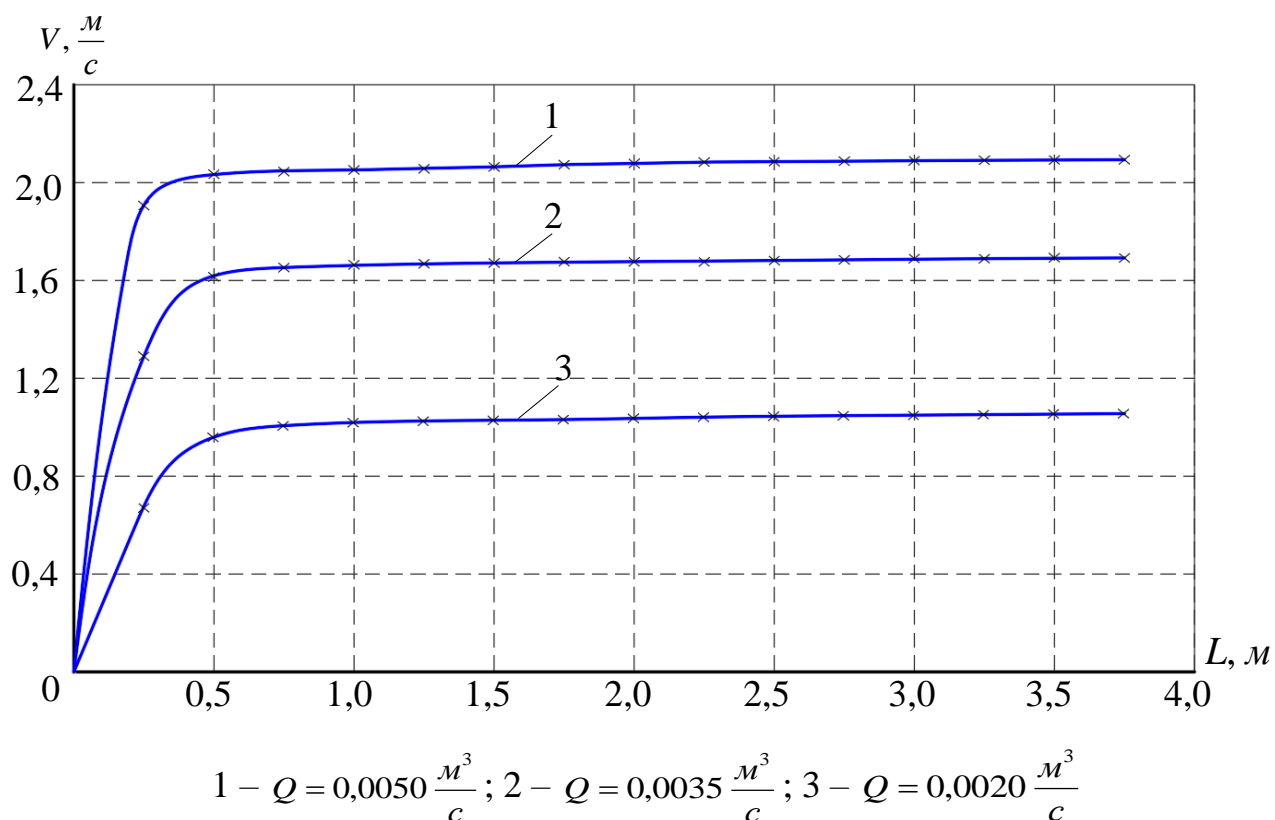
За виконаним рядом вимірювань швидкості протягування поршнем нової поліетиленової труби зношеною сталеву побудовано криві залежності швидкості протягування  $V$  від довжини протягнутої поршнем ділянки поліетиленової труби в сталеву для сталих значень об'ємної витрати. Дослідження виконувались для поліетиленових труб зовнішнім діаметром 32 мм (таблиця 3.9), (рисунок 3.13) та 40 мм (таблиця 3.10), (рисунок 3.14). З отриманих графічних залежностей видно, що на початковому етапі швидкість протягування поршнем поліетиленової труби різко зростає. Після такого різкого зростання на початку протягування відбувається незначне її збільшення.

**Таблиця 3.9** – Результати вимірювань швидкості протягування поршнем поліетиленової труби  $V$  зовнішнім діаметром 32 мм в сталеву

Номер експерименту	$L, м$	$V, \frac{м}{с}$		
		$Q = 0,0020 \frac{м^3}{с}$	$Q = 0,0035 \frac{м^3}{с}$	$Q = 0,0050 \frac{м^3}{с}$
1	2	3	4	5
1	0,25	0,67	1,29	1,91
2	0,50	0,96	1,62	2,03
3	0,75	1,01	1,65	2,04
4	1,00	1,02	1,66	2,05
5	1,25	1,02	1,67	2,06
6	1,50	1,03	1,67	2,07
7	1,75	1,03	1,68	2,07
8	2,00	1,03	1,68	2,08
9	2,25	1,04	1,68	2,09

Кінець таблиці 3.9

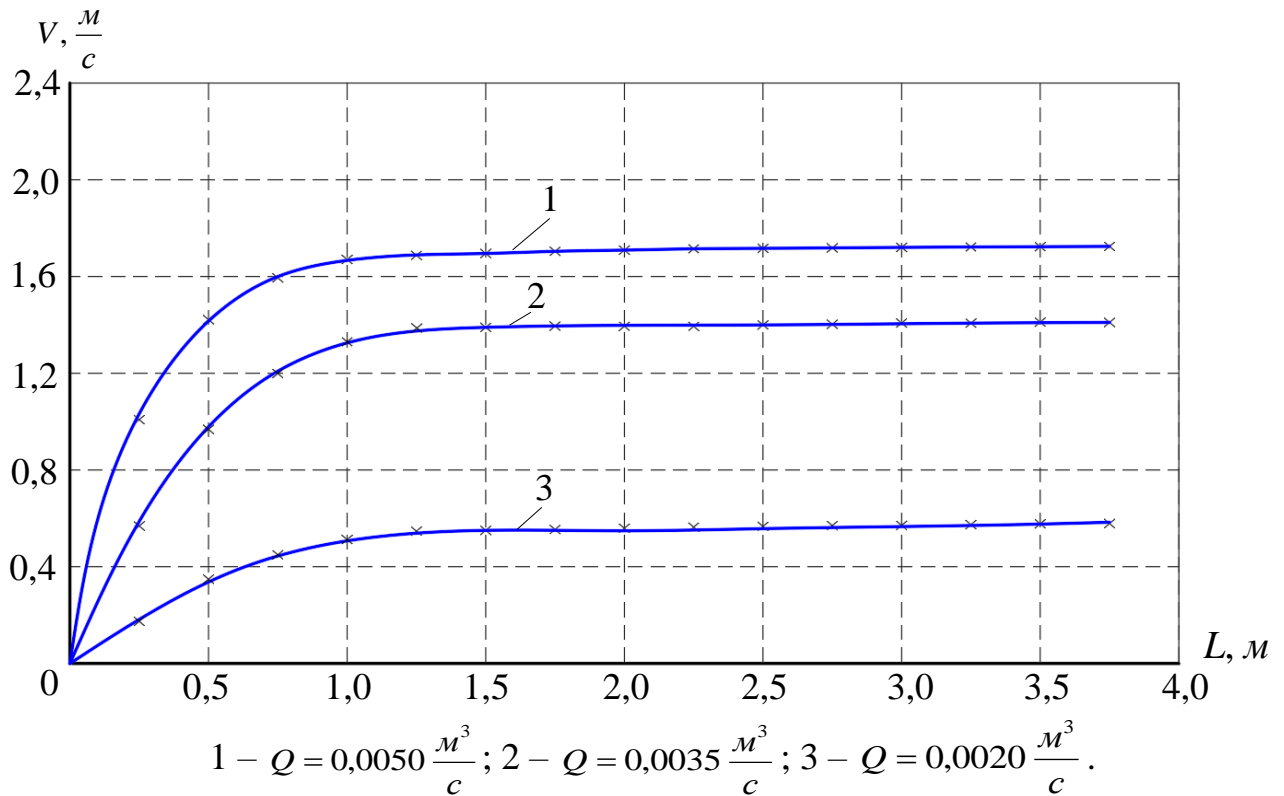
1	2	3	4	5
10	2,50	1,04	1,68	2,09
11	2,75	1,05	1,69	2,09
12	3,00	1,05	1,69	2,09
13	3,25	1,05	1,69	2,09
14	3,50	1,05	1,69	2,09
15	3,75	1,06	1,69	2,10



**Рисунок 3.13** – Залежність швидкості протягування  $V$  від довжини протягнутої поршнем ділянки поліетиленової труби зовнішнім діаметром 32 мм у сталеву

**Таблиця 3.10** – Результати вимірювань швидкості протягування поршнем поліетиленової труби  $V$  зовнішнім діаметром 40 мм в сталеву

Номер експерименту	$L, м$	$V, \frac{м}{с}$		
		$Q = 0,0020 \frac{м^3}{с}$	$Q = 0,0035 \frac{м^3}{с}$	$Q = 0,0050 \frac{м^3}{с}$
1	0,25	0,27	0,57	1,01
2	0,50	0,35	0,97	1,42
3	0,75	0,45	1,20	1,59
4	1,00	0,51	1,32	1,67
5	1,25	0,55	1,38	1,69
6	1,50	0,55	1,39	1,70
7	1,75	0,55	1,40	1,71
8	2,00	0,55	1,40	1,71
9	2,25	0,56	1,40	1,72
10	2,50	0,56	1,40	1,72
11	2,75	0,56	1,40	1,72
12	3,00	0,57	1,40	1,72
13	3,25	0,57	1,40	1,72
14	3,50	0,57	1,41	1,72
15	3,75	0,58	1,41	1,72



**Рисунок 3.14** – Залежність швидкості протягування від довжини протягнутої поршнем ділянки поліетиленової труби зовнішнім діаметром 40 мм у сталеву

### Висновки до розділу 3

1. Розроблена та виготовлена експериментальна установка, яка дає змогу визначати оптимальні параметри процесу протягування поршнем нового поліетиленового трубопроводу в зношений сталевий та підбирати обладнання і матеріали для виконання робіт. На базі експериментальних випробувань встановлено, що протягування поршнем нового поліетиленового трубопроводу зношеним сталевим є можливим і технологічним і може застосовуватись для реконструкції трубопроводів газових і теплових мереж, а час підготовки обладнання до виконання робіт складає 1 – 2 хв.

2. Експериментально визначено сили опору, які діють на рухому систему, під час протягування нової поліетиленової труби в зношену горизонтальну та похилу сталеву. Експериментальні значення порівняно з розрахунковими та підтверджено достовірність теоретично виведених залежностей. Експериментально встановлено, що сила тертя манжет поршня до стінок

зношеного сталевих трубопроводу складає 42,7 Н, а сила тертя поліетиленової труби в манжетах ущільнювальної системи 84,7 Н і 103,9 Н для поліетиленових труб зовнішнім діаметром 32 мм і 40 мм відповідно. Такі сили опору є незначними та не чинять суттєвого впливу на процес протягування. Сила тертя одного метра поліетиленової труби до сталевих є мізерна і знаходиться в межах від 1 Н до 2 Н, а отже протягуванням поршнем нового поліетиленового трубопроводу в зношеній сталевій можна реконструювати протяжні ділянки трубопроводів газових і теплових мереж.

3. Експериментально визначено закономірності зміни тиску повітря на початку трубопроводу в часі під час руху поршня сталевих трубою та під час протягування поршнем поліетиленової труби зношеною сталевих. Встановлено, що тиск після відкривання крана на виході компресора, до початку руху поршня (без прикріпленої до нього поліетиленової труби), в два рази більший ніж тиск під час його руху, а одразу після зрушення поршня відбувається значне падіння тиску. Якщо ж поршень протягує поліетиленову трубу то після зрушення також відбувається падіння тиску, але значно менше. Достовірність теоретично виведених залежностей підтвердила рівність експериментально визначеного тиску на виході компресора і розрахованого.

4. Експериментально досліджено залежність середньої швидкості протягування поршнем поліетиленової труби від об'ємної витрати повітря, зовнішнього діаметра протягуваної поршнем поліетиленової труби та геометричного нахилу сталевих зношеної труби до горизонту. Такі дослідження виконувались методом математичного планування експерименту. На основі визначення значимості коефіцієнтів рівняння регресії, встановлено, що основним чинником, який чинить найбільший вплив на швидкість протягування поршнем поліетиленової труби є об'ємна витрата повітря.

