

УДК: 622.691.4

ISSN 1729-4428

Я.В. Дорошенко, Г.М. Когут, І.В. Рибіцький, О.С. Тараєвський, Т.Ю. Пиріг
**Чисельне дослідження ерозійного зношування та міцності
відводів магістральних газопроводів**

*Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, Івано-Франківськ, Україна,
yaroslav.doroshenko@nung.edu.ua*

Виконано CFD моделювання руху одно-, багатофазного газового потоку відводом магістрального газопроводу, ерозійного зношування його стінки. Досліджено газодинамічні процеси, структуру однофазних потоків у внутрішній порожнині відводу. Лагранжевим підходом (модель Discrete Phase Model) виконано тривимірне моделювання руху багатофазних потоків у відводі. Визначено траєкторії руху рідких і твердих частинок відводом, розподіл швидкості та розмірів дисперсних фаз у його внутрішній порожнині, виявлено місця інтенсивного ударяння частинок до стінки, місця інтенсивного ерозійного зношування відводу. За результатами моделювання побудовано геометричні моделі відводів з складною тривимірною формою ерозійних дефектів стінки. В модулі Static Structural виконано комплексне моделювання напруженого стану відводів магістральних газопроводів з урахуванням газодинамічних процесів, які відбуваються у їхній внутрішній порожнині (нерівномірний розподіл тиску у внутрішній порожнині), ерозійного зношування стінки та температурного перепаду. Визначено зони потенційного ризику втрати міцності відводів із ерозійними дефектами. Визначено закономірності впливу величини ерозійних дефектів на напружений стан відводів.

Ключові слова: багатофазний потік, відвід, газопровід, газодинамічний процес, ерозійне зношування, напружений стан, температурний перепад, форма ерозійного дефекту.

Подано до редакції 18.07.2021; прийнято до друку 30.08.2021.

Вступ

Сучасні газотранспортні системи є складними розгалуженими мережами трубопроводів, які містять велику кількість фасонних елементів. Найпоширенішими фасонними елементами газопроводів є відводи. Найбільша кількість відводів міститься в об'язці компресорних станцій, підземних сховищ газу, газорозподільних станцій тощо. Відводи містять компенсатори надземних переходів газопроводів, також вони є в місцях поворотів траси трубопроводу в горизонтальній та вертикальній площинах.

У відводах газопроводів змінюється напрям руху потоку на кут 45°, 60°, 90°, що зумовлює нерівномірний розподіл тиску, швидкості потоку у їх внутрішній порожнині. Також у таких фасонних елементах дисперсні фази, які містяться в потоці

природного газу, ударяються в стінку, що зумовлює процеси ерозійного зношування і призводить до виникнення ерозійних дефектів. Ерозійні дефекти стінки відводів впливають на їх напружений стан і є небезпечними, оскільки вони є внутрішньотрубними і візуально непомітними та непередбачуваними.

Щоб забезпечити надійність відводів газопроводів треба періодично вимірювати їх товщину стінки, максимально точно оцінювати ступінь небезпеки ерозійно зношених відводів та прогнозувати їх залишковий ресурс. Все це покращить якість технічної діагностики газотранспортної системи та вплине на ефективність її роботи [1]. Для цього треба знати місця найінтенсивнішого ерозійного зношування відводів, дослідити напружений стан ерозійно зношених таких фасонних елементів трубопроводів з урахуванням надзвичайно складної тривимірної геометричної форми ерозійних дефектів

та газодинамічних процесів, які відбуваються у їх внутрішній порожнині. Вирішення даної проблеми дасть змогу оцінити міцність та визначити залишковий ресурс ерозійно зношених відводів газопроводів, попередити аварійні ситуації та визначити періодичність регламентних робіт з обстеження відводів газопроводів у місцях їх ерозійного зношування.

