

ДОСЛІДЖЕННЯ ГАЗОДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ У ТРУБОПРОВІДНИХ КОМУНІКАЦІЯХ ПІД ЧАС ЇХ БЕЗТРАНШЕЙНОЇ РЕКОНСТРУКЦІЇ ТЕХНОЛОГІЄЮ “ТЯГОВИЙ ПОРШЕНЬ[Ⓣ]”

К. А. Поляруш

ПАТ "Київенерго" СВП "Київські Теплові Мережі" РТМ "Печерськ";
01103, м. Київ, вул. Товарна, 1, тел. (044) 529-88-75, e-mail: pubrel@kievenergo.com.ua

Описано технологію безтраншейної реконструкції трубопроводних комунікацій “Тяговий поршень[Ⓣ]”, яка полягає в протягуванні нового поліетиленового трубопроводу в зношений сталевий поршень. При цьому, щоб в запоршиновому просторі підтримувався необхідний тиск, простір між новим поліетиленовим трубопроводом та зношеним сталевим герметизується.

Здійснено 3D моделювання міжтрубного та запоршинового простору, де відбувається складний турбулентний рух потоку повітря. Виконано CFD моделювання газодинамічних процесів у міжтрубному та запоршиновому просторі під час протягування поршнем поліетиленового трубопроводу зношеним сталевим трубопроводом в програмному комплексі ANSYS Fluent. Математична модель базується 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. Для моделювання руху поршня та протягуваного ним поліетиленового трубопроводу було застосовано модель динамічної сітки. Було вибрано тип перебудови параметрів динамічної сітки під час протягування поршнем нового поліетиленового трубопроводу в дефектний сталевий – Layering.

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

Ключові слова: CFD моделювання, втрати тиску, динамічна сітка, лінії течії, поліетиленова труба, потік повітря, протягування, рівняння Нав’є-Стокса.

Описана технология бестраншейной реконструкции трубопроводных коммуникаций “Тяговой поршень[Ⓣ]”, которая заключается в протягивании нового полиэтиленового трубопровода в изношенный стальной поршень. При этом, чтобы в запоршиновом пространстве поддерживалось необходимое давление, пространство между новым полиэтиленовым трубопроводом и изношенным стальным герметизируется.

Осуществлено 3D моделирование межтрубного и запоршинового пространства, где происходит сложное турбулентное движение потока воздуха. Выполнено CFD моделирование газодинамических процессов в межтрубном и запоршиновом пространстве при протягивании поршнем полиэтиленового трубопровода в изношенный стальной трубопровод в программном комплексе ANSYS Fluent. Математическая модель базируется на решении уравнений Навье-Стокса и неразрывности потока, замкнутых двухпараметрической моделью турбулентности Лаундер-Шарма с применением пристенной функции с соответствующими начальными и граничными условиями. Для моделирования движения поршня и протягивания в нем полиэтиленового трубопровода была применена модель динамической сетки. Был выбран тип перестройки параметров динамической сетки при протягивании поршнем нового полиэтиленового трубопровода в дефектный стальной – Layering.

Результаты моделирования были визуализированы в постпроцессоре программного комплекса построением линий течения, векторов скорости, полей давления на контурах и в продольном сечении межтрубного и запоршинового пространства. Определены точные значения скорости, давления в различных точках межтрубного и запоршинового пространства. Исследована структура потока воздуха в запоршиновом и межтрубном пространстве. Выявлены места замедления и ускорения потока воздуха, падения и роста давления. Определены потери давления в межтрубном пространстве.

Ключевые слова: CFD моделирование, динамическая сетка, линии тока, полиэтиленовая труба, потери давления, поток воздуха, протягивание, уравнения Навье-Стокса.

The technology of the trenchless reconstruction of pipeline communications "Traction Pig[®]", which consists in running a new polyethylene pipeline into a steel one worn by pigs described. At the same time, in order to maintain the necessary pressure in the cavity, the space between the new polyethylene pipeline and the worn steel one is sealed.

A 3D modeling of the annulus and space behind the pig, where the complex turbulent flow of air flows, is carried out. A CFD modeling of gas-dynamic processes in the annulus and space behind the pig while laying a worn steel pipeline with a polyethylene pipeline in the ANSYS Fluent software system is performed. The mathematical model is based on the solution of the Navier-Stokes equations and the continuity of the flow closed by a two-parameter turbulence model of Launder-Sharma with the use of a wall function with corresponding initial and boundary conditions. A dynamic grid model was used to simulate the motion of the pig and the polyethylene pipeline. The type of adjustment of the dynamic grid parameters during the stroke of a new polyethylene pipeline into a defective steel one – Layering was chosen.

The simulation results were visualized in the postprocessor of the software complex by constructing flow lines, velocity vectors, pressure fields on the contours and in the longitudinal section of the annulus and space behind the pig. The exact values of velocity, pressure at different points between the annulus and space behind the pig were determined. The structure of the air flow in the cavity and interstitial space is studied. The places of slowdown and acceleration of air flow, falling and increase of pressure are found. The loss of pressure in the annular space is determined.

Keywords: airflow, CFD simulation, dynamic grid, flow lines, Navier-Stokes equation, polyethylene pipe, pressure loss, stretching.

Вступ. Великі обсяги будівництва сталевих трубопроводних комунікацій міст (мереж газо-, тепло-, водопостачання, каналізації) в середині та кінці минулого століття зумовили значні труднощі з підтриманням їх у належному стані сьогодні, коли почався період їх інтенсивних відмов через природне старіння, корозію тощо. Зараз існує, а у найближче десятиліття збережеться високий потенціал зростання капіталовкладень, інвестицій в реконструкцію і ремонт трубопроводних мереж міст України. XXI століття буде сторіччям заміни всіх інженерних комунікацій, побудованих у XX столітті. Організації, які експлуатують трубопроводні комунікації великих міст, практично щоденно стикаються з проблемою ремонту, заміни тієї чи іншої ділянки трубопроводу.

Особливо складними є задачі реконструкції, ремонту трубопроводних комунікацій в важкодоступних місцях, під дорогами, вимощеними тротуарами, площами в центрі великих міст, де є великі скупчення машин, людей, історична інфраструктура.