5. Експериментально досліджено залежність швидкості протягування поршнем поліетиленової труби зношеною сталевих залежно від об'ємної витрати повітря. Кореляційним аналізом отримано аналітичні залежності між середньою швидкістю протягування та об'ємною витратою повітря. Такі дослідження дали

можливість регулювати швидкість протягування поршнем поліетиленової труби сталевую.

6. Експериментально досліджено залежність швидкості протягування від довжини протягнутої поршнем ділянки поліетиленової труби зношеною сталевую для різних об'ємних витрат повітря. Встановлено, що швидкість протягування на початку виконання робіт різко зростає. Після такого різкого зростання на початку протягування відбувається незначне її збільшення. Так, при об'ємній витраті повітря  $0,005 \frac{M^3}{c}$  середня швидкість протягування поршнем поліетиленової труби зовнішнім діаметром 32 мм складає  $2,1 \frac{M}{c}$ , а зовнішнім діаметром 40 мм –  $1,7 \frac{M}{c}$ , що є надзвичайно великою швидкість і її неможливо досягнути жодним з існуючих методів безтраншейної реконструкції трубопроводів газових і теплових мереж.

Основні наукові результати розділу опубліковані в працях [17, 23].



**РОЗДІЛ 4**  
**РОЗРОБЛЕННЯ ТЕХНІКИ ТА ТЕХНОЛОГІЇ БЕЗТРАНШЕЙНОЇ**  
**РЕКОНСТРУКЦІЇ ТРУБОПРОВІДІВ ГАЗОВИХ І ТЕПЛОВИХ МЕРЕЖ**  
**“ТЯГОВИЙ ПОРШЕНЬ<sup>®</sup>” ТА “ТЯГОВИЙ ПОРШЕНЬ<sup>®</sup>”**

Розроблено техніку та технології безтраншейної реконструкції трубопроводів газових і теплових мереж протягуванням поршнем нового поліетиленового трубопроводу в зношений сталевий – “Тяговий поршень<sup>®</sup>” та протягуванням поршнем рукава в зношений сталевий трубопровід – “Тяговий поршень<sup>®</sup>”. Наведено результати промислової апробації та впровадження розроблених технологій у виробництво.

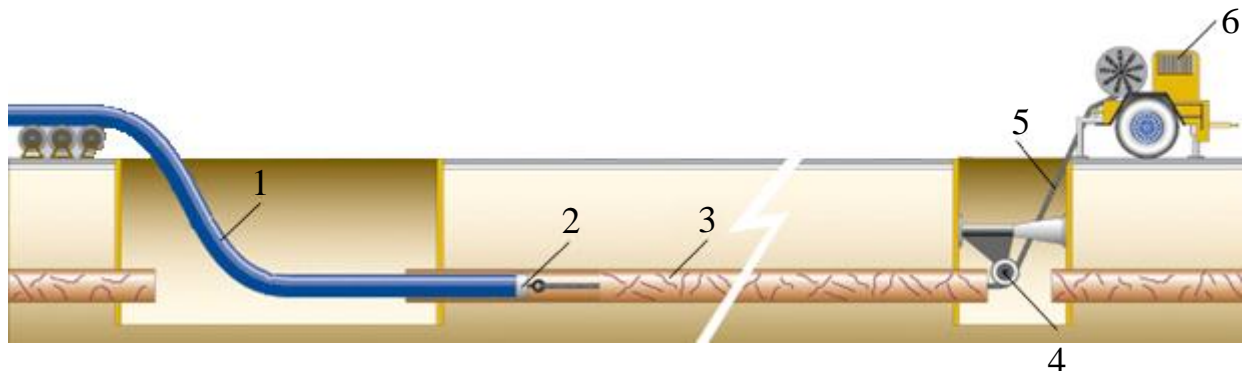
4.1 Розроблення техніки та технології безтраншейної реконструкції трубопроводів газових і теплових мереж – “Тяговий поршень<sup>®</sup>”

Одним з методів безтраншейної реконструкції трубопровідних комунікацій є протягування поліетиленової труби меншого діаметра в зношений сталевий трубопровід – метод “труба в трубі” (рисунок 4.1). Поліетиленовий трубопровід в зношений сталевий протягують тяговими засобами, якими можуть бути:

- лебідки (рисунок 4.1);
- гідродомкратні установки;
- трактори, бульдозери, інша колісна техніка;
- статична установка Grundoburst (рисунок 4.2).

Для того щоб протягнути поліетиленовий трубопровід тракторами, бульдозерами тяговий трос виводять з приймального котловану системою поворотних блоків. Гідродомкратні установки, статичну установку Grundoburst розміщують у приймальному котловані.

Перед безтраншейною реконструкцією трубопроводів треба розробити приймальний котлован достатніх розмірів для розміщення в ньому тягових засобів або поворотних блоків, вирізати в приймальному котловані катушку



1 – новий поліетиленовий трубопровід; 2 – оголовок; 3 – зношений сталевий трубопровід; 4 – поворотний блок; 5 – тяговий трос; 6 – лебідка

**Рисунок 4.1** – Схема протягування нового поліетиленового трубопроводу в зношений сталевий лебідкою, розміщеною біля приймального котловану



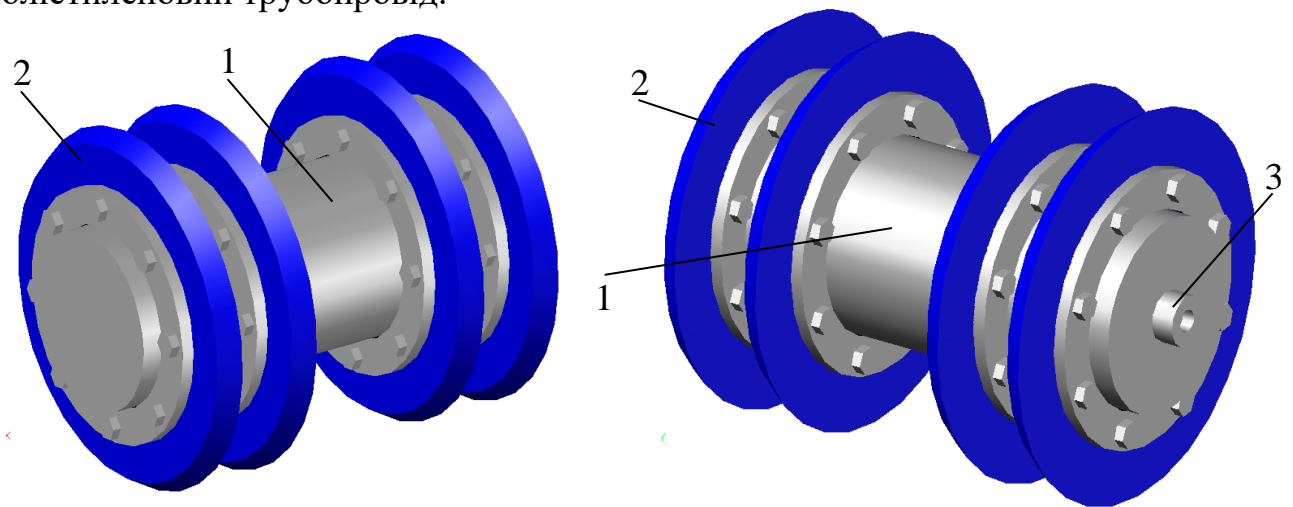
**Рисунок 4.2** – Протягування нового трубопроводу в зношений системою Grundoburst

труби, розмістити тягові засоби або поворотні блоки в приймальному котловані, прокласти в зношений сталевий трубопровід тяговий трос, очистити внутрішню порожнину зношеного трубопроводу протягуванням ним очисного поршня, ще раз прокласти тяговий трос, яким буде протягуватись новий поліетиленовий трубопровід. Все це вимагає багато часу і фінансові витрати. Також треба

розробляти великий приймальний котлован, а в ускладнених умовах цей метод застосувати надзвичайно складно.

Щоб усунути ці недоліки розроблено технологію “Тяговий поршень<sup>®</sup>”, яка полягає в протягуванні поршнем нового поліетиленового трубопроводу в зношений сталевий [17, 18, 24, 29]. Можливість реалізації ідеї реконструкції трубопроводів газових і теплових мереж протягуванням поршнем в зношений сталевий трубопровід нового поліетиленового трубопроводу було теоретично обґрунтовано (розділ 2) та експериментально підтверджено (розділ 3).

Розроблено тяговий поршень (рисунок 4.3), який складається з корпусу 1 на якому закріплені чотири манжети 2 попарно з двох кінців поршня. Кінці манжет поршня загнуті в сторону протилежну напрямку руху поршня, таким чином повітрям, під тиском якого поршень рухається, манжети щільно притискаються до стінки труби і перетоків через поршень не буде. На задньому торці корпусу поршня розміщена втулка 3 для прикручування тяги до якої буде кріпитись новий поліетиленовий трубопровід.

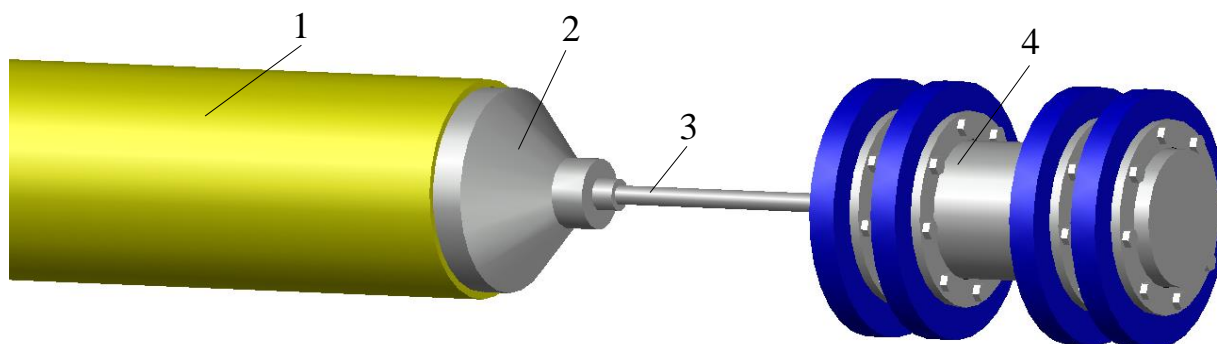


1 – корпус; 2 – манжета; 3 – втулка

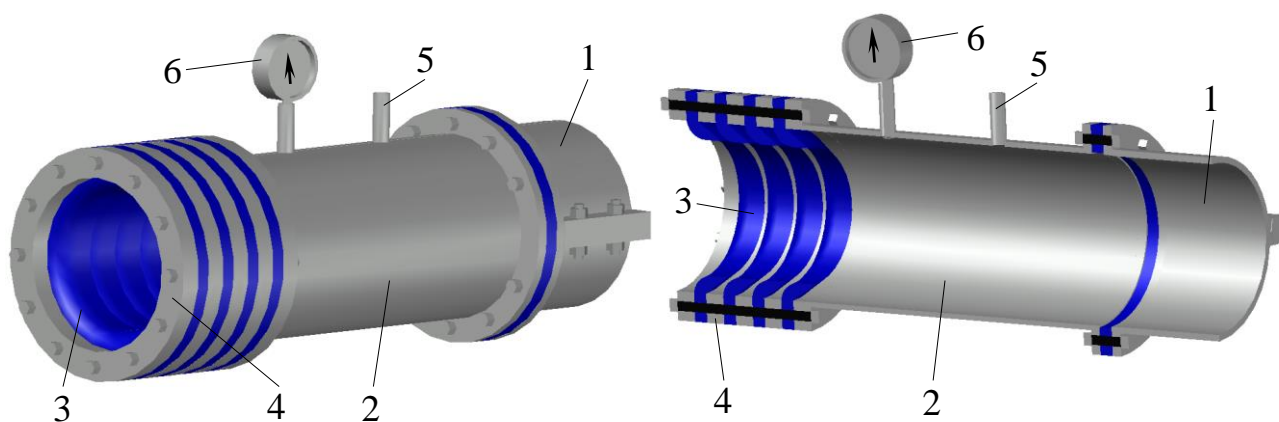
**Рисунок 4.3** – Тяговий поршень

До поршня 4 штангою 3 за оголовок 2 кріпиться ділянка нового поліетиленового трубопроводу 1 (рисунок 4.4). Щоб поршень рухався сталевим трубопроводом у запоршневий простір треба подавати під тиском повітря. При цьому, щоб у запоршневому просторі підтримувався необхідний тиск, треба

герметизувати простір між новим поліетиленовим трубопроводом та зношеним сталевим. Для цього розроблено ущільнювальну систему (рисунок 4.5), яку в робочому котловані або колодязі фланцем чи хомутом 1 треба прикріпити до торця зношеного сталевого трубопроводу. Міжтрубний простір ущільнюється кільцевими гумовими ущільненнями 3, які затиснені фланцями 4. Кільцеві гумові ущільнення 3 повинні герметизувати міжтрубний простір і не випускати з нього повітря та забезпечити можливість протягування нового 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 гумових ущільнень 3 залежить від тиску в міжтрубному просторі. Повітря подається від компресора, який приєднують до патрубку 5, а тиск в міжтрубному просторі вимірюється манометром 6.