Дослідження динаміки руху однофазних, багатофазних потоків у відводах трубопровідних систем розпочались із початку 1960-х років. Такі дослідження, в основному, виконувались експериментально в лабораторних умовах. Їх результатами були структура потоку, яка визначалась шляхом його візуалізування в прозорих відводах [2-4]. Однак фізична картина потоку в відводах трубопроводів є складною, тривимірною, залежить від багатьох чинників і її надзвичайно важко, а в багатьох аспектах неможливо дослідити експериментально, розрахувати теоретично. Крім того експериментальні дослідження мають багато недоліків. У реальних умовах роботи трубопроводів, особливо магістральних газопроводів такі експерименти виконати взагалі неможливо через цілий ряд різноманітних причин. Тому залишається багато невіршених питань стосовно газодинамічних процесів, втрат енергії потоку в відводах газопроводів. Особливо це стосується багатофазних потоків, оскільки в газопровідних потоках наявні різноманітні за фізико-механічними властивостями рідкі і тверді дисперсні фази. Рідкими дисперсними фазами можуть бути вуглеводневий конденсат, вода, а твердими – винесені з свердловини частинки порід, окалина, яка відшарувалась від труб, продукти внутрішньотрубної корозії [5-9]. Все це призводить до того, що передбачення ерозійного зношування відводів трубопровідних систем є надзвичайно непростюю і на сьогодні мало вивченою задачею. До того ж на місцезнаходження та швидкість ерозійного зношування відводів газопроводів впливає широкий спектр різноманітних параметрів.

Так як і корозійне зношування [10-12] ерозійне зношування є одним із чинників, які впливають на напружено-деформований стан відводів, зменшують їх залишковий ресурс [13]. Також на напружено-деформований стан відводів трубопроводів чинить вплив складний нерівномірний розподіл тиску в їх внутрішній порожнині, зміна тиску в трубопроводі [14-17], згин труби [18]. Всі ці обставини накладаються одна на одну і на складну геометричну форму відводів. З цієї причини відводи містять зони з підвищеним рівнем напружено-деформованого стану, що суттєво впливає на їх міцність. Тому для оцінювання міцності відводів газопровідних систем потрібна синергія газодинамічних процесів у їх внутрішній порожнині, процесів ерозійного зношування і напружено-деформованого стану у тривимірній постановці, тобто потрібно виконати мультидисциплінарне моделювання. Аналітичні, чисельні, експериментальні дослідження в літературних джерелах стосуються окремих процесів, які відбуваються у відводах – гідрогазодинамічних чи ерозійного зношування або напружено-

деформованого стану. Спроб зробити синергію цих процесів, поєднати їх у єдину цілісну фізичну картину на сьогодні не зроблено. В багатьох випадках немає достатньо виразних фізичних уявлень про закономірності процесів, які відбуваються в відводах газопровідних систем, їх вплив на стінку й основні рівняння, які б описали ці процеси, отримати доволі часто неможливо.

Оскільки аналітичне рішення отримати неможливо, то для встановлення кількісних зв'язків можна застосувати чисельне моделювання в сучасних програмних комплексах, яке є ефективним інструментом для вирішення таких задач, як у комплексі (мультидисциплінарне моделювання), так і частково. Візуалізовані результати такого моделювання дають змогу в деталях побачити складний тривимірний однофазний чи багатофазний потік всередині різноманітних фасонних елементів газопровідних систем [19-22] і вивчати розподіл тиску, швидкості потоку, кінетичної енергії турбулентності, визначити траєкторії руху дисперсних фаз у суцільній фазі, місця і швидкість ерозійного зношування стінки тощо. Результати чисельного моделювання дають можливість побудувати тривимірні моделі фасонних елементів газопроводів з ерозійними дефектами складної геометричної форми, які будуть через певні проміжки часу експлуатації трубопроводу. Також результати газодинамічного моделювання, тривимірні моделі фасонних елементів з ерозійними дефектами складної геометричної форми можна імпортувати в міцнісні модулі і виконувати синергію досліджуваних процесів (мультидисциплінарне моделювання), що дає змогу комплексно досліджувати напружено-деформований стан дефектних фасонних елементів газопроводів, що у [23] виконано для трійників магістральних газопроводів.

На сьогодні в літературних джерелах чисельних досліджень динаміки руху однофазних, багатофазних потоків у фасонних елементах трубопровідних систем, їх ерозійного зношування, напруженого стану мало і, в основному, вони стосуються водопроводів та пневмопроводів малих діаметрів. Геометрична форма дефектів в усіх аналітичних, чисельних дослідженнях напруженого стану дефектних фасонних елементів [24-25] надзвичайно спрощена (ідеалізована до сферичної чи прямокутної) і не відповідає реальній геометричній формі таких дефектів.