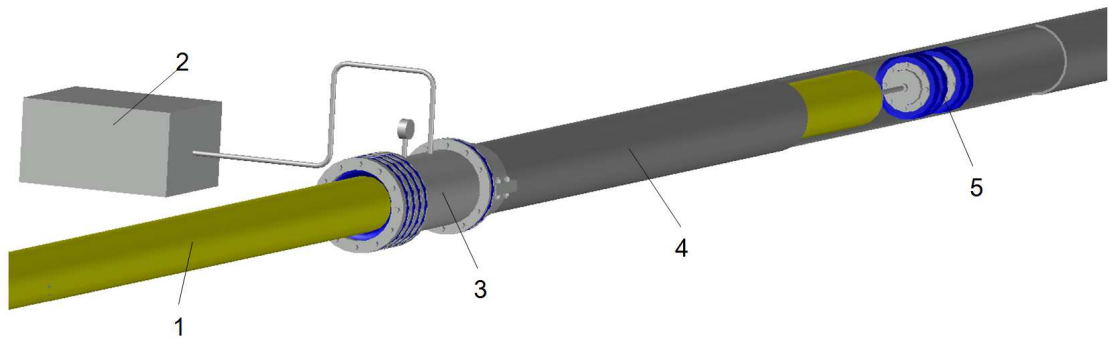
Ці, а також цілий ряд інших причин обумовлюють особливу актуальність застосування, удосконалення, розроблення нових безтраншейних технологій реконструкції трубопроводних комунікацій, внутрішньотрубних методів обстеження та ремонту важкодоступних ділянок трубопроводів. Бум безтраншейних технологій ремонту, реконструкції трубопроводних комунікацій є неминучим, тож масштабне застосування цих технологій є необхідністю сьогодення.

Аналіз сучасних закордонних і вітчизняних досліджень і публікацій

Внутрішньотрубними методами ремонту та безтраншейними технологіями реконструкції трубопроводних комунікацій займаються багато науковців, фірм. Одними з найактуальніших праць, присвячених безтраншейним технологіям, є [1–8].

Дорошенко Я. В., Поляруш К. А., Запукляк В. Б. [9, 10] розробили технологію безтраншейної реконструкції трубопроводних комунікацій "Тяговий поршень[®]". Ця технологія полягає в протягуванні нового поліетиленового трубопроводу в зношений сталевий поршнем. Отримано залежності для розрахунку сил опору, які діють на рухому систему, розрахунку необхідного тиску в запоршневому просторі, щоб поршень протягнув новий поліетиленовий трубопровід усією довжиною реконструйованого горизонтального чи похилого зношеного сталевого трубопроводу.

Формулювання цілей статті. Викладені в [9] дослідження динаміки руху поршня з прикріпленим до нього поліетиленовим трубопроводом не враховують газодинамічних процесів в трубопроводних комунікаціях під час їх безтраншейної реконструкції поршнем. Тому метою цієї роботи є дослідження газодинамічних процесів в міжтрубному просторі між реконструйованим сталевим трубопроводом та новим протягнутим поршнем поліетиленовим трубопроводом.



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

Рисунок 1 – Схема протягування нового поліетиленового трубопроводу в зношений сталевий поршнем

Виклад основного матеріалу

Розроблена технологія безтраншейної реконструкції трубопровідних комунікацій “Тяговий поршень[®]” полягає в протягуванні нового поліетиленового трубопроводу 1 всередині зношеного сталевому 4 поршнем 5 (рис. 1). Щоб поршень 5 рухався сталевим трубопроводом 4, в запоршневий простір треба подавати компресором 2 під тиском повітря. При цьому, щоб в запоршневому просторі підтримувався необхідний тиск, треба герметизувати простір між новим поліетиленовим трубопроводом 1 та зношеним сталевим 4. Для цього розроблено ущільнювальну систему 3, яку в робочому котловані або колодязі фланцем чи хомутом треба прикріпити до торця зношеного сталевому трубопроводу 4. Міжтрубний простір ущільнюється кільцевими гумовими ущільненнями, які затискаються фланцями. Кільцеві гумові ущільнення повинні герметизувати міжтрубний простір і не випускати з нього повітря та забезпечити можливість протягування нового поліетиленового трубопроводу 1 зношеним сталевим 4. Тому їх внутрішня частина повинна бути вигнута в бік протягування. Тоді під тиском повітря в міжтрубному просторі вони будуть притискатись до стінки протягуваного нового трубопроводу 1.

При великій довжині реконструйованого сталевому трубопроводу, щоб дослідити процес протягування поліетиленового трубопроводу в зношений сталевий поршнем, слід 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 (що зроблено в [9]) та втрати енергії під час руху повітря міжтрубним простором, оскільки на величину необхідного тиску в запоршневому просторі впливають втрати тиску вздовж трубопроводу від компресора до поршня.

Створення і реалізація математичної моделі руху твердих тіл трубопроводами під тиском є складною задачею. Динаміку руху поршнів трубопроводами досліджували Saeidbakhsh M. [11], Tolmasquim S. [12], Грудз В.Я. [13–15], Грудз Я.В. [15, 16]. Дослідниками трубопровідного транспорту 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.

Нестационарний характер руху повітря в міжтрубному просторі між поліетиленовим і сталевим трубопроводом, які мають різну шорсткість стінки та складні динамічні і кінематичні умови на рухомій границі створюють труднощі в побудові та реалізації математичних моделей. Тому з метою спрощення прийнято рішення розглядати газодинамічні процеси в рівнинному трубопроводі, оскільки вплив нахилу трубопроводу на динаміку руху оцінено в [9].