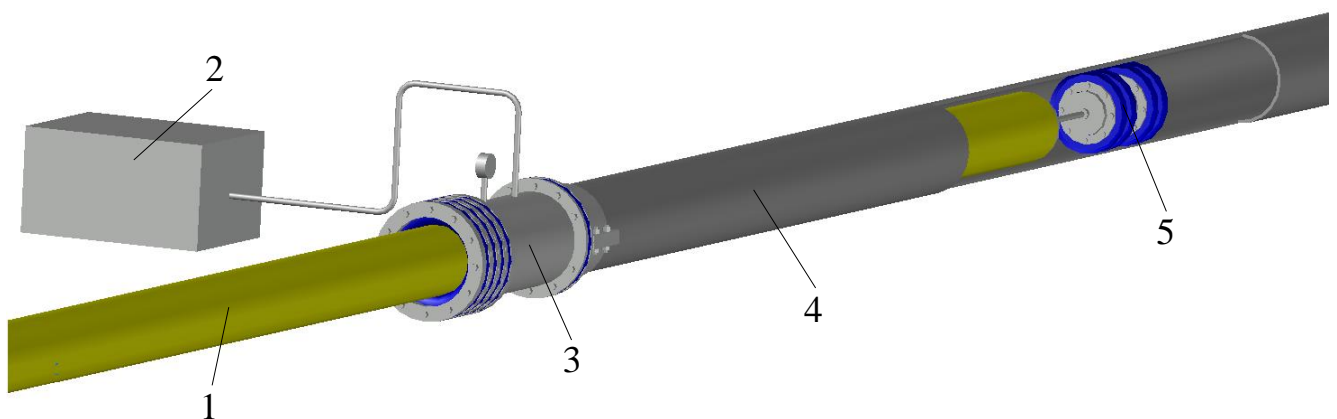
**Рисунок 4.4** – Кріплення поршня до протягуваного поліетиленового трубопроводу



1 – хомут; 2 – трубна котушка; 3 – гумові ущільнення; 4 – фланець; 5 – патрубок для приєднання компресора; 6 – манометр

**Рисунок 4.5** – Ущільнювальна система

На монтажному майданчику біля робочого котловану до початку протягнутого поліетиленового трубопроводу кріплять оголовок 2 та тягу 3 (рисунок 4.6). Тоді поліетиленовий трубопровід з оголовком проштовхують в ущільнювальну систему через кільцеві гумові ущільнення. Після чого до прикріпленої до оголовка тягової штанги кріплять поршень. Поршень і ущільнювальну систему з проштовхнутим в неї початком нового поліетиленового трубопроводу поміщають у робочий котлован. У 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 у 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 зтягуючи за собою новий поліетиленовий трубопровід у зношений сталевий (рисунок 4.6). Під час протягування необхідно вимірювати довжину зтягнутого в зношений сталевий трубопровід нового поліетиленового. Одночасно з протягуванням поліетиленового трубопроводу відбувається очищення внутрішньої порожнини зношеного сталевого трубопроводу поршнем.



1 – протягуваний поліетиленовий трубопровід; 2 – компресор; 3 – ущільнювальна система; 4 – зношений сталевий трубопровід; 5 – поршень

**Рисунок 4.6** – Протягування поршнем нового поліетиленового трубопроводу в зношений сталевий

#### 4.2 Розроблення техніки та технології безтраншейної реконструкції трубопроводів газових і теплових мереж – “Тяговий поршень<sup>®</sup>”

Рукав, так як і поліетиленовий трубопровід, у зношений сталевий трубопровід протягують тяговими засобами, якими можуть бути:

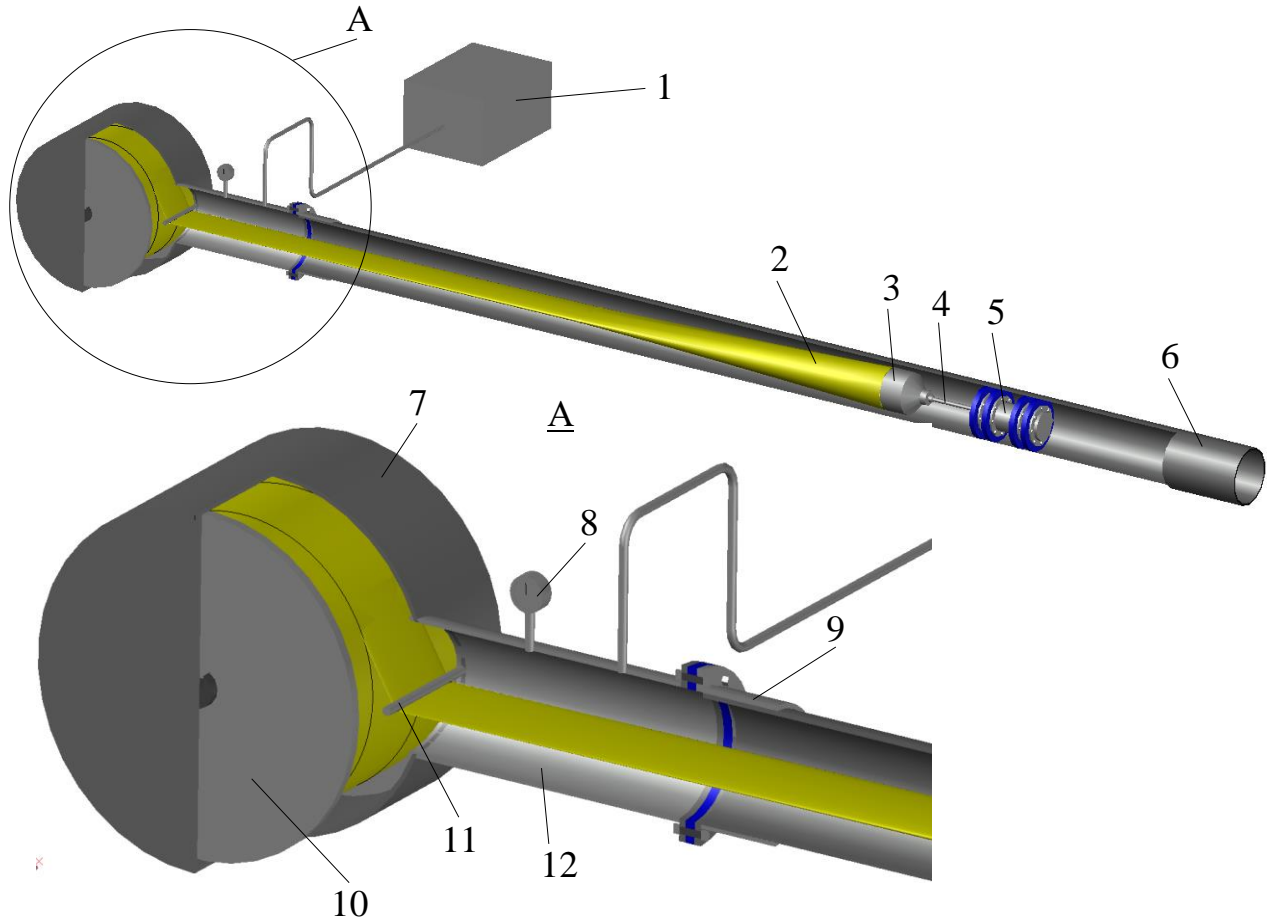
- лебідки;
- гідродомкратні установки;
- трактори, бульдозери, інша колісна техніка.

Перед безтраншейною реконструкцією трубопроводів рукавом треба розробити приймальний котлован, достатніх розмірів для розміщення у ньому тягових засобів або поворотних блоків, вирізати в приймальному котловані котушку труби, розмістити тягові засоби або поворотні блоки в приймальному котловані, прокласти в зношений сталевий трубопровід тяговий трос, очистити внутрішню порожнину зношеного трубопроводу протягуванням ним очисного поршня, ще раз прокласти тяговий трос, яким буде протягуватись рукав. Все це вимагає багато часу і фінансові витрати. Також треба розробляти великий приймальний котлован, а в ускладнених умовах цей метод застосувати надзвичайно складно.

Щоб усунути ці недоліки розроблено технологію “Тяговий поршень<sup>®</sup>”, яка полягає в протягуванні поршнем рукава в зношений сталевий трубопровід [19, 25, 29]. Ідею реконструкції газових і теплових мереж протягуванням поршнем у зношений сталевий трубопровід рукава можливо реалізувати, що було встановлено теоретичними дослідженнями наведеними в розділі 2. Поршень для протягування рукава такий ж, як і для протягування нового поліетиленового трубопроводу в зношений сталевий (рисунок 4.3).

Обладнання для реконструкції зношеного сталевого трубопроводу 6 (рисунок 4.7) складається з поршня 5, до якого тягою 4 за оголовок 3 кріплять рукав 2, трубної котушки 12 та герметичної циліндричної камери 7. Трубну котушку 12 кріплять до зношеного сталевого трубопроводу 6 фланцем або муфтою 9 в робочому котловані. Трубна котушка 12 містить патрубков для

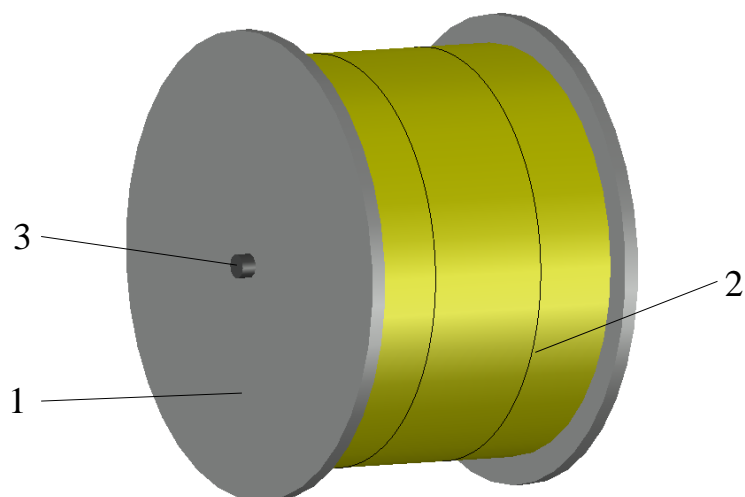
приєднання компресора 1 та манометр 8. У циліндричній камері 7 знаходиться барабан 10 з намотаним на нього рукавом 2. Циліндрична камера 7 містить направляючий стрижень 11, який запобігає тертю рукава 2 до стінок камери 7. Діаметр циліндричної камери 7 залежить від необхідної довжини рукава 2.