Ремонт ерозійно зношених відводів трубопроводу ускладнений через складну їх геометричну форму. Ефективними технологіями ремонту таких відводів є безтраншейні технології, які полягають у протягуванні поршнем рукава чи гнучкої композитної труби. Закономірності технологічного процесу протягування поршнем рукава та труб в зношені сталеві трубопроводи досліджено в [26, 27].

І. Чисельна модель

Щоб вирішити задачу дослідження міцності відводів магістральних газопроводів було вибрано програмний комплекс скінчено-елементного аналізу

ANSYS Academic. Процедура чисельного моделювання розглядуваної задачі складається з таких етапів:

- моделювання тривимірної геометрії стінок відводу та внутрішньої його порожнини;
- CFD моделювання газодинамічних процесів у внутрішній порожнині відводу в модулі ANSYS Fluent;
- імпортування тривимірної геометрії стінки відводу та отриманих результатів CFD моделювання з модуля ANSYS Fluent в механічний модуль ANSYS Static Structural програмного комплексу;
- моделювання температурного перепаду в стінці відводу в модулі Transient Thermal;
- імпортування отриманих результатів моделювання температурного перепаду в стінці відводу з модуля Transient Thermal в механічний модуль ANSYS Static Structural;
- моделювання напруженого стану відводу в механічному модулі ANSYS Static Structural.

Задана в середовищі розрахунків ANSYS Workbench розрахункова схема для чисельного моделювання розглядуваної задачі наведена на рис. 1.

CFD моделювання руху потоку суцільної фази відводом газопроводу в ANSYS Fluent виконувалось чисельним розв'язування рівнянь Нав'є – Стокса і

його стінки, швидкість, концентрацію, діаметри частинок, кути атаки в місці, де відбувається ударяння. Для таких досліджень в ANSYS Fluent було вибрано Лагранжевий підхід (DPM (Discrete Phase Model)). Лагранжева модель DPM дає змогу визначити і дослідити траєкторії руху частинок дисперсної фази в потоці суцільної фази розв'язанням диференційного рівняння руху частинок [29]. Для моделювання ерозійного зношування відводу газопроводу була вибрана модель Фінні [30], яка застосовується для пластичних матеріалів, якими є трубопровідні сталі. Напружений стан відводів газопроводів у модулі ANSYS Static Structural моделювався методом скінчених елементів. Найосновніші ідеї методу скінчених елементів закладені в [31].

II. Геометричне моделювання

Було накреслено тривимірні геометричні моделі відводу газопроводу із кутом вигину 90° (рис. 2), які широко розповсюджені в газовій промисловості. Зовнішній діаметр відводу $D_{з,відв} = 1420$ мм, а номінальна товщина стінки $\delta_{н,відв} = 24$ мм. Відвід був змодельований з прилеглими ділянками труб довжиною 1 м, зовнішнім діаметром $D_3 = 1420$ мм та

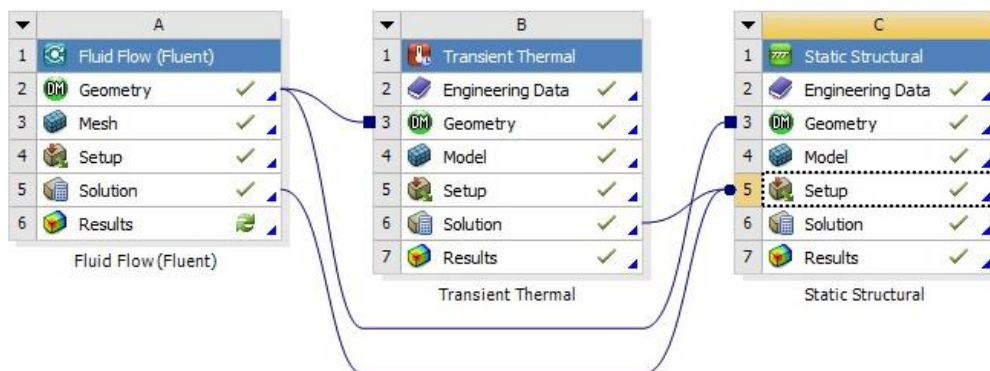


Рис. 1. Розрахункова схема задана в ANSYS Workbench.