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

Ізотермічний характер руху повітря в міжтрубному та запоршневому просторі може бути змодельований фундаментальними рівняннями газової динаміки, а саме рівняння Нав'є – Стокса (1), яке виражає собою закон збереження імпульсу, і нерозривності потоку (2), яке виражає собою закон збереження маси

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right) + f_i; \quad (1)$$

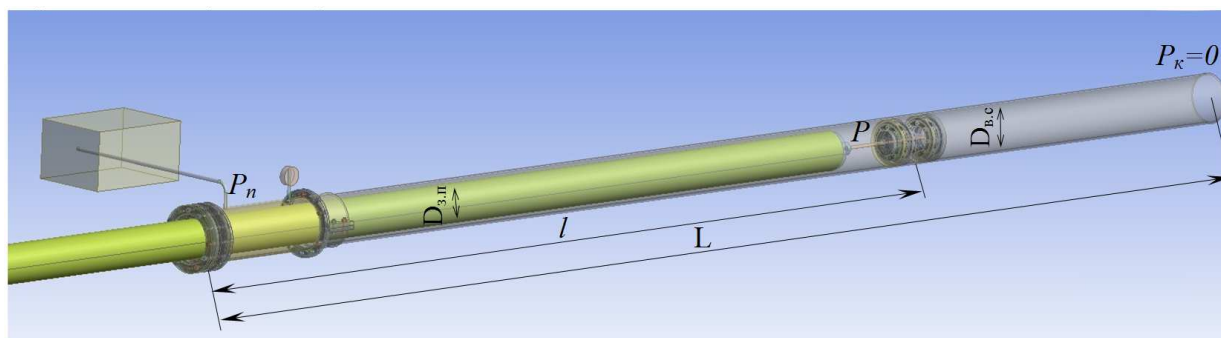


Рисунок 2 – Розрахункова схема дослідження газодинамічних процесів під час протягування поршнем поліетиленового трубопроводу дефектним сталевим

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

де x_i, x_j – координати;

t – час;

u_i, u_j – компоненти швидкості;

ρ – густина газу;

μ – молекулярна динамічна в'язкість газу;

f_i – доданок, який враховує дію масових

сил;

p – тиск;

c – швидкість звуку у повітрі. [17]

Необхідно відзначити, що будь-яка математична модель ідеалізує свій фізичний праобраз. У даній задачі розглядається одновимірний ізотермічний рух газу. Розрахункова схема дослідження газодинамічних процесів під час протягування поршнем поліетиленового трубопроводу зношеним сталевим трубопроводом наведена на рис. 2.

Поставлена задача реалізується за наступних умов:

- до запускання поршня повітря в міжтрубний простір не подавалось;

- після початку руху поршня і до його кінця надлишковий тиск на виході компресора підтримується сталим і рівним P_n , а в кінці сталевого трубопроводу і перед поршнем – нулю;

- тиск на поршень визначається силою тертя манжет поршня до стінок сталевого трубопроводу, силою тертя поліетиленової труби до сталеві, силою тертя поліетиленової труби в манжетах ущільнювальної системи;

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

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

Щоб реалізувати поставлену задачу, початкові умови для рівнянь (1) і (2) будуть

$$P_n = 0, \quad (3)$$

$$P_k = 0. \quad (4)$$

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

$$P_n(0, t) = P_n, \quad (5)$$

$$P_k(L, t) = 0, \quad (6)$$

де L – загальна довжина сталевого трубопроводу.

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

$$v_1(l, t) = \frac{dl}{dt}, \quad (7)$$

де v_1 – лінійна швидкість повітря за поршнем.

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

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

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

$$l_0 = w_0 \Delta t. \quad (8)$$

Реалізувати такий алгоритм з врахуванням різної шорсткості внутрішньої стінки сталевого зношеного трубопроводу та зовнішньої стінки нового поліетиленового трубопроводу можна комп'ютерним моделюванням тривимірних турбулентних течій в програмному комплексі

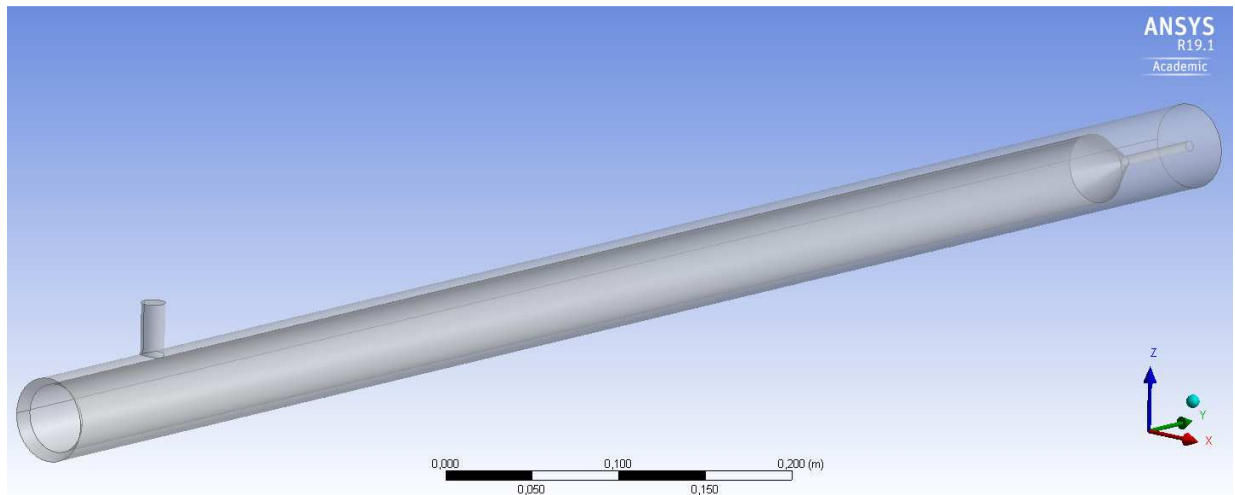


Рисунок 3 – Імпортована в програмний комплекс ANSYS Fluent модель запоршневого та міжтрубного простору

ANSYS Fluent R19.1 Academic з застосуванням динамічних сіток.

Програмний комплекс ANSYS Fluent базується на рівняннях Нав'є – Стокса (1) і нерозривності потоку (2), замкнених широко відомою двопараметричною $k - \epsilon$ моделлю турбулентності Лаундера-Шарма із застосуванням пристінної функції з відповідними початковими (3), (4) і граничними (5), (6) умовами.