1 – компресор; 2 – рукав; 3 – оголовок; 4 – тяга; 5 – поршень; 6 – зношений сталевий трубопровід; 7 – циліндрична камера; 8 – манометр; 9 – муфта; 10 – барабан; 11 – направляючий стрижень; 12 – трубна котушка

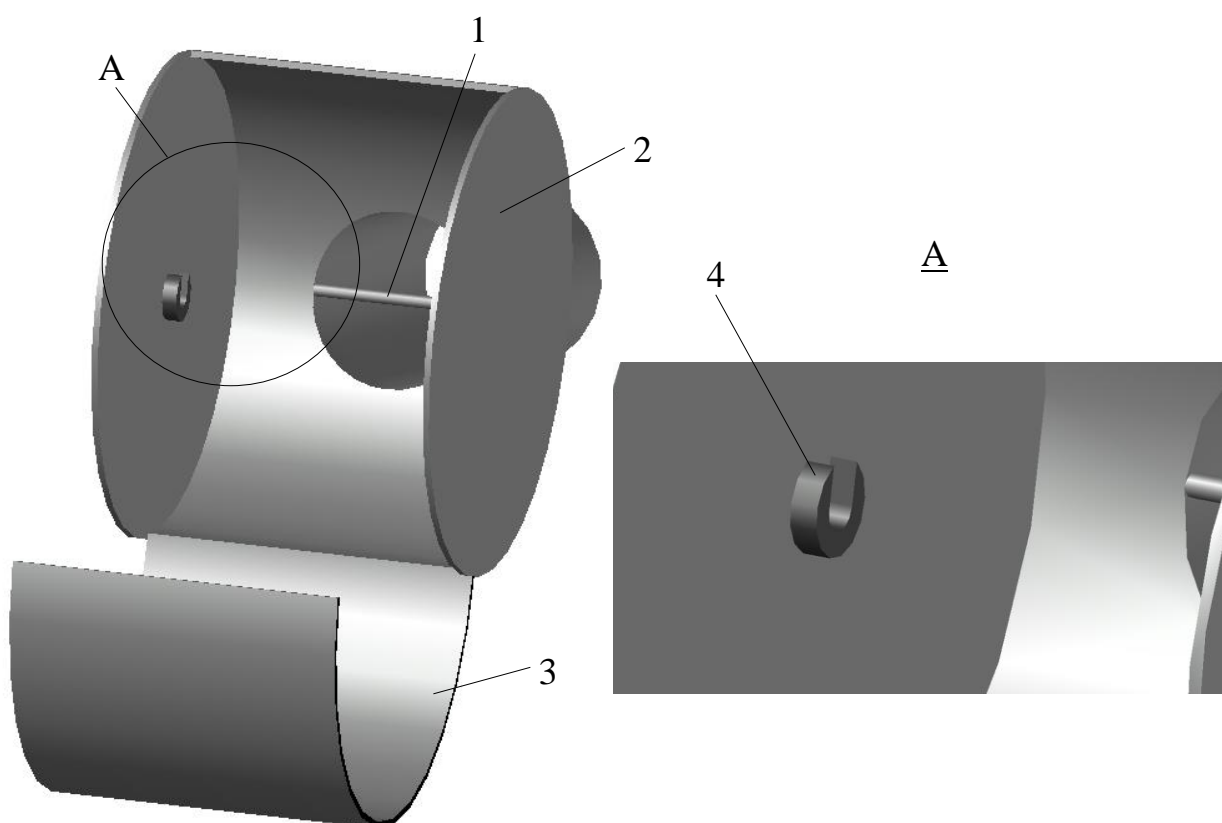
**Рисунок 4.7** – Протягування поршнем рукава в зношений сталевий трубопровід

У майстерні або на монтажному майданчику рукав 2 намотують на барабан 1 (рисунок 4.8). У центрі фланців барабана 1 виконано циліндричні виступи 3. На монтажному майданчику відкривають кришку 4 циліндричної камери 2 (рисунок 4.9) і в приварені до бічних стінок камери пази 3 поміщають барабан (циліндричні виступи фланців барабана повинні зайти в пази) з намотаним рукавом і закривають кришку. Тоді початок рукава витягують з трубної котушки привареної до циліндричної камери і до нього кріплять оголовок та поршень. У



1 – барабан; 2 – рукав; 3 – виступ

**Рисунок 4.8** – Барабан з намотаним рукавом



1 – направляючий стрижень; 2 – циліндрична камера; 3 – паз; 4– кришка

**Рисунок 4.9** – Підготовлена до поміщення барабана циліндрична камера

робочому котловані поршень запасовують у сталевий зношений трубопровід. Тоді до торця дефектного трубопроводу фланцем або хомутом кріплять трубну котушку з привареною до неї циліндричною камерою. До патрубку трубної котушки приєднують компресор, яким закачують повітря в простір між сталевим



трубопроводом і рукавом. Повітря поступає в запоршневий простір, тиск за поршнем зростає і він починає рухатись зтягуючи за собою рукав у зношений сталевий трубопровід. Під час протягування відбувається очищення внутрішньої порожнини зношеного сталевого трубопроводу поршнем. Тиск у трубній котушці вимірюється манометром.

#### 4.3 Промислова апробація та впровадження результатів дисертаційної роботи

Результати дисертаційної роботи промислово апробовані та впроваджені в промислову експлуатацію в СП “Київські теплові мережі” КП “Київтеплоенерго” РТМ “Печерськ”. Зокрема, з метою реконструкції зношених трубопроводів теплових мереж використано аналітичні матеріали дисертаційної роботи щодо протягування поршнем нового поліетиленового трубопроводу, рукава в зношений сталевий трубопровід. Технічним результатом застосування таких технології є зменшення часу робочого процесу, зменшення обсягу підготовчих робіт, спрощення процесу протягування нового трубопроводу, рукава, збільшення швидкості протягування, забезпечення можливості застосування в ускладнених міських умовах. Перед виконанням реконструкції не треба розробляти приймальний котлован, що не завжди можливо до і під час виконання робіт.

Зокрема технологію протягування поршнем нового поліетиленового трубопроводу – “Тяговий поршень<sup>®</sup>” було промислово апробовано на теплопроводі РТМ Печерськ який перетинає вулицю Жилянська (м. Київ) (рисунок 4.10). Теплопровід був збудований в 1974 році до будинку за адресом Жилянська, 40. Для подавання гарячої води до цього будинку з ТК №727/6 тепловід було прокладено під автодорогою шириною 20 метрів. З розширенням міста Києва у 1998 році автомобільну дорогу було розширено з 2 рядів до 4 рядів. З 2003 до 2016 року на цій ділянці було виявлено та відремонтовано 5 пошкоджень традиційною технологією перекриваючи частину автодороги, розкопуючи та замінюючи частину теплотраси, ускладнюючи при цьому рух

автотранспорту та руйнуючи частину дорожнього покриття. У 2018 році було проведено огляд трубопроводу та прийнято рішення щодо його реконструкції. У зв'язку з значним зростанням трафіку автотранспорту цією вулицею було прийнято рішення промислово апробувати технологію “Тяговий поршень<sup>®</sup>” та виконати безтраншейну реконструкцію теплопроводу.



а) – вулиця Жилянська в місці перетинання її теплопроводом; б) – оглядання колодязя; в) – запускання поршня; г) – протягування поршнем нового поліетиленового трубопроводу

**Рисунок 4.9** – Промислова апробація технології протягування поршнем нового поліетиленового трубопроводу в дефектний сталевий “Тяговий поршень<sup>®</sup>”

Під час промислової апробації технології “Тяговий поршень<sup>®</sup>” поршнем було протягнуто 46 м металопластикової труби зовнішнім діаметром 50 мм у зношену сталеву внутрішній діаметр якої складав 76 мм.

Акт та довідка про впровадження технології “Тяговий поршень<sup>®</sup>” та технології “Тяговий поршень<sup>®</sup>” наведено в додатку Б.

## Висновки до розділу 4

1. Розроблено техніку та технологію безтраншейної реконструкції трубопроводів газових і теплових мереж “Тяговий поршень<sup>Ⓟ</sup>”, яка полягає в протягуванні поршнем нового поліетиленового трубопроводу в зношений сталевий. Особливістю цієї технології 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.

2. Розроблено техніку та технологію безтраншейної реконструкції трубопроводів газових і теплових мереж “Тяговий поршень<sup>Ⓟ</sup>”, яка полягає в протягуванні поршнем нового поліетиленового рукава в зношений сталевий трубопровід. Особливістю цієї технології є те, що барабан з намотаним рукавом поміщається в приєднану до зношеного сталевого трубопроводу герметичну циліндричну камеру. При цьому попередньо у зношений сталевий трубопровід запасовують поршень і до нього кріплять рукав. Тоді подають компресором повітря у запоршневий простір і поршень протягує рукав зношеним сталевим трубопроводом.

3. Результати виконаних досліджень, розроблена техніка та технологія безтраншейної реконструкції трубопроводів газових і теплових мереж – “Тяговий поршень<sup>Ⓟ</sup>” та “Тяговий поршень<sup>Ⓟ</sup>” промислово апробовані та впроваджені у СП “Київські теплові мережі” КП “Київтеплоенерго” РТМ “Печерськ”.

Основні наукові результати розділу опубліковані в працях [15–17, 22, 23, 27].

## ВИСНОВКИ

На основі виконаних теоретичних і експериментальних досліджень процесу протягування поршнем нового поліетиленового трубопроводу чи рукава зношеним сталевим трубопроводом, газодинамічних процесів у внутрішній порожнині сталевих трубопроводів під час виконання таких робіт вирішено важливу науково-технічну задачу швидкої та економічної безтраншейної реконструкції зношених трубопроводів газових і теплових мереж.

1. На базі досліджень динаміки протягування поршнем нового поліетиленового трубопроводу чи рукава зношеним сталевим трубопроводом встановлено, що ідеї реконструкції трубопроводів газових і теплових мереж поршнем можливо реалізувати, оскільки, для виконання таких робіт потрібний незначний тиск на виході компресора. Так, для реконструкції ділянки зношеного сталевих трубопроводу внутрішнім діаметром 49 мм довжиною 50 м протягуванням поршнем нового поліетиленового трубопроводу зовнішнім діаметром 40 мм потрібен тиск до 0,2 МПа, а для протягування поршнем на таку ж довжину рукава – 0,12 МПа.

Визначено, що сила тертя між одним метром поліетиленової труби чи рукава і зношеною сталевих трубопроводом є мізерною і знаходиться в межах від 1 Н до 2 Н тому протягуванням поршнем поліетиленової труби чи рукава можна реконструювати протяжні ділянки трубопроводів газових і теплових мереж.

2. CFD моделювання газодинамічних процесів у міжтрубному просторі між протягваним поршнем новим поліетиленовим трубопроводом чи рукавом і зношеним сталевим трубопроводом, які мають різну шорсткість стінки, виявлено місця сповільнення та пришвидшення потоку повітря, падіння та зростання тиску. Визначено залежність втрат тиску в міжтрубному просторі від довжини протягнутої поршнем ділянки поліетиленового трубопроводу чи рукава. Аналіз результатів досліджень показав, що якщо поршнем протягнуто п'ятдесят метрів поліетиленового трубопроводу зовнішнім діаметром 40 мм падіння тиску в міжтрубному просторі складає 33560 Па, а якщо протягнуто 50 м рукава –

6231 Па.

3. Експериментально встановлено, що поршнем можна протягнути новий поліетиленовий трубопровід зношеним сталевим. Виявлено, що швидкість протягування на початку робіт різко зростає. Після такого різкого зростання на початку протягування відбувається незначне її збільшення. При об'ємній витраті повітря 0,005 м<sup>3</sup>/с середня швидкість протягування поршнем поліетиленової труби зовнішнім діаметром 40 мм складає 1,7 м/с. Таку швидкість протягування неможливо досягнути жодним з існуючих методів безтраншейної реконструкції трубопровідних комунікацій.

4. Розроблено нові технології безтраншейної реконструкції трубопроводів газових і теплових мереж протягуванням поршнем у зношений сталевий трубопровід нового поліетиленового трубопроводу – “Тяговий поршень<sup>®</sup>”, нового рукава – “Тяговий поршень<sup>®</sup>”. Технічним результатом застосування таких технологій є зменшення обсягу підготовчих робіт, спрощення процесу протягування нового поліетиленового трубопроводу, збільшення швидкості протягування, забезпечення можливості застосування в ускладнених умовах, зменшення витрати на реконструкцію та часу робочого процесу. Перед виконанням реконструкції не треба розробляти приймальний котлован, що не завжди можливо до і під час виконання робіт.