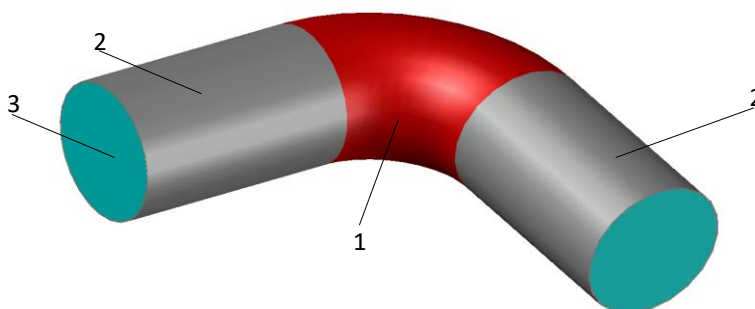


Рис. 2. Геометрична модель відводу з прилеглими ділянками труби: 1 – відвід 90° 1420×24; 2 – труба 1420×18,7; 3 – геометрична модель внутрішньої порожнини відводу і прилеглої труби.

неперервності потоку, які замикались двопараметричною моделлю турбулентності [28].

Щоб в повному обсязі дослідити процеси ерозійного зношування відводів магістрального газопроводу треба визначити місця найінтенсивнішого ударяння дисперсних частинок до

номінальною товщиною стінки $\delta_n = 18,7$ мм. Щоб дослідити міцність відводу з урахуванням усіх навантажень, які діють на нього треба розв'язати задачу динаміки руху газового потоку відводом і напружень у його стінці в комплексі. Тому було накреслено дві окремі об'ємні геометричні моделі.

Геометричну модель внутрішньої порожнини відводу, якою рухається газовий потік, та геометричну модель стінки відводу.

III. Моделювання газодинамічних процесів

CFD моделювання газодинамічних процесів у внутрішній порожнині відводів газопроводів було виконано у модулі ANSYS Fluent. Для цього у препроцесорі Fluent - Meshing генерувалась тетраїдна об'ємна розрахункова сітка. Щоб максимально якісно описати пристінні процеси створювався пристінний шар граток. Як транспортване середовище з бази даних матеріалів ANSYS Fluent було вибрано природний газ. Як дисперсні фази задавались конденсат та пісок, які найчастіше зустрічаються в транспортваному газопроводами природному газі. Характеристики дисперсних фаз та граничні умови, які задавались в препроцесорі ANSYS Fluent наведені в табл. 1.

У постпроцесорах ANSYS Fluent, ANSYS CFD було візуалізовано результати моделювання газодинамічних процесів у відводі. Отримані результати дали змогу побачити структуру потоку газу в відводі, траєкторії руху крапель конденсату і частинок піску відводом, визначити місця

4, в, г) відповідно до шкали значень, поля концентрації дисперсної фази (рис. 5, а) та поля швидкості ерозійного зношування (рис. 5, б, в) на контурах відводу.

Тиск у внутрішній порожнині відводу розподілений не рівномірно (рис. 3). У відводі відбувається збільшення тиску в напрямі від вгнутого до опуклого боку. Біля увігнутого боку відводу тиск знижується до 4923890 Па, а біля опуклого боку підвищується до 4931980 Па. Такий нерівномірний розподіл тиску чинить вплив на напружений стан відводу.

Дослідивши траєкторії руху крапель конденсату і твердих частинок виявлено, що у відводі з опуклого його боку більша частина дисперсних фаз (до 40 %) рухаються траєкторіями, які наближаються до стінки в місці повороту, але ударяння частинок до стінки не відбувається. Менша частина дисперсних фаз в місці повороту відводу рухається траєкторіями, радіус яких більший за радіус відводу, в результаті чого відбувається ударяння крапель конденсату і твердих частинок до стінки відводу та привареної до нього з правого боку труби (рис. 4, а). Найінтенсивніше ударяння дисперсних фаз до стінки відбувається в місці закінчення відводу з опуклого його боку і на початку привареної до відводу труби. Із віддаленням від повороту відводу кут атаки зменшується. В кінці відводу кут атаки біля 40°, а вздовж привареної до

Таблиця 1

Параметри CFD моделювання багатофазного потоку у досліджуваному відводі

Речовина	Природний газ	Конденсат	Пісок
Масова витрата на вході, кг/с	697,9	0,25	0,0019
Тиск на виході, МПа	4,93	-	-
Густина, кг/м ³	-	960	2800
Температура, К	297	297	297
Інтенсивність турбулентності, %	5	-	-
Максимальний діаметр частинок, мм	-	0,34	0,12
Мінімальний діаметр частинок, мкм	-	3	0,1