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

$$\begin{aligned}
 & \text{- рівняння переносу турбулентної енергії } k \\
 & \frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla(\rho u k) = \\
 & = \nabla \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right) + \mu_t G - \rho \epsilon ; \quad (9)
 \end{aligned}$$

- рівняння переносу турбулентної дисипації ϵ

$$\begin{aligned}
 & \frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \nabla(\rho u \epsilon) = \\
 & = \nabla \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \nabla \epsilon \right) + C_1 \frac{\epsilon}{k} \mu_t G - C_2 \rho \frac{\epsilon^2}{k} , \quad (10)
 \end{aligned}$$

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

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

Тривимірні модель запоршневого та міжтрубного простору між дефектним сталевим трубопроводом та новим поліетиленовим, де відбувається складний турбулентний рух потоку повітря, була змодельована в системі автоматизованого проектування і креслення AutoCAD, зберігались з розширенням AutoCAD (.iges) та імпортувались в програмний комплекс ANSYS Fluent (рис. 3). Причому модель була змодельована з патрубком, яким повітря подається в міжтрубний простір.

Для моделювання потоку повітря в препроцесорі Fluent – Meshing генерувалась об'ємна розрахункова сітка Hex Dominant; об'єм заповнювався гексадричними елементами. Задавався розмір елементів сітки – 0,003 м. Для кращого опису приграничного шару був створений пристінковий шар ґраток Inflation з висотою ґраток 0,001 м і кількістю шарів ґраток – 4. В місці приєднання патрубка до сталевих трубопроводу виконувалось подрібнення сітки для кращого візуалізування потоку в цій зоні до розміру елементів сітки – 0,001 м (рис. 4). Для такого розміру елементів сітки результати розрахунку були якісно візуалізовані, а час розрахунку складав близько півтори години.

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

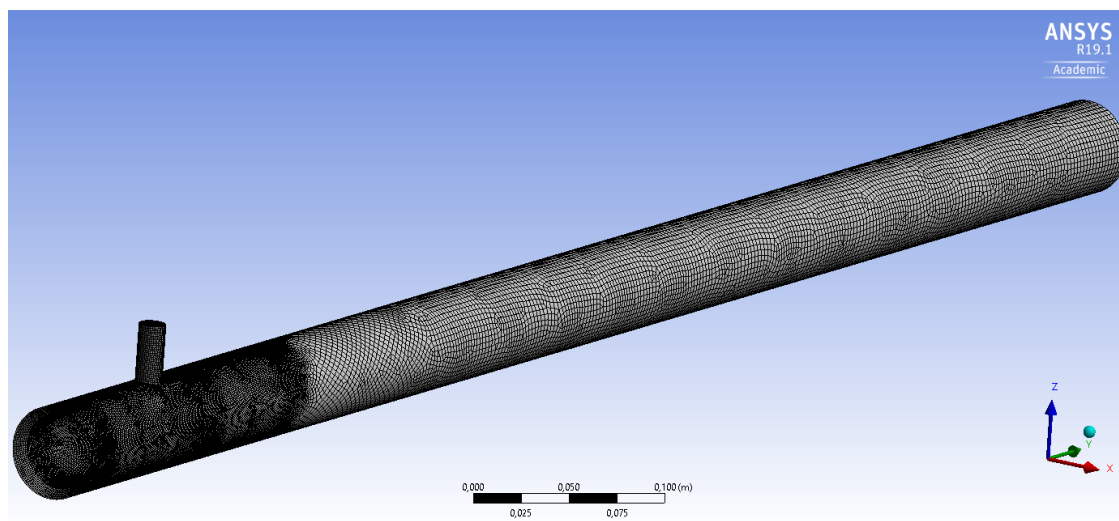


Рисунок 4 – Розрахункова об’ємна сітка

полі опцій моделей турбулентності було вибрано модифікацію Realizable.

Модель турбулентності $k-\varepsilon$ не дає змоги з достатньою точністю 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 вибирали повітря і присвоювали 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 динаміки 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 стінки (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 $D_{в.с} = 49 \text{ мм}$, зовнішній діаметр поліетиленової труби $D_{з.п} = 40 \text{ мм}$. Внутрішній діаметр патрубка, яким повітря подається від компресора в міжтрубний простір $D_{в.пат} = 10 \text{ мм}$, рівний гідравлічному діаметру, який задавався в ANSYS Fluent.

Для дослідження динаміки руху повітря міжтрубним і запоршневим простором під час протягування нового поліетиленового трубопроводу в дефектний сталевий задавались такі граничні умови на вході (рис. 5):

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

Процес протягування нового поліетиленового трубопроводу дефектним сталевим є динамічним – 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 задання динамічної моделі руху сітки і її основних параметрів в меню ANSYS Fluent було вибрано опцію Dynamic Mesh. В полі опцій моделі Dynamic Mesh було вибрано тип перебудови параметрів динамічної сітки під час протягування поршнем нового поліетиленового трубопроводу в дефектний сталевий – Layering,

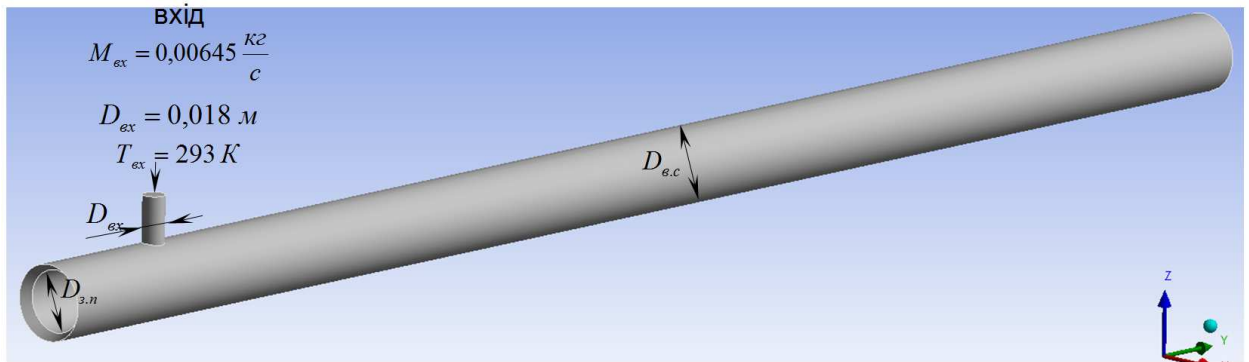
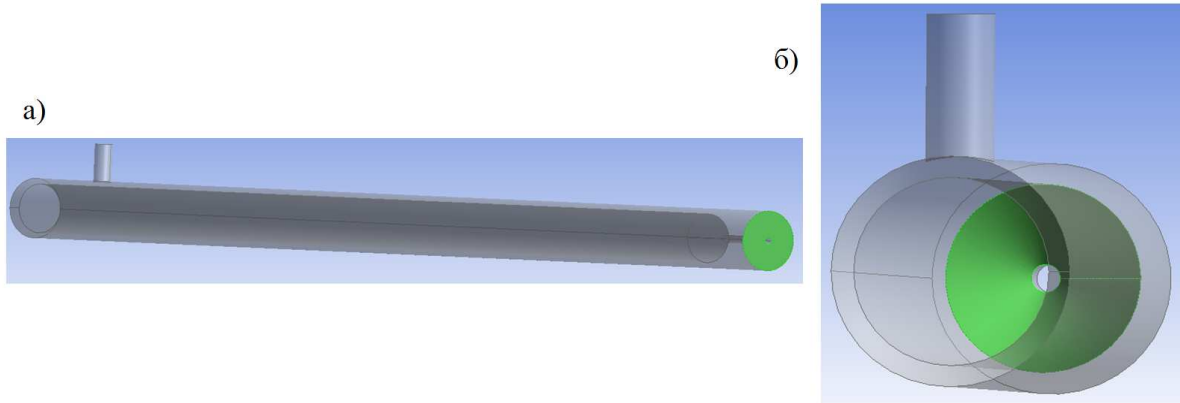