Результати виконаних досліджень, розроблена техніка та технологія безтраншейної реконструкції трубопроводів газових і теплових мереж – “Тяговий поршень<sup>®</sup>” та “Тяговий поршень<sup>®</sup>” промислово апробовані та впроваджені у СП “Київські теплові мережі” КП “Київтеплоенерго” РТМ “Печерськ”.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ДБН В.2.5-41:2009. Частина І. Проектування. Частина ІІ. Будівництво. Газопроводи з поліетиленових труб. Інженерне обладнання будинків і споруд. Зовнішні мережі та споруди. [Чинний від 2010-08-01]. Вид. офіц. Київ, 2010. 149 с.
2. Analysis of factors influencing the selection of water main rehabilitation methods. / S. Yazdekhashti, K. Piratla, A. Khan, S. Atamturktur // *North American Society for Trenchless Technology* : proceedings of the NASTT's 2014 No-Dig Show, с. Orlando, 13–17 april 2014 у. Orlando, Florida: NASTT. 2014. 10 p.
3. Identification of practices, design, construction, and repair using trenchless technology / M. Suleiman, L. Stevens, C. Jahren, H. Ceylan, W. Conway // [Electronic resource]: InTrans project reports. Iowa : Iowa State University, 2010. 272 p. URL : [https://lib.dr.iastate.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1059&context=intrans\\_reports](https://lib.dr.iastate.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1059&context=intrans_reports) (дата звернення 24.06.2019).
4. Kramera S., Liub J., Provencio G. Advantages and disadvantages of trenchless construction approach as compared to the traditional open cut installation of underground utility systems : proceedings of the Creative Construction Conference, с. Ljubljana, 30 june – 3 july 2018 у. Ljubljana, 2018. P. 129–138.
5. Ксенич А. І., Середюк М. Д., Височанський І. І. Розробка рекомендацій щодо реконструкції сталевих газових мереж шляхом протягування в них поліетиленових труб. *Науковий вісник ІФНТУНГ*. 2012. № 1(31). С. 114–123.
6. Mallakis G. Large diameter pipe bursting. *Water Research Foundation* : proceedings of the large pressure pipe structural rehabilitation conference, с. Los Angeles, 20 january 2016 у. Los Angeles, 2016. 30 p.
7. Marti T., Botteicher R. Thermally fused PVC pipe helps accelerate adoption of trenchless pipe installation techniques in North America. *Plastic pipes* : proceedings of the 17<sup>th</sup> plastic pipes conference, с. Chicago, 22 – 24 september 2014 у. Chicago, 2014. 11 p.
8. Swagelining as a method of trenchless pipelines rehabilitation / G. Wróbel, A.

Pusz, M. Szymiczek, K. Michalik // *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*. 2009. Vol. 33, № 1. P. 27–34.

9. Matthews J., Sinha S., Sterling R. State of technology for rehabilitation of water distribution systems [Electronic resource] : Technical Report. Washington : U.S. Environmental Protection Agency, 2014. 214 p. URL : [https://files.nc.gov/ncdeq/Water%20Quality/Operator\\_Certification\\_Files/WW\\_Files/WW\\_Downloads/EPA%20State%20of%20Technology%20for%20Rehab%20of%20WW%20Collection%20Systems.pdf](https://files.nc.gov/ncdeq/Water%20Quality/Operator_Certification_Files/WW_Files/WW_Downloads/EPA%20State%20of%20Technology%20for%20Rehab%20of%20WW%20Collection%20Systems.pdf) (дата звернення 24.06.2019).

10. Polat S. Trenchless rehabilitation of pressurized pipes using the Primus Line® system : The prime solution of pipes. Cham (Germany) : *Rädlinger primusline GmbH*, 2013. 42 p.

11. Johnson B., Grissom C. Best practices to manage odors during cured-in-place pipe lining. *Water Professionals* : proceedings of the Kentucky–Tennessee Water Professionals Conference, с. Nashville, 8 July – 10 July 2018 y. Nashville, 2018 P. 29–34.

12. Wellstream flexsteel™ flexible steel pipe : Technical, operating, and maintenance manual. Wellstream International Limited, 2016. 69 p.

13. Spoolable composite pipelines / B. Weller. Houston: Shawcor, 2018. 33 p.

14. Сучасні технології безтраншейного ремонту теплогазових мереж / К. А. Поляруш, Я. В. Дорошенко, С. І. Тихонов, А. Р. Бабій // *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2016. № 1(58). С. 41–51. (Особистий внесок – встановив основні причини аварій теплогазових мереж. Виконав аналіз існуючих у світі методів безтраншейної реконструкції трубопроводів газових і теплових мереж. Виділив можливості, особливості, діапазон технічних параметрів, переваги та недоліки кожного з них, приймав участь у підготовці статті).

15. Тихонов С. І., Дорошенко Я. В., Поляруш К. А. Технології внутрішньотрубного обстеження та ремонту важкодоступних ділянок газонафтопроводів. *Науковий вісник*. 2015. № 1(38). С. 83–94. (Особистий внесок – класифікував та виконав аналіз існуючих методів внутрішньотрубного ремонту важкодоступних ділянок газонафтопроводів, приймав участь у підготовці статті).

16. The study of the stress-strain state of trunk gas pipeline sections with defects in the shape of the cross-section of the pipe / Ya. V. Doroshenko, L. D. Pylypiv, K. A. Poliarush, Yu. I. Doroshenko // *Journal of Hydrocarbon Power Engineering*. 2017. Vol. 4, Issue 2. P. 68–80. (Особистий внесок – виконав дослідження дефектів форми поперечного перерізу труби, їх 3D моделювання, CFD моделювання руху газу ділянками газопроводу в місці таких дефектів. Приймав участь у підготовці статті).

17. Development of trenchless technology of reconstruction of “Pulling pig P” pipeline communications / Ya. Doroshenko, V. Zapukhliak, K. Poliarush [and oth.] // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. Vol. 2, No. 1 (98). P. 28–38. ISSN(e) 1729–4061 (Особистий внесок – приймав участь у розробленні технології безтраншейної реконструкції трубопровідних комунікацій “Pulling pig P”, проведенні експериментальних досліджень. Виконав аналітичні дослідження та CFD моделювання процесу протягування поршнем нового поліетиленового трубопроводу зношеним сталевим. Приймав участь у підготовці статті).

18. Дорошенко Я. В., Поляруш К. А., Запукхляк В. Б. Розроблення технології безтраншейної реконструкції трубопровідних комунікацій очисним поршнем. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2018. № 3(68). С. 12–19. (Особистий внесок – обґрунтував доцільність реконструкції трубопровідних комунікацій українських міст безтраншейними технологіями. Приймав участь у розробленні технології безтраншейної реконструкції трубопровідних комунікацій очисним поршнем. Виконав дослідження динаміки протягування поршнем нового поліетиленового трубопроводу зношеним сталевим. Приймав участь у підготовці статті).

19. Дорошенко Я. В. Поляруш К. А. Розроблення технології безтраншейної реконструкції трубопровідних комунікацій “Тяговий поршень<sup>®</sup>”. *Science progress in European countries: new concepts and modern solutions* : proceedings of the 6<sup>th</sup> International Scientific Conference, с. Stuttgart, 19 april 2019 у. Stuttgart, 2019. P. 139–151. ISBN 978-3-944375-22-9.



20. Поляруш К. А. Дослідження динаміки безтраншейної реконструкції трубопровідних комунікацій технологією “Тяговий поршень”. *Тридцята наукова сесія наукового товариства ім. Шевченка* : матеріали сесії, м. Івано-Франківськ, 28 лютого – 21 березня 2019 р. Івано-Франківськ, С. 22.

21. Розробка способу очистки шлейфів свердловин / П. В. Горін, К. А. Поляруш, Д. Ф. Тимків [та ін.] // *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*. 2018. № 6(247). С. 213–222. (Особистий внесок – приймав участь у моделюванні руху пружно-полімерного поршня модельним трубопроводом, дослідженні ефективності очищення внутрішньої порожнини газопроводу таким поршнем. Приймав участь у підготовці статті).

22. Поляруш К. А. Дослідження газодинамічних процесів у трубопровідних комунікаціях під час їх безтраншейної реконструкції технологією “Тяговий поршень<sup>Ⓣ</sup>”. *Нафтогазова енергетика*. 2019. № 1(31). С. 43–53.

23. Дорошенко Я. В., Поляруш К. А., Запужляк В. Б. Експериментальні дослідження динаміки безтраншейної реконструкції трубопровідних комунікацій технологією “Тяговий поршень<sup>Ⓣ</sup>”. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2019. № 1(70). С. 25–32. (Особистий внесок – Приймав участь у розробленні, виготовленні експериментальної установки, проведенні експериментальних досліджень. Виконав планування експериментальних досліджень, обробив та виконав аналіз одержаних результатів. Приймав участь у підготовці статті).

24. Пристрій для безтраншейної реконструкції трубопровідних комунікацій: пат. 129088 Україна: МПК F16L1/028. № у 201802905 ; заявл. 22.03.2018 ; опубл. 25.10.2018, Бюл. № 20. 3 с. (Особистий внесок – приймав участь в патентному пошуку, оформленні патенту, розробив ущільнювальну систему пристрою).

25. Пристрій для санації трубопроводів рукавом : пат. 134600 Україна : МПК F16L1/028. № у 201812689 ; заявл. 20.12.2018 ; опубл. 27.05.2019, Бюл. № 10. 3 с. (Особистий внесок – приймав участь в патентному пошуку, оформленні

патенту, запропонував ідею намотувати рукав на барабан і розміщувати в герметичній камері пристрою).

26. Дорошенко Я. В., Поляруш К. А. Метод безтраншейного релейнінгу теплогазових мереж. *Нафтогазова енергетика-2017* : тези доповідей 6-тої Міжнародної науково-технічної конференції, м. Івано-Франківськ, 15–19 травня 2017 р. Івано-Франківськ, 2017. С. 196–197.

27. Поляруш К. А. Розроблення технологій безтраншейної реконструкції теплогазових мереж. *Нафтогазова енергетика* : матеріали Міжнародної науково-технічної конференції, м. Івано-Франківськ, 27-31 травня 2019 р. Івано-Франківськ, 2019. С. 13.

28. Дорошенко Я. В., Поляруш К. А. Розроблення технології безтраншейного релейнінгу теплогазових мереж поршнем. *Двадцять дев'ять наукова сесія наукового товариства ім. Шевченка* : матеріали сесії, м. Львів, 15 січня – 31 березня 2018 р. Львів, 2018. С. 66.

29. Поляруш К. А. Новітні технології безтраншейної реконструкції трубопровідних комунікацій. *Проблеми та перспективи розвитку сучасної науки* : збірник тез Міжнародної науково-практичної конференції молодих науковців, аспірантів і здобувачів вищої освіти, м. Рівне, 10 травня 2019 р. Рівне, 2019. С. 60–62.

30. Сідак В. С., Слатова О. М. Спецкурс з газопостачання : курс лекцій. Харк. нац. акад. міськ. госп-ва. Харків : ХНАМГ, 2010. 224 с.

31. Середюк М. Д., Пилипів Л. Д., Зарубіна Ю. І. Технологічні розрахунки газових мереж населених пунктів: навч. посібник. Івано-Франківськ : Факел, 2004. 183 с.

32. Статистичний бюлетень про основні показники роботи газового господарства в Україні за 2014 р. [Електронний ресурс] Київ : Державна служба статистики України, 2015. 22 с. URL : [https://ukrstat.org/uk/druk/publicat/Arhiv\\_u/05/Arch\\_gaz\\_bl.htm](https://ukrstat.org/uk/druk/publicat/Arhiv_u/05/Arch_gaz_bl.htm) (дата звернення 21.06.2019).

33. Гарматюк О. О. Основні чинники виникнення кризових ситуацій на підприємствах газопостачання та газифікації України. *Галицький економічний вісник*. 2012. № 3(36). С. 23–29.

34. Приймак О. В., Гламаздин П. М., Струк О. В. Метод оптимизационной поддержки новых технических решений в геоинформационной системе "Киевгаз". *Енергоефективність в будівництві та архітектурі*. 2013. Вип. 4. С. 215–220.

35. Сідак В. С. Інноваційні технології в діагностиці та експлуатації систем газопостачання. Харків : ХНАМГ, 2005. 226 с.

36. У 2019 році "Харківміськгаз" інвестував понад мільйон гривень в газові мережі [Електронний ресурс] // РБК Україна: веб-сайт. URL : <https://www.rbc.ua/ukr/news/poroshenko-vyzvali-dopros-gpu-1557145995.html> (дата звернення 23.06.2019).

37. Мордовенко Н. И. Внедрение передовых достижений ПАО «Харьковгоргаз» в области технического обследования газопроводов. *Энергосберегающие технологии теплогазоснабжения, строительства и муниципальной инфраструктуры* : материалы Междунар. науч.-практ. интернет-конф., г. Харьков, 23 октября – 22 ноября 2013 г. Харьков, 2013. С. 45–52.

38. Деркач І. Л. Міські інженерні мережі: навч. посібник. Харків : ХНАМГ, 2006. 97 с.

39. Покровский Л. Л., Зембицкий П. Ю. Стратегия развития коммунальной теплоэнергетики Украины на период до 2030 года. *Новости теплоснабжения*. 2010. № 9. С. 50–54.