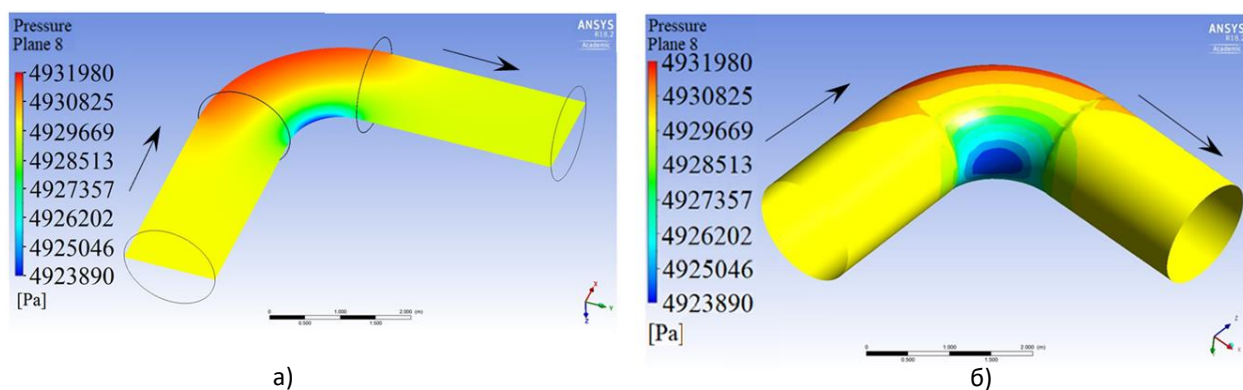


Рис. 3. Поля розподілу тиску у відводі: а) – в площині горизонтального повздовжнього перерізу; б) – на контурах.

найінтенсивніших ерозійних процесів у відводах. Візуалізування виконувалось побудовою полів тиску в площині горизонтального повздовжнього перерізу відводу (рис. 3, а) та на контурах (рис. 3, б), траєкторій руху крапель конденсату і твердих частинок в потоці суцільної фази, які забарвлювались в кольори, що відповідають їх швидкості (рис. 4, б) та діаметру (рис.

відводу труби кут атаки зменшується. Швидкість дисперсних фаз в місці ударяння, де закінчується відвід, складає біля 8,5 м/с, а на початку привареної до відводу труби вона досягає 13 м/с (рис. 4, б).

Зміна напрямку газового потоку у відводі призводить до перебудови профілю швидкостей суцільної і дисперсної фази в поздовжніх і в поперечних перерізах (рис. 4, б). Вздовж вгнутого боку відбувається пришвидшення дисперсної фази до 25,8 м/с, а вздовж опуклого – уповільнення до 7 м/с. На виході з відводу вздовж його опуклого боку дисперсна фаза пришвидшується до 13 м/с, а вздовж вгнутого боку уповільнюється до 6 м/с. Дисперсна фаза у відводі перерозподіляється нерівномірно за діаметром (рис. 4, в, г). Більша частина дисперсних

вгнутого боку відводу.

IV. Моделювання ерозійного зношування

Із полів концентрації дисперсної фази на контурах відводу видно, що інтенсивне ударяння рідких і твердих частинок до стінки відбувається з опуклого його боку (рис. 5, а). Місце ударяння простягається вздовж відводу і прилегло до нього труби починаючи