Рисунок 5 – Розрахункова схема



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

Рисунок 6 – Схема задавання рухомих граней

який найкраще підходить для поступального руху. Тип перебудови параметрів динамічної сітки Layering включає в себе алгоритм створення і видалення ґраток сітки (ґратки сітки додаються, якщо зона збільшується, або видаляються, якщо зона зменшується). Після чого задавалось, що від грані, яка є задньою частиною поршня (рис. 6, а), ґратки сітки повинні додаватись, а від грані, яка є внутрішньою поверхнею прикріпленого до поліетиленового трубопроводу оголовка (рис. 6, б), – видалятись. У вкладці Options динамічної сітки Layering задавалось висота, на яку буде додаватись рядок ґраток Split factor (приймалась рівною 0,2) та висота, на яку буде видалятись рядок ґратки Collaps factor (приймалась рівною 0,2).

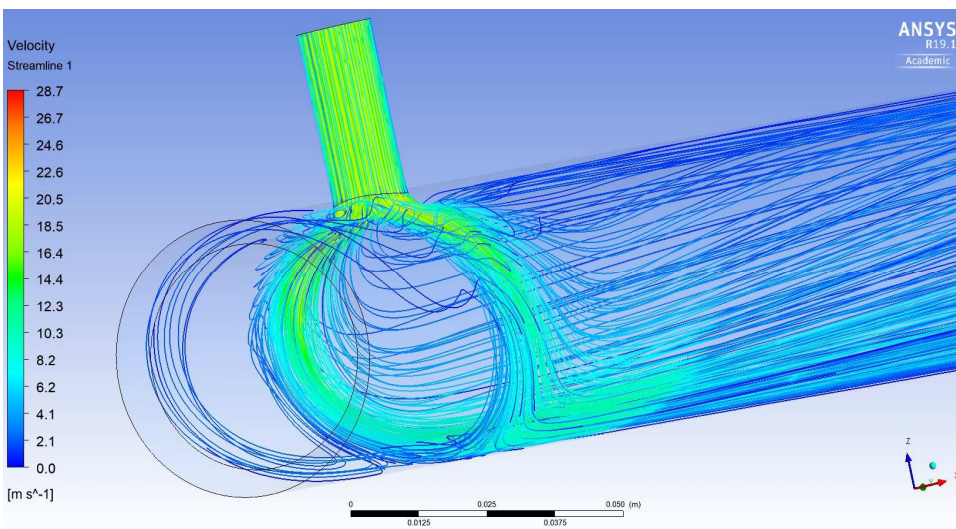
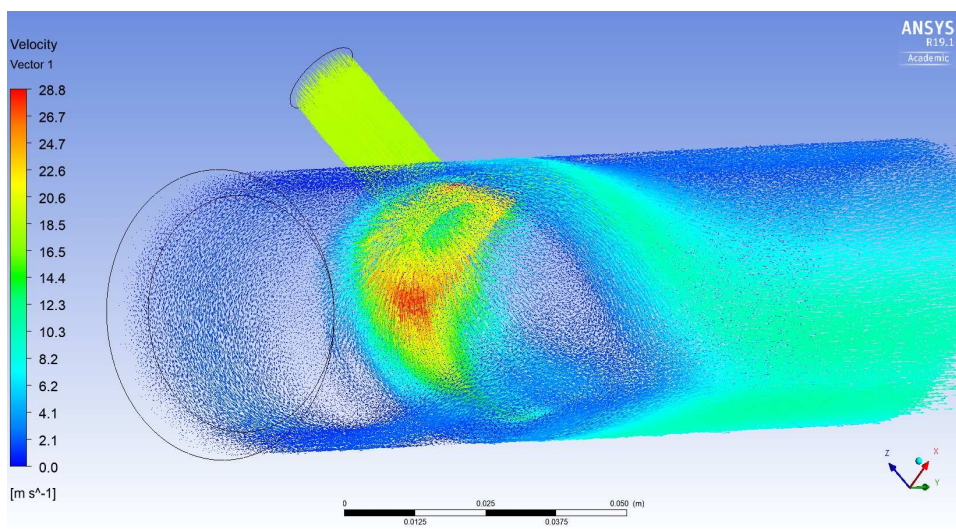
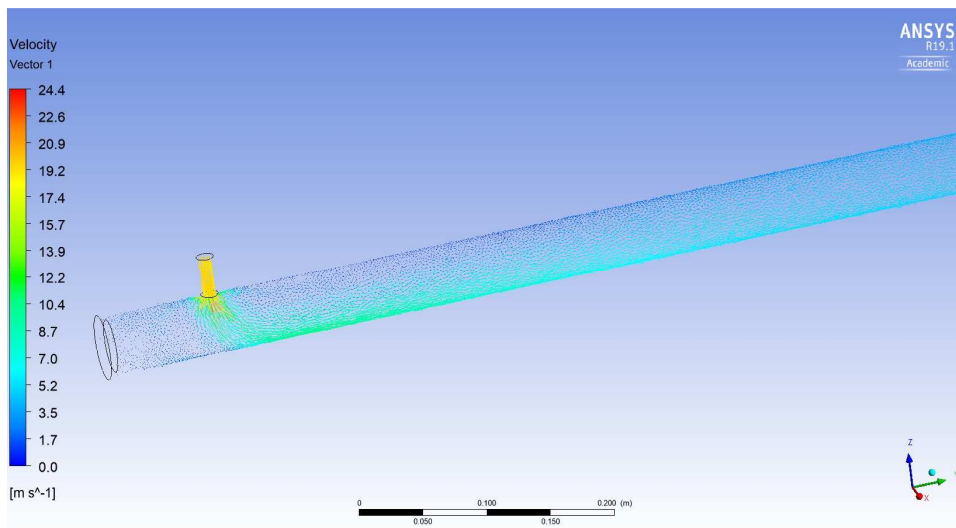
Після задавання граничних умов та динамічної моделі руху сітки налаштовували параметри вирішувача. В дереві проекту вибиралась вкладка Solution methods, де в зоні Pressure-Velocity Coupling вибиралась алгоритм зв'язку рівняння руху повітря і нерозривності. Вибирався алгоритм Coupled, який вважається окремим видом вирішувача Pressure-based coupled. Для зв'язування полів швидкості і тиску застосовується алгоритм розщеплення, а для решти параметрів – алгоритм установлення. Цей алго-