40. Никитин Е. Е. Повышение энергетической эффективности систем централизованного теплоснабжения: дис. ... докт. техн. наук: 28.12.15/КП. Київ, 2015. 393 с.

41. Покровский Л. Л., Семчук Г. М., Зембицкий П. Ю. Стратегия коммунальной электроэнергетики Украины на период до 2030 года. *Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання*. 2010. Вип. 14. С. 5–24.

42. Дерій В. А. Можливості впровадження електричних теплогенераторів в системах централізованого тепlopостачання України. *Проблеми загальної енергетики*. 2017. № 3(50). С. 50–59.
43. Звіт про управління по КП "Харківські теплові мережі" за 2018 рік [Електронний ресурс]. URL : [http://www.hts.kharkov.ua/docs/zvit\\_upravlinna\\_2018.pdf](http://www.hts.kharkov.ua/docs/zvit_upravlinna_2018.pdf).
44. Ионин А. А. Газоснабжение: учебник для вузов : 4-е изд., перераб. и доп. Москва : Стройиздат, 1989. 439 с.
45. Метод ідентифікації видів дефектів трубопроводів підземних теплових мереж / І. Р. Ващишак, С. П. Ващишак, Л. А. Витвицька, П. М. Райтер // *Науковий вісник ІФНТУНГ*. 2013. № 1 (34). С. 162–171.
46. Грудз В. Я., Нечаев О. І. Протикорозійний захист трубопроводів і резервуарів: конспект лекцій. Івано-Франківськ : Факел, 1999. 96 с.
47. Тимошенко В. А., Грушецький М. В. Корозія та захист металів і конструкцій: конспект лекцій. Івано-Франківськ : Факел, 2006. 160 с.
48. Семчук Я. М., Балан О. С. Причини відмов систем газопостачання. *Екологічна безпека та збалансоване ресурсокористування*. 2017. № 1. С. 56–62.
49. Надежность городских систем газоснабжения / А. А. Ионин и др. Москва : Стройиздат, 1980. 231 с.
50. Баясанов Д. Б., Ионин А. А. Распределительные системы газоснабжения. Москва : Стройиздат, 1977. 407 с.
51. Фастов Л. М., Медведева О. Н., Соловьева Е. Б. Надежность систем газоснабжения: монография. Саратов : Саратов. гос. техн. ун-т, 2012. 148 с.
52. Ионин А. А. Газоснабжение. Москва : Лань, 2012. 428 с.
53. Теплоснабжение: учебник для вузов / А. А. Ионин и др. Москва : Стройиздат, 1982. 336 с.
54. Фастов Л. М. Пути повышения надежности и безопасности эксплуатации систем газоснабжения. Москва : ЦБНТИ, 1984. 39 с.

55. Ганзиков А. С. Оптимизация выбора метода восстановления изношенных распределительных газопроводов: дис. ... канд. техн. наук: 19.06.14/РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина. Москва, 2014. 176 с.

56. Абулгафаров С. В., Гринь В. Г., Свистунов Ю. А. Бестраншейные технологии ремонта трубопроводов: монография. Краснодар : Куб. Гау, 2009. 192 с.

57. Jung J. Y., Sinha K. S. Evaluation of trenchless technology methods for municipal infrastructure system. *ASCE, Journal of Infrastructure Systems*. 2007. Vol. 13, Issue 2. P. 144–156.

58. Torre C. Rehabilitation of underground pipelines in Italy's old town centres. Genova, Italia: Iren acqua gas, 1995. 32 p.

59. Rosa J. PE lining. *Method and techniques, applications and design* : proceedings of the UKSTT PE Lining Masterclass, с. South Normanton (Great Britain), 19 april 2018 y. South Normanton, 2018. P. 129–138.

60. Рыбаков А. П. Основы бестраншейных технологий (теория и практика): технический учебник-справочник. Москва : ПрессБюро №1, 2005. 304 с.

61. Височанський І. І. Удосконалення методів обслуговування та ремонту газових мереж з урахуванням енергетичних характеристик природного газу: дис. ... канд. техн. наук: 05.15.13 / Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу. Івано-Франківськ, 2019. 205 с.

62. Raymond J., Sterling L. Guidelines for pipe bursting [Electronic resource]: technical report #2001.02 : Vicksburg (USA) : Trenchless Technology Cente, 2001. 47 p. URL : <http://www.trenchlessdataservice.com/library/bursting.pdf>.

63. Исследование факторов, влияющих на эффективность восстановления сетей водоснабжения технологией «Берстлайнинг» / Д. Ф. Гончаренко, А. И. Алейникова, В. Н. Волков, С. А. Забелин // *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2016. № 6/1(84). С. 67–73.

64. Орлов В. А., Богомолова И. О., Гуреева И. С. Бестраншейная реновация ветхих трубопроводов путем протаскивания новых полимерных труб на место предварительно разрушенных старых. *Вестник МГСУ*. 2014. № 7. С. 101–109.

65. Rameil M. Handbook of pipe bursting practice. Essen : Vulkan verlag GmbH, 2007. 351 p.

66. Anderson T. D., Kulkarni M. G. Reinforced liners for long-distance pipeline rehabilitation. *International Offshore and Polar Engineering* : proceedings of the Twenty-second International Offshore and Polar Engineering Conference, Rhodes (Greece) 17–22 June y. Rhodes, 2012, P. 395–400.

67. Кускильдин Р. А., Закирова З. А., Юсупова Э. К. Реконструкция изношенных распределительных газопроводов путем применения бестраншейных технологий как способ повышения безопасности газораспределительных систем. *Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов*. 2018. № 1. С. 116–124.

68. Zwierzchowska A. Technologie bezwykopowej budowy sieci gazowych, wodociagowych i kanalizacyjnych. Kielce : Politechnika swietokrzyska, 2006. 180 p.

69. Catha S. An innovative new technology for trenchless rehabilitation of high pressure gas (liquid) transmission pipelines. *Pipeline technology* : proceedings of the 3rd Pipeline technology conference, c. Hannover, 21 – 23 april 2008 y. Hannover, 2008. P. 34–46.

70. Орлов В. А. Хренов К. Е., Богомолова И. О. Восстановление ветхих трубопроводов предварительно сжатыми полимерными трубами. *Вестник МГСУ*. 2014. № 2. С. 105–113.

71. Орлов В. А., Кашкина Е. А. Технология Swagelining. Опыт восстановления напорного чугунного трубопровода с использованием бестраншейного метода. *Технологии Мира*. 2011. № 9. С. 13–14.

72. Koerner R. G., Koerner M. R. Geosynthetic use in trenchless pipe remediation and rehabilitation. *Geotextiles and Geomembranes*. 1996. Vol. 14, Issue 3. P. 223–237.

73. Development of renovation techniques for medium and large diameter water transmission pipes / С. Baea, J. Kima, D. Choi [and oth.] // *Procedia Engineering*. 2014. Vol. 89. P. 817–822.

74. Фаттахов М. М. Совершенствование бестраншейной технологии восстановления (реконструкции) трубопроводных систем. *Нефтегазовое дело*. 2016. № 1. С. 32–49.

75. Математичне моделювання процесу руху інтелектуального поршня по газопроводу / В. Я Грудз., В. В. Бакаєв, Я. В. Грудз, Г. Розен // *Нафтова і газова промисловість*. 2000. №1. С.46–47.

76. Регулювання руху інтелектуального поршня зміною технологічної схеми лінійної ділянки / В. Я Грудз., В. В. Бакаєв, Я. В. Грудз, Г. Розен // *Нафтова і газова промисловість*. 2001. №1. С.44–45.

77. Грудз Я. В. Розробка методів регулювання режиму роботи газопроводів в процесі їх діагностування інтелектуальними поршнями: дис. ... канд. техн. наук: 05.15.13/ІФНТУНГ. Івано-Франківськ, 2001. 126 с.

78. Керування режимом роботи газопроводу в період проведення профілактичних очищень / В. Я. Грудз, В. Б. Михалків, В. В. Розгонюк, В. П. Рудко // *Нафтова і газова промисловість*. 1998. № 6. С. 37–38.

79. Аналітичні дослідження впливу профілю траси газопроводу на динаміку руху інтелектуальних поршнів / В. Я. Грудз, В. Б. Михалків, В. В. Розгонюк, В. П. Рудко // *Нафтова і газова промисловість*. 1999. № 1. С. 44–46.

80. Hydraulic transients induced by pigging operation in pipeline with a long slope / T. Deng, J. Gong, H. Wu [and oth.] // *Journal of Applied Mathematics*. 2013. Vol. 2013. P. 60–69.

81. Numerical study of being forced leather cap type pig in straight gas pipeline / C. Liqiong, Y. Li, X. Chen [and oth.] // *Open Civil Engineering Journal*. 2016. № 10. P. 141–148.

82. Minami K., Shoham O. Pigging dynamics in two-phase flow pipeline: Experiment and Modeling. *J. SPE Production and Facilities*. 1995. Vol. 10, Issue 4. P. 225–231.

83. Nieckele A., Braga A., Azevedo L. Transient pig motion through gas and liquid pipewines. *Journal of energy resources technology*. 2010. Volume 123. P. 260–269.

84. Saeidbakhsh M., Rafeeyan M., Ziaei-Rad S. Dynamic analysis of small pigs in space pipelines. *Oil & Gas Science and Technology*. 2009. Vol. 64, Issue 2. P. 155–164.
85. Short G. The pigging technology project: the first three years. *Pipe and pipelines int.* 1994. Vol. 39, Issue 4. P. 23–27.
86. Solghar A., Davoudian M. Analysis of transient PIG motion in natural gas pipeline. *Mech. Indust.* 2013. Vol. 13, Issue 5. P. 293–300.
87. Tolmasquim S., Nieckele A. Design and control of pig operations through pipelines. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2008. Vol. 62, № 3. P. 102–110.
88. Squires K., Eaton J. Particle response and turbulence modification in isotropic turbulence. *Phys. Fluid.* Vol. 2, № 7. 1990. P. 1191–1203.
89. Харитонов В. П. Фундаментальные уравнения механики жидкости и газа. Москва : МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. 65 с.
90. Launder B. E. Lectures in mathematical models of turbulence. London : Academic Press, 1972. 169 p.
91. Design and analysis of magnetic flux leakage capsule / I. Maliki, Z. Zulkarnay, M. Ali Aiman [and oth.] // *Sensors and Transducers*. 2013. Vol. 156, Issue 9. P. 75–80.
92. Modeling and simulation for pig flow control in natural gas pipeline / T. T. Nguyen, S. B. Kim, H. R. Yoo, Y. W. Rho // *KSME Int. J.* 2001. Vol. 15. P. 1165–1173.
93. Nieckele A. O., Azevedo L. F., Braga A. M. Simulation of fluid flow and pig dynamics in dewatering operations in pipeline. In: *Encontro Nacional De Ciências Térmicas – ENCIT, Rio de Janeiro*. 1998. Vol. 2. P. 1025–1030.
94. Esmaeilzadeh F., Mowla D., Asemani M. Mathematical modeling and simulation of pigging operation in gas and liquid pipelines. *J. Petroleum Science and Engineering*. 2009. Vol. 69. P. 100–106.
95. A new  $k-\varepsilon$  eddy-viscosity model for high Reynolds number turbulent flows – Model development and validation / T.-H. Shih, W. W. Liou, A. Shabbir [and oth.] // *Computers and fluids*. 1995. Vol. 24, Issue 3. P. 227–238.



96. Launder B. E., Sharma B. I. Application of the energy dissipation model of turbulence to the calculation of flow near a spinning disc. *Letters in Heat and Mass Transfer*. 1974. № 1(2). P. 131–138.

97. Spalart P. R. Strategies for turbulence modeling and simulations. *Int. J. Heat Fluid Flow*. 2000. Vol. 21. P. 252–263.

98. PE lining: Method & techniques, applications and design. *UKSTT PE Lining* : materials of masterclass, c. South Normanton, 19th april 2018 y. South Normanton, 2018. 77 p.

99. Breder B. Trenchless renovation of water pipelines using the Primus Line® system. Cham (Germany) : *No Dig Medellín*, 2017. 7 p.

100. Маркова Е. В., Лисенков А. Н. Планирование эксперимента в условиях неоднородности. Москва : Наука, 1973. 221 с.

101. Алексеев В. П., Зайцев О. Ю. Теория планирования эксперимента в задачах влагометрии природного газа. *Газовая промышленность*. 2003. № 4. С. 33–34.