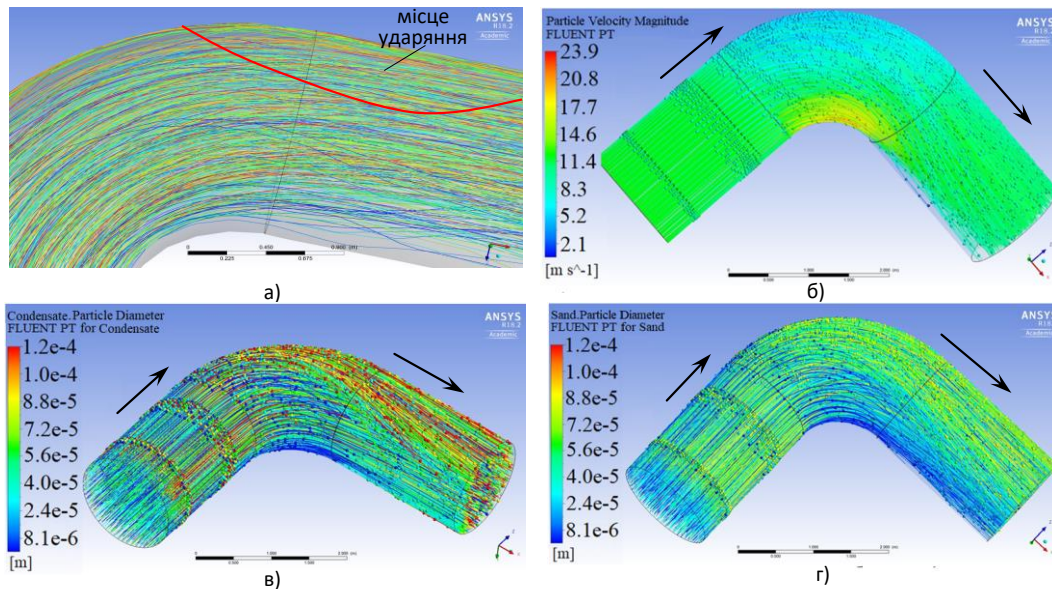


Рис. 4. Результати моделювання руху дисперсних фаз у потоці газу відводом: а) – траєкторії руху дисперсної фази; б) – траєкторії руху дисперсної фаз забарвлені в кольори, що відповідають їх швидкості; в) – траєкторії руху крапель конденсату забарвлені в кольори, що відповідають їх діаметру; г) – траєкторії руху твердих частинок забарвлені в кольори, що відповідають діаметру частинок.

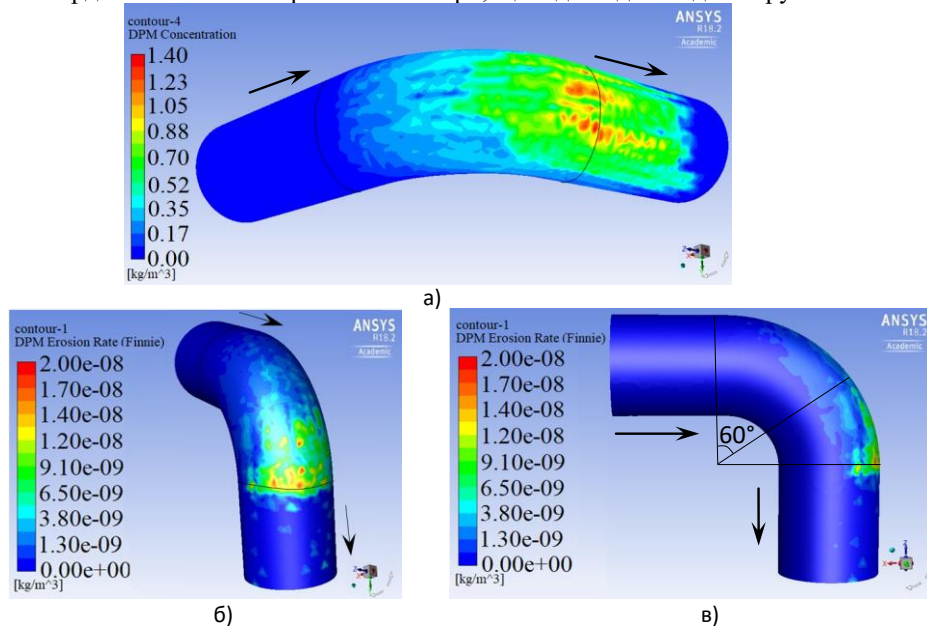


Рис. 5. Результати моделювання ерозійного зношування відводу: а) – поле концентрації дисперсних фаз на контурах; б, в) – поле швидкості ерозійного зношування на контурах.

фаз, які мають більші діаметри, рухаються з опуклого боку відводу і частина з них ударяється в стінку відводу і стінку привареної до відводу труби. Дисперсні фази меншого діаметра рухаються з

від середньої частини відводу і на довжину 1,5 м від кільцевого зварного шва в сторону руху продукту прилеглою до відводу трубою. Найінтенсивніше ударяння дисперсної фази до стінки відбувається з

опуклого боку відводу в місці виходу з нього газового потоку та на початку прилеглої до нього прямолінійної ділянки труби (максимальна концентрація дисперсних фаз на контурах 1,4 кг/с).