ритм 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 вибиралась другий порядок точності.

Після налаштування параметрів вирішувача здійснювалась гібридна ініціалізація.

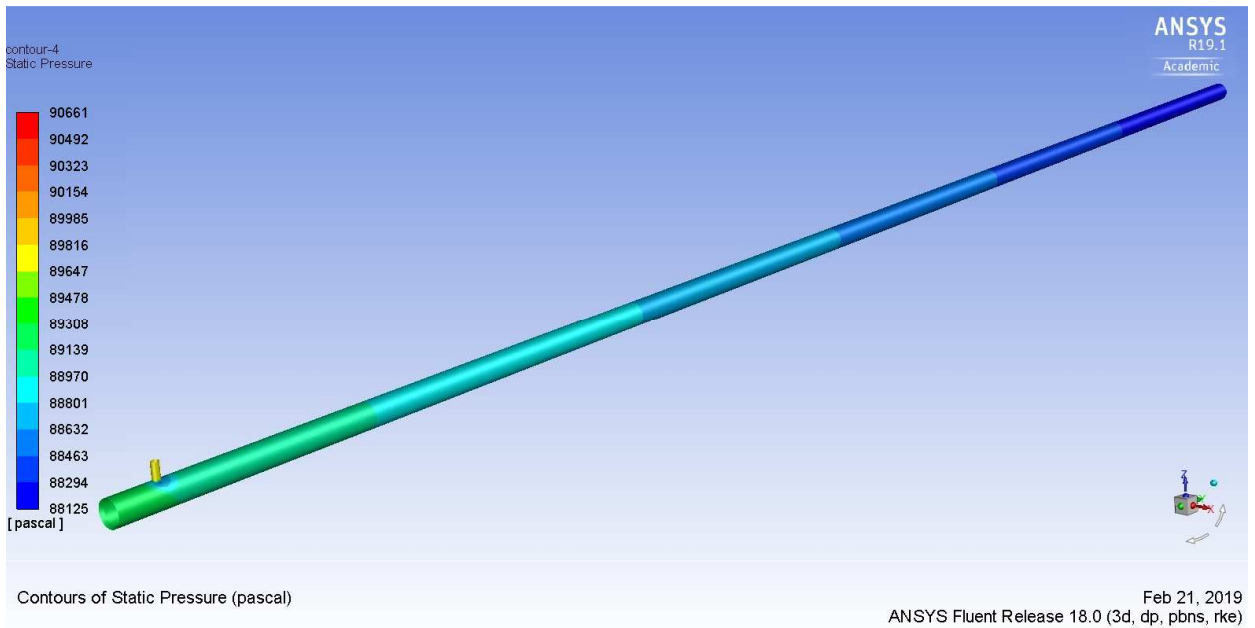
Повна збіжність ітераційного процесу досягалась приблизно за однакову кількість ітерацій – 300. Така кількість ітерацій виконувалась близько півтори години процесором intel core i3, (частота – 2,2 ГГц, обсяг оперативної пам'яті – 4 Гб).

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 нового поліетиленового трубопроводу в дефектний сталевий і зібрати вичерпні дані про нього. Було побудовано вектори швидкості (рис. 7, а, б), лінії течії (рис. 7, в), поля тиску на контурах (рис. 8, а) та поля тиску в площині вертикального повздовжнього перерізу (рис. 8, б).