102. Алексеев В. П., Озеркин Д. В. Основы научных исследований. Томск : ТУСУР, 2001. 171 с.

103. Бойко Н. Г. Теория и методы инженерного эксперимента: курс лекций. Донецк : ДонНТУ, 2009. 158 с.

104. Дорошенко В. М. Основи наукових досліджень: навчальний посібник. Київ: ІСДО, 1993. 128 с.

**ДОДАТОК А**  
**СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**

1. Development of trenchless technology of reconstruction of “Pulling pig P” pipeline communications / Ya. Doroshenko, V. Zapukhliak, K. Poliarush [and oth.] // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. Vol. 2, No. 1 (98). P. 28–38. ISSN(e) 1729–4061 (**індексується в Scopus, Index Copernicus International**). (Особистий внесок – приймав участь у розробленні технології безтраншейної реконструкції трубопровідних комунікацій “Pulling pig P”, проведенні експериментальних досліджень. Виконав аналітичні дослідження та CFD моделювання процесу протягування поршнем нового поліетиленового трубопроводу зношеним сталевим. Приймав участь у підготовці статті).

2. Розробка способу очистки шлейфів свердловин / П. В. Горін, К. А. Поляруш, Д. Ф. Тимків [та ін.] // *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*. 2018. № 6 (247). С. 213–222. (**індексується в Index Copernicus International**). (Особистий внесок – приймав участь у моделюванні руху пружно-полімерного поршня модельним трубопроводом, дослідженні ефективності очищення внутрішньої порожнини газопроводу таким поршнем. Приймав участь у підготовці статті).

3. Поляруш К. А. Дослідження газодинамічних процесів у трубопровідних комунікаціях під час їх безтраншейної реконструкції технологією “Тяговий поршень<sup>®</sup>”. *Нафтогазова енергетика*. 2019. № 1(31). С. 43–53. (**наукове фахове видання України**).

## Продовж. дод. А

4. Сучасні технології безтраншейного ремонту теплогазових мереж / К. А. Поляруш, Я. В. Дорошенко, С. І. Тихонов, А. Р. Бабій // *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2016. № 1(58). С. 41–51. **(наукове фахове видання України)**. (Особистий внесок – встановив основні причини аварій теплогазових мереж. Виконав аналіз існуючих у світі методів безтраншейної реконструкції трубопроводів газових і теплових мереж. Виділив можливості, особливості, діапазон технічних параметрів, переваги та недоліки кожного з них, приймав участь у підготовці статті).

5. Дорошенко Я. В., Поляруш К. А., Запухляк В. Б. Розроблення технології безтраншейної реконструкції трубопровідних комунікацій очисним поршнем. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2018. № 3(68). С. 12–19. **(наукове фахове видання України)**. (Особистий внесок – обґрунтував доцільність реконструкції трубопровідних комунікацій українських міст безтраншейними технологіями. Приймав участь у розробленні технології безтраншейної реконструкції трубопровідних комунікацій очисним поршнем. Виконав дослідження динаміки протягування поршнем нового поліетиленового трубопроводу зношеним сталевим. Приймав участь у підготовці статті).

6. Дорошенко Я. В., Поляруш К. А., Запухляк В. Б. Експериментальні дослідження динаміки безтраншейної реконструкції трубопровідних комунікацій технологією “Тяговий поршень<sup>Ⓢ</sup>”. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2019. № 1(70). С. 25–32. **(наукове фахове видання України)**. (Особистий внесок – Приймав участь у розробленні, виготовленні експериментальної установки, проведенні експериментальних досліджень. Виконав планування експериментальних досліджень, обробив та виконав аналіз одержаних результатів. Приймав участь у підготовці статті).

## Продовж. дод. А

7. The study of the stress-strain state of trunk gas pipeline sections with defects in the shape of the cross-section of the pipe / Ya. V. Doroshenko, L. D. Pylypiv, K. A. Poliarush, Yu. I. Doroshenko // *Journal of Hydrocarbon Power Engineering*. 2017. Vol. 4, Issue 2. P. 68–80. (**наукове фахове видання України**). (Особистий внесок – виконав дослідження дефектів форми поперечного перерізу труби, їх 3D моделювання, CFD моделювання руху газу ділянками газопроводу в місці таких дефектів. Приймав участь у підготовці статті).

8. Тихонов С. І., Дорошенко Я. В., Поляруш К. А. Технології внутрішньотрубного обстеження та ремонту важкодоступних ділянок газонафтопроводів. *Науковий вісник*. 2015. № 1(38). С. 83–94. (**наукове фахове видання України**). (Особистий внесок – класифікував та виконав аналіз існуючих методів внутрішньотрубного ремонту важкодоступних ділянок газонафтопроводів, приймав участь у підготовці статті).

9. Пристрій для безтраншейної реконструкції трубопровідних комунікацій: пат. 129088 Україна: МПК F16L1/028. № u 201802905 ; заявл. 22.03.2018 ; опубл. 25.10.2018, Бюл. № 20. 3 с. (**патент на корисну модель**). (Особистий внесок – приймав участь в патентному пошуку, оформленні патенту, розробив ущільнювальну систему пристрою).

10. Пристрій для санації трубопроводів рукавом : пат. 134600 Україна : МПК F16L1/028. № u 201812689 ; заявл. 20.12.2018 ; опубл. 27.05.2019, Бюл. № 10. 3 с. (**патент на корисну модель**). (Особистий внесок – приймав участь в патентному пошуку, оформленні патенту, запропонував ідею намотувати рукав на барабан і розміщувати в герметичній камері пристрою).

Продовж. дод. А

### Апробація результатів дисертації

Основні положення дисертаційної роботи викладено та обговорено на науково-практичних конференціях різного рівня:

1. Дорошенко Я. В. Поляруш К. А. Розроблення технології безтраншейної реконструкції трубопровідних комунікацій “Тяговий поршень<sup>®</sup>”. *Science progress in European countries: new concepts and modern solutions* : proceedings of the 6<sup>th</sup> International Scientific Conference, с. Stuttgart, 19 april 2019 у. Stuttgart, 2019. Р. 139–151. ISBN 978-3-944375-22-9. (Форма участі – публікація тез).

2. Поляруш К. А. Дослідження динаміки безтраншейної реконструкції трубопровідних комунікацій технологією “Тяговий поршень”. *Тридцята наукова сесія наукового товариства ім. Шевченка* : матеріали сесії, м. Івано-Франківськ, 28 лютого – 21 березня 2019 р. Івано-Франківськ, 2019. С. 22. (Форма участі – усна доповідь).

3. Дорошенко Я. В., Поляруш К. А. Метод безтраншейного релайнінгу теплогазових мереж. *Нафтогазова енергетика-2017* : тези доповідей 6-тої Міжнародної науково-технічної конференції, м. Івано-Франківськ, 15–19 травня 2017 р. Івано-Франківськ, 2017. С. 196–197. (Форма участі – публікація тез, усна доповідь).

4. Поляруш К. А. Розроблення технологій безтраншейної реконструкції теплогазових мереж. *Нафтогазова енергетика* : матеріали Міжнародної науково-технічної конференції, м. Івано-Франківськ, 27–31 травня 2019 р. Івано-Франківськ, 2019. С. 13. (Форма участі – усна доповідь).

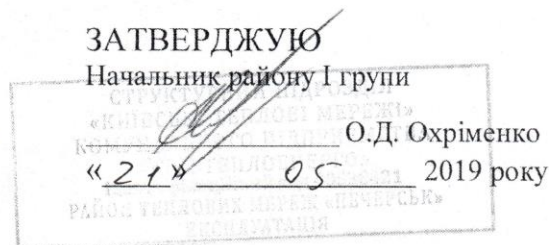
5. Поляруш К. А. Новітні технології безтраншейної реконструкції трубопровідних комунікацій. *Проблеми та перспективи розвитку сучасної науки* : збірник тез Міжнародної науково-практичної конференції молодих науковців, аспірантів і здобувачів вищої освіти, м. Рівне, 10 травня 2019 р. Рівне, 2019. С. 60–62. (Форма участі – публікація тез, усна доповідь).

Продовж. дод. А

6. Дорошенко Я. В., Поляруш К. А. Розроблення технології безтраншейного релейнінгу теплогазових мереж поршнем. *Двадцять дев'ята наукова сесія наукового товариства ім. Шевченка*, м. Львів, 15 січня – 31 березня 2018 р. Львів, 2018. С. 66. (Форма участі – усна доповідь).

## ДОДАТОК Б

### АКТ ТА ДОВІДКА ПРО ВПРОВАДЖЕННЯ



### АКТ

Комісія у складі:

голови – головний інженер I групи Світельський Костянтин Володимирович  
 членів комісії: – майстер виробничої дільниці I групи Мельниченко Сергій Сергійович;  
 – бухгалтер Колісник Світлана Григорівна;

цим Актом засвідчує, що результати дисертаційного дослідження Поляруша Костянтина Анатолійовича, на тему: “Розроблення техніки та технології безтраншейного ремонту теплогазових мереж” на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.15.13 – Трубопровідний транспорт, нафтогазосховища впроваджені в діяльності СП «Київські теплові мережі» КП «КІЇВТЕПЛОЕНЕРГО» РТМ «Печерськ».

Зокрема, з метою реконструкції зношених трубопроводів теплогазових мереж використано аналітичні матеріали щодо протягування поршнем нового поліетиленового трубопроводу (технологія “Тяговий поршень<sup>®</sup>”), рукава (технологія “Тяговий поршень<sup>®</sup>”) в зношений сталевий трубопровід. Технічним результатом застосування таких технологій є зменшення

часу робочого процесу, зменшення обсягу підготовчих робіт, спрощення процесу протягування нового трубопроводу, забезпечення можливості застосування в ускладнених умовах.

Голова комісії

*Світельський К.В.*  
 (посада)

*Світельський К.В.*  
 (підпис) (ініціали, прізвище)

Члени комісії

*Мельниченко С.С.*  
 (посада)

*Мельниченко С.С.*  
 (підпис) (ініціали, прізвище)

*Колісник С.Г.*  
 (посада)

*Колісник С.Г.*  
 (підпис) (ініціали, прізвище)

Продовж. дод. Б

**КОМУНАЛЬНЕ ПІДПРИЄМСТВО ВИКОНАВЧОГО ОРГАНУ КИЇВРАДИ  
(КИЇВСЬКОЇ МІСЬКОЇ ДЕРЖАВНОЇ АДМІНІСТРАЦІЇ)  
«КИЇВТЕПЛОЕНЕРГО»  
СТРУКТУРНИЙ ПІДРОЗДІЛ «КИЇВСЬКІ ТЕПЛОВІ МЕРЕЖІ»  
РТМ «ПЕЧЕРСЬК»**

вул. Товарна, 1 м. Київ, Україна, 01033, тел. 287-80-28, факс 529-44-21

15.05.2019 № 14/406

### ДОВІДКА ПРО ВПРОВАДЖЕННЯ

Результати дисертаційного дослідження Поляруша Костянтина Анатолійовича на тему: “Розроблення техніки та технології безтраншейного ремонту теплогазових мереж” на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.15.13 – Трубопровідний транспорт, нафтогазосховища впроваджені в діяльності СП «Київські теплові мережі» КП «КИЇВТЕПЛОЕНЕРГО» РТМ «Печерськ».

Зокрема, з метою реконструкції зношених трубопроводів теплогазових мереж використано аналітичні матеріали щодо протягування поршнем нового поліетиленового трубопроводу (технологія “Тяговий поршень<sup>®</sup>”), рукава (технологія “Тяговий поршень<sup>®</sup>”) в зношений сталевий трубопровід. Технічним результатом застосування таких технологій є зменшення часу робочого процесу, зменшення обсягу підготовчих робіт, спрощення процесу протягування нового трубопроводу, забезпечення можливості застосування в ускладнених умовах.

Начальник району I групи

Олександр ОХРИМЕНКО





## ДОДАТОК В

### РОЗРАХУНОК ЕКОНОМІЧНОГО ЕФЕКТУ

Зростання обсягів зношених трубопроводів газових і теплових мереж призводить до збільшення фінансових витрат підприємств газопостачання та тепlopостачання на їх ремонт, реконструкцію. Через це надзвичайно актуальною є задача зменшення цих витрат.