Із полів швидкості ерозійного зношування на контурах відводу видно, що найінтенсивніше ерозійне зношування відбувається з опуклого його боку між кутом 60° і 90° в місці виходу з нього газового потоку та на початку привареної до відводу труби на довжину 0,1 м в напрямку руху газового потоку (рис. 5, б, в). Максимальна швидкість ерозійного зношування відводу рівна $2,0 \cdot 10^{-8}$ кг/м²·с. За такої швидкості відбувається стоншення стінки відводу з швидкістю 0,08 мм/рік. Швидкість ерозійного зношування різко зменшується на початку привареної до відводу труби (рис. 5, б, в), хоча інтенсивне ударяння рідких і твердих частинок до стінки привареної до відводу труби відбувається ще на довжину 1,5 м від кільцевого зварного шва (рис. 5, а) в напрямку руху продукту. Причиною цього є зменшення кута атаки в міру віддалення місця ударяння дисперсних фаз до стінки привареної до відводу труби від кільцевого зварного шва.

Процес ерозійного зношування відводів відбувається з певною швидкістю і глибина та форма ерозійних дефектів весь час змінюється. Відбувається постійне збільшення величини ерозійних дефектів. Для того щоб урахувати вплив складної тривимірної форми внутрішньої поверхні стінки відводу в місці ерозійного зношування та збільшення величини ерозійних дефектів на напружений стан відводу треба побудувати геометричні моделі відводів з ерозійними дефектами стінки, які будуть через певні проміжки часу. Стінку труби відводу в місці ерозійного зношування треба “переміщувати” відповідно до швидкості ерозійного зношування. Щоб таке виконати з поля швидкості ерозійного зношування на контурах відводу (рис. 5, б) було визначено значення швидкості ерозійного зношування відводу в багатьох його точках за якими розраховано швидкість стоншення стінки в цих точках. За швидкістю стоншення стінки відводу визначено величини стоншення стінки відводу в багатьох точках відводу через 30, 42, 46 та 52 роки експлуатації газопроводу і було побудовано геометричні моделі відводів з складною тривимірною геометричною формою ерозійних дефектів стінки (рис. 6), які будуть через

11,9 мм.

V. Моделювання температурного перепаду

Температурні впливи зумовлюють в стінках труб, фасонних елементів газопроводів повздовжні зусилля, які призводять до виникнення повздовжніх температурних напружень. Величина температурних напружень залежить від значення температурного перепаду. Температурним перепадом є різниця між максимальною або мінімальною можливою температурою стінок трубопроводу під час експлуатації і найменшою або найбільшою температурою стінок труби, при якій фіксується розрахункова схема трубопроводу. Для підземних трубопроводів температурний перепад приймається рівним $\pm 40^\circ\text{C}$.

Температурний перепад у стінці відводу моделювався в модулі розрахунку теплових процесів Transient Thermal. Щоб це виконати задавались характеристики трубної сталі, температура стінки відводу в початковий момент часу ($+20^\circ\text{C}$) і температура стінки відводу в кінцевий момент часу (-20°C).

VI. Моделювання напруженого стану

Моделювання напруженого стану відводів магістрального газопроводу було виконано в механічному модулі ANSYS Static Structural. Для цього тривимірна геометрія стінки відводу з і без ерозійних дефектів імпортувалась в цей модуль. У базі даних матеріалів було задано трубну сталь класу міцності K60 (гранича міцності $\sigma_{міц} = 589$ МПа, границя плинності $\sigma_n = 441$ МПа).