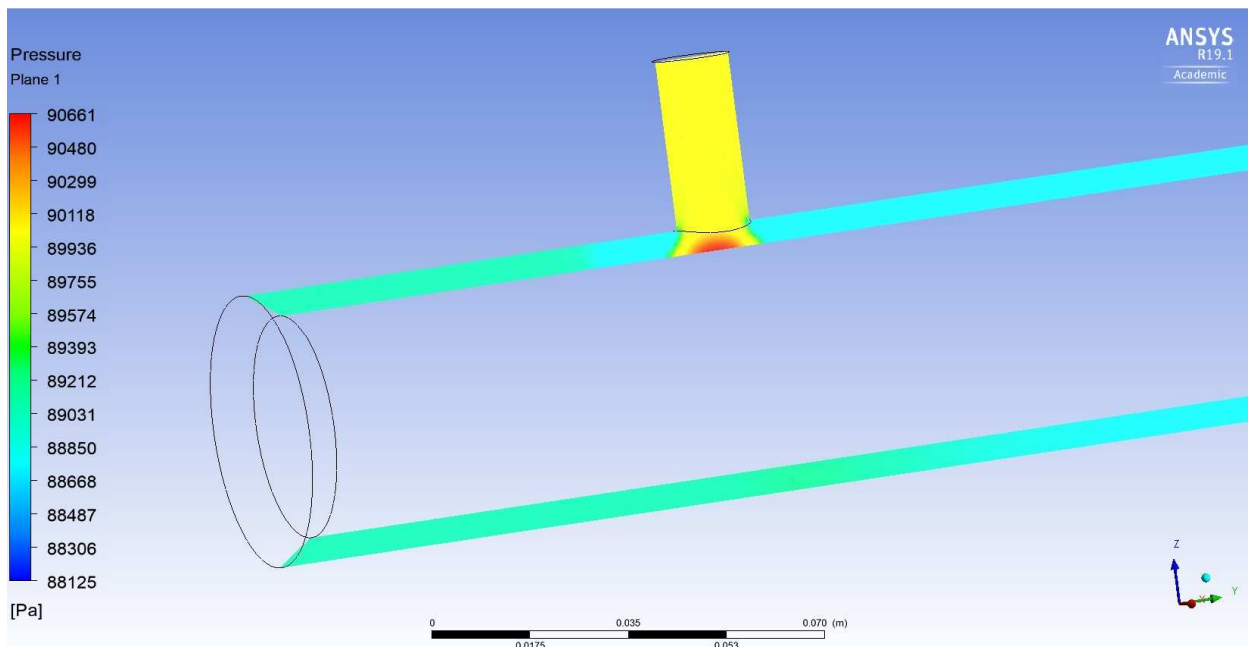


а), б) – вектори швидкості; в) – лінії течії

Рисунок 7 – Результати моделювання швидкості руху повітря в міжтрубному і запоршневому просторі під час протягування нового поліетиленового трубопроводу в дефектний сталевий



а)



б)

а) – поля тиску на контурах;

б) – поля тиску в площині вертикального повздовжнього перерізу

Рисунок 8 – Результати моделювання розподілу тиску в міжтрубному і запоршневому просторі під час протягування нового поліетиленового трубопроводу в дефектний сталевий

За результатами розрахунку в програмно-комплексі ANSYS Fluent (рис. 7, а, б, в) було визначено, що у входному 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 входного патрубка потік повітря перетікає у міжтрубний простір. В міжтрубному просторі навпроти входного патрубка потік повітря розхо-

диться в різні боки на кут 360°. При цьому в центрі такого розходження навпроти входного патрубка відбувається сповільнення потоку повітря до 12 м/с, а на краях (за межами входного патрубка) пришвидшення до 24,5 м/с (рис. 7, б). Після такого розходження потоку повітря в міжтрубному просторі основна частина потоку повітря перетікає бічною частиною міжтрубного простору донизу (рис. 7, б, в), де швидкість потоку складає 14,4 м/с. Далі більша частина

поток рухається вздовж нижньої частини труби в напрямку протягування з швидкістю близько 14 м/с, яка вздовж міжтрубного простору зменшується (рис. 7, а). Біля верхньої частини труби за вхідним патрубком швидкість течії є незначною і складає близько 1 м/с (рис. 7). На віддалі близько 3 м від вхідного патрубка швидкість потоку в поперечному перерізі вирівнюється і складає близько 1,7 м/с.

Як видно з полів тиску (рис. 8, а, б), тиск в 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 (рис. 8, б), а довкола вхідного патрубка тиск знижується до 88461 Па (рис. 8, 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 початку міжтрубного поршня складає 89602 Па, а в запоршневому просторі – 88125 Па. Таким чином, падіння тиску в міжтрубному просторі на один погонний метр складає 369 Па.

Висновок

Виконавши моделювання газодинамічних процесів у міжтрубному та запоршневому просторі під час протягування поршнем поліетиленового трубопроводу зношеним сталевим трубопроводом в програмному комплексі ANSYS Fluent, виявлено місця сповільнення та пришвидшення потоку повітря, падіння та зростання тиску. Моделювання було виконано з врахуванням різної шорсткості стінки сталевого та поліетиленового трубопроводу. Визначено втрати тиску в міжтрубному просторі та встановлено, що під час протягування поліетиленового трубопроводу зовнішнім діаметром 40 мм в реконструйований сталевий трубопровід внутрішнім діаметром 49 мм падіння тиску на один погонний метр складає 369 Па.

Розроблена методика та отримані результати дають змогу підбирати обладнання і матеріали для виконання робіт з реконструкції зношених трубопровідних комунікацій технологією “Тяговий поршень[®]”.

Література

1. David W. Rusch internal repair of pipeline leaks using pressure – activated sealant [Text]. *SPE. Report for Eastern Regional Meeting in Charleston*. West Virginia, USA., 15–17 September 2004.
2. In-pipe robot based on selective drive mechanism [Text] / S. Roh, D. Kim, J. Lee [and others]. *International Journal of Control, Automation and Systems*. Vol. 7. P. 105–112.
3. Kutz G. E. Predicting I/I Reduction for Planning Sewer Rehabilitation [Text]. *Trenchless Pipeline Projects: Practical Applications*. New York : ASCE, 1997. P. 103–110.
4. Lueke S. J., Ariaratnam T. S. Rehabilitation of underground infrastructure utilizing trenchless pipe replacement [Text]. *Practice Periodical on Structural Design and Construction, ASCE*. 2001. Vol. 6. No. 1. P. 25–34.
5. McKim A. R. Selection method for trenchless technologies [Text]. *Journal of Infrastructure Systems, ASCE*. 1997. Vol. 3. No. 3. P. 119–125.
6. Roh S.G., Choi H.R. Differential-drive in-pipe robot for moving inside urban gas pipelines [Text]. *IEEE Transactions on Robotics*. 2005. Vol. 21. No 1. P. 1–17.
7. Zwierzchowska A. Technologie bezwykopowej budowy sieci gazowych, wodociagowych i kanalizacyjnych [Text]. Kielce : Politechnika swietokrzyska, 2006. 180 p.
8. Поляруш К. А., Дорошенко Я. В., Тихонов С. І., Бабій А. Р. Сучасні технології безтраншейного ремонту теплогазових мереж. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2016. № 1(58). С. 41–51.
9. 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. 12–18.
10. Пат. 129088 Україна, МПК F16L 1/028. Пристрій для безтраншейної реконструкції трубопровідних комунікацій / Дорошенко Я.В., Поляруш К.А., Запхляк В.Б. (Україна). – № 201802905; Заявл. 22.03.2018; Опубл. 25.10.2018, Бюл. № 20. – 3 с.
11. Saeidbakhsh M., Rafeeyan M., Ziaei-Rad S. Dynamic analysis of small pigs in space pipelines [Text]. *Oil & Gas Science and Technology*. 2009. Vol. 64. No 2. P. 155–164.
12. Tolmasquim S., Nieckele A. Design and control of pig operations through pipelines [Text]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2008. Vol. 62. No 3. P. 102–110.