Найкращим шляхом зменшення витрат на реконструкцію трубопроводів газових і теплових мереж є все ширше застосування безтраншейних технологій. Економічний ефект від впровадження розроблених технологій протягування поршнем в зношений сталевий трубопровід нового поліетиленового трубопроводу – “Тяговий поршень<sup>Ⓣ</sup>”, нового рукава – “Тяговий поршень<sup>Ⓟ</sup>” полягає в зменшенні витрат на реконструкцію трубопроводів газових і теплових мереж порівняно з іншими безтраншейними технологіями за рахунок зменшення витрат на підготовчі та земляні роботи, протягування поліетиленового трубопроводу зношеним сталевим.

Загалом економічний ефект від впровадження технологій “Тяговий поршень<sup>Ⓣ</sup>”, “Тяговий поршень<sup>Ⓟ</sup>” рівний

$$\Delta E = \Delta E_1 - \Delta E_2, \quad (B.1)$$

де  $\Delta E_1$  – кошторисна вартість виконання безтраншейної реконструкції традиційними тяговими засобами;

$\Delta E_2$  – кошторисна вартість виконання безтраншейної реконструкції технологіями “Тяговий поршень<sup>Ⓣ</sup>”, “Тяговий поршень<sup>Ⓟ</sup>”.

Кошторисна вартість кожного методу реконструкції трубопроводів газових і теплових мереж складається із амортизаційних, прямих, накладних витрат та планових нагромаджень

Продовж. дод. В

$$\Delta E_{1,2} = B_{\Pi} + B_H + H_{\Pi}, \quad (B.2)$$

де  $B_{\Pi}$  – прямі витрати;

$B_H$  – накладні витрати;

$H_{\Pi}$  – планові нагромадження.

Кошторисна вартість експлуатації спеціальних машин і механізмів, які використовуються для реконструкції, відображається в прямих витратах і визначається виходячи з нормативного часу їх роботи, необхідного для виконання встановленого обсягу спеціалізованих робіт та вартості експлуатації будівельних машин і механізмів за одиницю часу їх застосування (машино-година) в поточних цінах. Визначення базисної та розрахункової кошторисної вартості експлуатації машин і механізмів у разі реконструкції традиційними тяговими засобами наведено в таблиці В.1, а вартість спеціальних машин і механізмів в таблиці В.2.

**Таблиця В.1** – Вартість експлуатації машин і механізмів у разі виконання реконструкції традиційними тяговими засобами

Найменування машин, механізмів, обладнання	Число напрацьованих маш. год	Кількість техніки	Витрата пального л/маш.год	Вартість пального та мастила			Загальна сума витрат, грн
				ДП, 29 грн за л	ММ, 33 грн за л	МТ 32 грн за л	
Установка для протягування труб	2	1	14,3	829	66	17	912
Агрегат опресувальний	2	1	5,3	307	25	6	338
Автокран	1	1	9,6	278	22	6	306
Вантажний автомобіль	2	1	17,4	1009	81	20	1110
Одноковшовий екскаватор	1	1	16,6	481	38	10	529
Зварювальна установка	1	1	6,9	200	16	4	220
Труборіз “Орбіта”	0,5	1	3,2	46	4	1	51
<b>Загальна сума, грн</b>							<b>3466</b>

Продовж. дод. В

**Таблиця В.2** – Вартість спеціальних машин і механізмів у разі реконструкції традиційними тяговими засобами

Найменування машин, механізмів, обладнання	Кількість, одиниць	Балансова вартість, грн
Лебідка для протягування труб	1	170000
<b>Загальна сума,грн</b>		170000

Розмір амортизаційних відрахувань у разі реконструкції традиційними тяговими засобами

$$A = \frac{\Phi_{np} \cdot H_a}{100} = \frac{170000 \cdot 6}{100} = 10200 \text{ грн}, \quad (\text{В.3})$$

де  $A$  – амортизаційні відрахування на експлуатацію спеціальних машин і механізмів;

$\Phi_{np}$  – сумарна балансована вартість машин і механізмів;

$H_a$  – норми амортизаційних відрахувань відповідно до законодавства України.

Загальна вартість експлуатації машин і механізмів у разі реконструкції традиційними тяговими засобами

$$V_{екс.заг.1} = 3466 + 170000 + 10200 = 183666 \text{ грн}.$$

Визначення базисної та розрахункової кошторисної вартості експлуатації машин і механізмів у разі реконструкції технологією “Тяговий поршень<sup>Ⓟ</sup>” наведено в таблиці В.3, а вартість спеціальних машин і механізмів в таблиці В.4.

## Продовж. дод. В

**Таблиця В.3** – Вартість експлуатації машин і механізмів у разі реконструкції технологією “Тяговий поршень<sup>Ⓟ</sup>”

Найменування машин, механізмів, обладнання	Число напрацьованих маш. год	Кількість техніки	Витрага пального л/маш.год	Вартість пального та мастила			Загальна сума витрат, грн
				ДП, 29 грн за л	ММ, 33 грн за л	МТ 32 грн за л	
Агрегат опресувальний	2	1	5,3	307	25	6	338
Автокран	1	1	9,6	278	22	6	306
Вантажний автомобіль	2	1	17,4	1009	81	20	1110
Одноковшовий екскаватор	0,5	1	16,6	241	19	5	265
Зварювальна установка	1	1	6,9	200	16	4	220
Труборіз “Орбіта”	0,5	1	3,2	46	4	1	51
Компресор	0,5	1	5,7	83	7	2	92
<b>Загальна сума, грн</b>							<b>2382</b>

**Таблиця В.4** – Вартість спеціальних машин і механізмів у разі реконструкції технологією “Тяговий поршень<sup>Ⓟ</sup>”

Найменування машин, механізмів, обладнання	Кількість, одиниць	Балансова вартість, грн
Ущільнювальна система	1	22000
<b>Загальна сума, грн</b>		<b>22000</b>

Розмір амортизаційних відрахувань у разі реконструкції технологією “Тяговий поршень<sup>Ⓟ</sup>” за (В.3)

$$A = \frac{22000 \cdot 6}{100} = 1320 \text{ грн.}$$

## Продовж. дод. В

Загальна вартість експлуатації машин і механізмів у разі реконструкції технологією “Тяговий поршень<sup>Ⓟ</sup>” становить

$$V_{\text{екс.заг.2}} = 2382 + 22000 + 1320 = 25702 \text{ грн.}$$

Вартість експлуатації машин і механізмів у разі реконструкції технологією “Тяговий поршень<sup>Ⓟ</sup>” така ж сама, як і у разі реконструкції технологією “Тяговий поршень<sup>Ⓟ</sup>” і складає 2382 грн. Вартість спеціальних машин і механізмів у разі реконструкції технологією “Тяговий поршень<sup>Ⓟ</sup>” наведена в таблиці В.5.

**Таблиця В.5** – Вартість спеціальних машин і механізмів у разі реконструкції “Тяговий поршень<sup>Ⓟ</sup>”

Найменування машин, механізмів, обладнання	Кількість, одиниць	Балансова вартість, грн
Циліндрична камера	1	31000
Барабан для намотування рукава		3000
<b>Загальна сума, грн</b>		<b>34000</b>

Розмір амортизаційних відрахувань у разі реконструкції технологією “Тяговий поршень<sup>Ⓟ</sup>” за (В.3)

$$A = \frac{34000 \cdot 6}{100} = 2040 \text{ грн.}$$

## Продовж. дод. В

Загальна вартість експлуатації машин і механізмів у разі реконструкції технологією “Тяговий поршень<sup>®</sup>” становить

$$V_{\text{екс.заг.3}} = 2382 + 34000 + 2040 = 38422 \text{ грн.}$$

Підсумовуючи розрахунки вартості експлуатації машин і механізмів можна сказати, що технології протягування поршнем в зношений сталевий трубопровід нового поліетиленового трубопроводу – “Тяговий поршень<sup>®</sup>”, нового рукава – “Тяговий поршень<sup>®</sup>” є більш економічним ніж традиційні технології реконструкції трубопроводів газових і теплових мереж.

Прямі витрати визначаються за

$$V_{\Pi} = V_{\text{екс.заг}} + V_{\text{рек.}} + V_{\text{тр}}, \quad (\text{В.4})$$

де  $V_{\text{рек.}}$  – вартість виконання всіх видів робіт під час реконструкції;

$V_{\text{тр}}$  – вартість поліетиленового трубопроводу у разі реконструкції технологією “Тяговий поршень<sup>®</sup>” чи рукава у разі реконструкції технологією “Тяговий поршень<sup>®</sup>”.

Вартість виконання усіх видів робіт у разі реконструкції традиційними тяговими засобами наведена в таблиці В.6, технологією “Тяговий поршень<sup>®</sup>” в таблиці В.7, технологією “Тяговий поршень<sup>®</sup>” в таблиці В.8.

Продовж. дод. В

**Таблиця В.6** – Вартість виконання робіт у разі реконструкції традиційними тяговими засобами

Вид робіт	Вартість, грн
Транспортні роботи	900
Підготовчі роботи	500
Земляні роботи	500
Зварювальні роботи	700
Протягування робочого трубопроводу	800
Ізолювання зварних стиків	450
Випробування	300
Завершальні роботи	450
<b>Загальна сума, грн</b>	<b>4600</b>

**Таблиця В.7** – Вартість виконання робіт у разі реконструкції технологією “Тяговий поршень<sup>Ⓣ</sup>”

Вид робіт	Вартість, грн
Транспортні роботи	900
Підготовчі роботи	300
Земляні роботи	300
Зварювальні роботи	700
Протягування робочого трубопроводу	300
Ізолювання зварних стиків	450
Випробування	300
Завершальні роботи	450
<b>Загальна сума, грн</b>	<b>3700</b>

**Таблиця В.8** – Вартість виконання робіт у разі реконструкції технологією “Тяговий поршень<sup>Ⓣ</sup>”

Вид робіт	Вартість, грн
1	2
Транспортні роботи	900
Підготовчі роботи	300
Земляні роботи	300

Продовж. дод. В

Кінець таблиці В.8

1	2
Зварювальні роботи	700
Протягування рукава	400
Ізолювання зварних стиків	450
Випробування	300
Завершальні роботи	450
<b>Загальна сума, грн</b>	<b>3800</b>

Вартість поліетиленового трубопроводу

$$B_{mp} = B_{1mp} L = 35 \cdot 50 = 1750 \text{ грн} , \quad (\text{В.5})$$

де  $B_{1mp}$  – вартість одного метра поліетиленової труби зовнішнім діаметром 40 мм з SDR 17,6 та товщиною стінки 6 мм, виготовленої з поліетилену марки ПЕ 100, складає 35 грн;

$L$  – довжина ділянки зношеного сталевго трубопроводу, яка буде реконструюватись.

Вартість рукава

$$B_p = B_{1mp} L = 70 \cdot 50 = 3500 \text{ грн} , \quad (\text{В.6})$$

де  $B_{1mp}$  – вартість одного метра рукава;

$L$  – довжина ділянки зношеного сталевго трубопроводу, яка буде реконструюватись.

Накладні витрати рівні

$$B_H = \frac{H_H}{100} B_{\Pi} , \quad (\text{В.7})$$



Продовж. дод. В

де  $H_H$  – накладні норми, які рівні 16 % від прямих витрат.

Планові накопичення рівні

$$H_{II} = \frac{k_{II}}{100} (B_{II} + B_H), \quad (B.8)$$

де  $k_{II}$  – відсоток планового накопичення у розмірі 8 % від прямих витрат та накладних витрат.

Результати розрахунків за (B.2), (B.4), (B.7), (B.8) наведено в таблиці B.9.

**Таблиця B.9** – Результати розрахунків кошторисної вартості реконструкції трубопроводів газових і теплових мереж

Назва витрат	Традиційні тягові засоби	Технологія “Тяговий поршень <sup>Ⓣ</sup> ”	Технологія “Тяговий поршень <sup>Ⓟ</sup> ”
Прямі витрати, грн	190016	31152	45722
Накладні витрати, грн	30403	4984	7315
Планові накопичення, грн	17634	2891	4243
Кошторисна вартість, грн	238053	39027	57280

За (B.1) загальний економічний ефект від впровадження технологій “Тяговий поршень<sup>Ⓣ</sup>” складає

$$\Delta E = 238053 - 39027 = 199026 \text{ грн.}$$

За (B.1) загальний економічний ефект від впровадження технологій “Тяговий поршень<sup>Ⓟ</sup>” складає

$$\Delta E = 238053 - 57280 = 180773 \text{ грн.}$$