13. Грудз В. Я., Михалків В. Б., Розгонюк В. В., Рудко В. П. Керування режимом роботи газопроводу в період проведення профілактичних очищень [Текст]. *Нафт. і газ. пром-сть*. 1998. № 6. С. 37–38.

14. Грудз В. Я., Бакаєв В. В., Грудз Я. В., Розен Г. Математичне моделювання процесу руху інтелектуального поршня по газопроводу. *Нафт. і газ. пром-сть*. 2000. №1. С.46–47.

15. Грудз В. Я., Бакаєв В. В., Грудз Я. В., Розен Г. Регулювання руху інтелектуального поршня зміною технологічної схеми лінійної ділянки [Текст]. *Нафт. і газ. пром-сть*. 2001. №1. С.44–45.

16. Грудз Я. В. Розробка методів регулювання режиму роботи газопроводів в процесі їх діагностування інтелектуальними поршнями : дис. ... канд. техн. наук : спец. 05.15.13 "Нафтогазопроводи, бази та сховища". Івано-Франківськ, 2001. 126 с.

17. Squires K., Eaton J. Particle response and turbulence modification in isotropic turbulence. *Phys. Fluid*. 1990. Vol. 2. No 7. P. 1191.

References

1. David W. Rusch internal repair of pipeline leaks using pressure – activated sealant [Text]. *SPE. Report for Eastern Regional Meeting in Charleston*. West Virginia, USA., 15–17 September 2004.

2. In-pipe robot based on selective drive mechanism [Text] / S. Roh, D. Kim, J. Lee [and others]. *International Journal of Control, Automation and Systems*. Vol. 7. P. 105–112.

3. Kutz G. E. Predicting I/I Reduction for Planning Sewer Rehabilitation [Text]. *Trenchless Pipeline Projects: Practical Applications*. New York : ASCE, 1997. P. 103–110.

4. Lueke S. J., Ariaratnam T. S. Rehabilitation of underground infrastructure utilizing trenchless pipe replacement [Text]. *Practice Periodical on Structural Design and Construction, ASCE*. 2001. Vol. 6. No. 1. P. 25–34.

5. McKim A. R. Selection method for trenchless technologies [Text]. *Journal of Infrastructure Systems, ASCE*. 1997. Vol. 3. No. 3. P. 119–125.

6. Roh S.G., Choi H.R. Differential-drive in-pipe robot for moving inside urban gas pipelines [Text]. *IEEE Transactions on Robotics*. 2005. Vol. 21. No 1. P. 1–17.

7. Zwierzchowska A. Technologie bezwykopowej budowy sieci gazowych, wodociagowych i kanalizacyjnych [Text]. Kielce : Politechnika slawieckozyska, 2006. 180 p.

8. Poliarush K. A., Doroshenko Ya. V., Tykhonov S. I., Babii A. R. Suchasni tekhnolohii beztransheinoho remontu teplohazovykh merezh. *Rozvidka ta rozrobka naftovykh i hazovykh rodovyshch*. 2016. No 1(58). P. 41–51.

9. Doroshenko Ya.V., Poliarush K.A., Zapukhliak V.B. Rozroblennia tekhnolohii beztransheinoi rekonstruksii truboprovidnykh komunikatsii ochysnym porshnem. *Rozvidka ta rozrobka naftovykh i hazovykh rodovyshch*. 2018. No 3(68). P. 12–18.

10. Pat. 129088 Ukraina, MPK F16L 1/028. Prystirii dlia beztransheinoi rekonstruksii truboprovidnykh komunikatsii / Doroshenko Ya.V., Poliarush K.A., Zapukhliak V.B. (Ukraina). – No 201802905; Zaiavl. 22.03.2018; Opubl. 25.10.2018, Biul. № 20. – 3 p.

11. Saeidbakhsh M., Rafeeyan M., Ziaei-Rad S. Dynamic analysis of small pigs in space pipelines [Text]. *Oil & Gas Science and Technology*. 2009. Vol. 64. No 2. P. 155–164.

12. Tolmasquim S., Nieckele A. Design and control of pig operations through pipelines [Text]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2008. Vol. 62. No 3. P. 102–110.

13. Hrudz V. Ya., Mykhalkiv V. B., Rozghoniuk V. V., Rudko V. P. Keruvannia rezhymom roboty hazoprovodu v period provedennia profilaktychnykh ochyshchen [Tekst]. *Naft. i haz. prom-st*. 1998. No 6. P. 37–38.

14. Hrudz V. Ya., Bakaiev V. V., Hrudz Ya. V., Rozen H. Matematychnе modeliuвання protsesu rukhu intelektualnogo porshnia po hazoprovodu. *Naft. i haz. prom-st*. 2000. No 1. P. 46–47.

15. Hrudz V. Ya., Bakaiev V. V., Hrudz Ya. V., Rozen H. Rehuliuвання rukhu intelektualnogo porshnia zminoiu tekhnolohichnoi skhemy liniinoi dilianky [Tekst]. *Naft. i haz. prom-st*. 2001. No 1. P. 44–45.

16. Hrudz Ya. V. Rozrobka metodiv rehuliuвання rezhymu roboty hazoprovodiv v protsesi yikh diahnostuвання intelektualnymy porshniamy : dys. ... kand. tekhn. nauk : spets. 05.15.13 "Naftohazoprovody, bazy ta skhovyshcha". Ivano-Frankivsk, 2001. 126 p.

17. Squires K., Eaton J. Particle response and turbulence modification in isotropic turbulence. *Phys. Fluid*. 1990. Vol. 2. No 7. P. 1191.