Щоб врахувати вплив нерівномірного розподілу тиску у внутрішній порожнині відводу (рис. 3) на його напружений стан результати газодинамічного моделювання з модуля ANSYS Fluent було імпортовано в механічний модуль ANSYS Static Structural. Імпортувався розподіл тиску на внутрішній стінці відводу (рис. 7). Щоб врахувати вплив температурного перепаду на напружений стан відводу результати моделювання температурного перепаду з

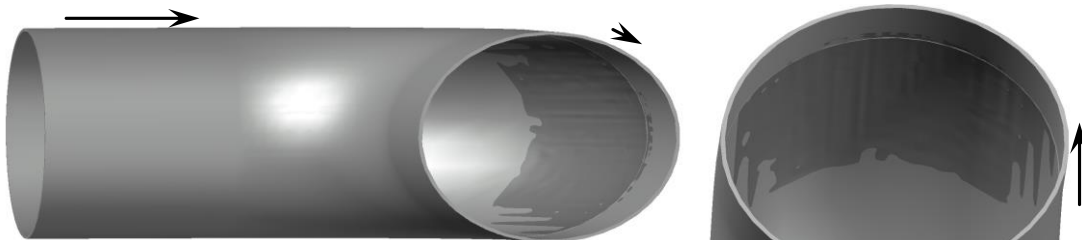


Рис. 6. Геометрична модель відводу з ерозійним дефектом.

певні проміжки часу. Максимальна глибина ерозійних дефектів стінки відводів через 30 років експлуатації складала 6,9 мм, 42 роки – 9,6 мм, 46 років – 10,5 мм та 52 роки –

модуля Transient Thermal було імпортовано у механічний модуль ANSYS Static Structural.

Результати чисельного моделювання напруженого стану відводу без ерозійних дефектів було візуалізовано побудовою розподілу еквівалентних напружень за Мізесом у стінках відводу від дії тільки внутрішнього тиску (рис. 8, а) та від дії внутрішнього тиску та температурного перепаду (рис. 8, б). У стінці відводу еквівалентні напруження розподілені нерівномірно. Максимальні їх значення спостерігаються з вгнутого боку відводу (найбільше значення складає 197,7 МПа у разі дії тільки внутрішнього тиску і 250 МПа у разі дії внутрішнього тиску та температурного перепаду), мінімальні – з опуклого (найменше значення складає 95,5 МПа у разі дії тільки внутрішнього тиску і 44,9 МПа у разі дії внутрішнього тиску та температурного перепаду). Мінімальний запас

ділянок трубопроводу. Найбільше значення еквівалентних напружень Мізеса з вгнутого боку відводу рівне 197,7 МПа у разі дії тільки внутрішнього тиску і 250 МПа у разі дії внутрішнього тиску та температурного перепаду.

Моделювання напруженого стану відводу з ерозійними дефектами стінки було виконано аналогічно моделюванню напруженого стану відводу без дефектів. Для такого моделювання спочатку геометричні моделі відводів з складною тривимірною геометричною формою ерозійних дефектів стінки (рис. 6) було імпортовано в гідрогазодинамічний модуль ANSYS Fluent для моделювання газодинамічних процесів та в модуль розрахунку теплових процесів Transient Thermal щоб виконати моделювання температурного перепаду в стінках

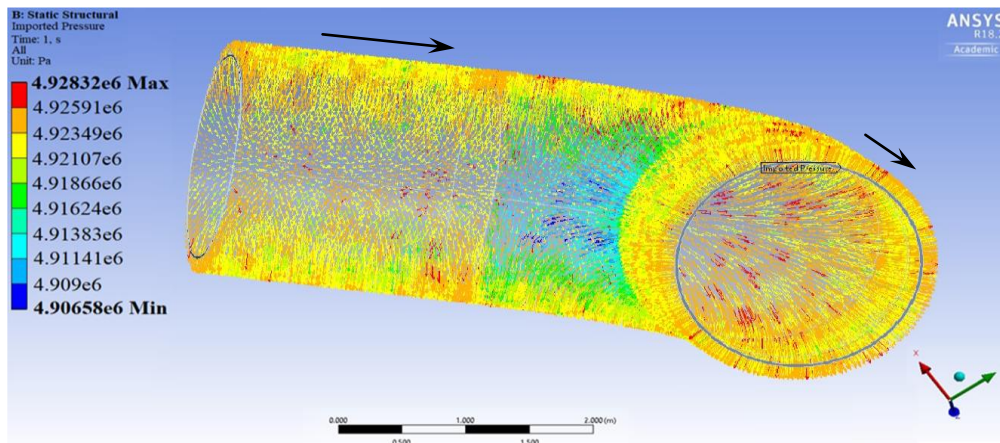


Рис. 7. Результати розрахунку розподілу тиску на внутрішній стінці відводу імпортовані з ANSYS Fluent в ANSYS Static Structural.

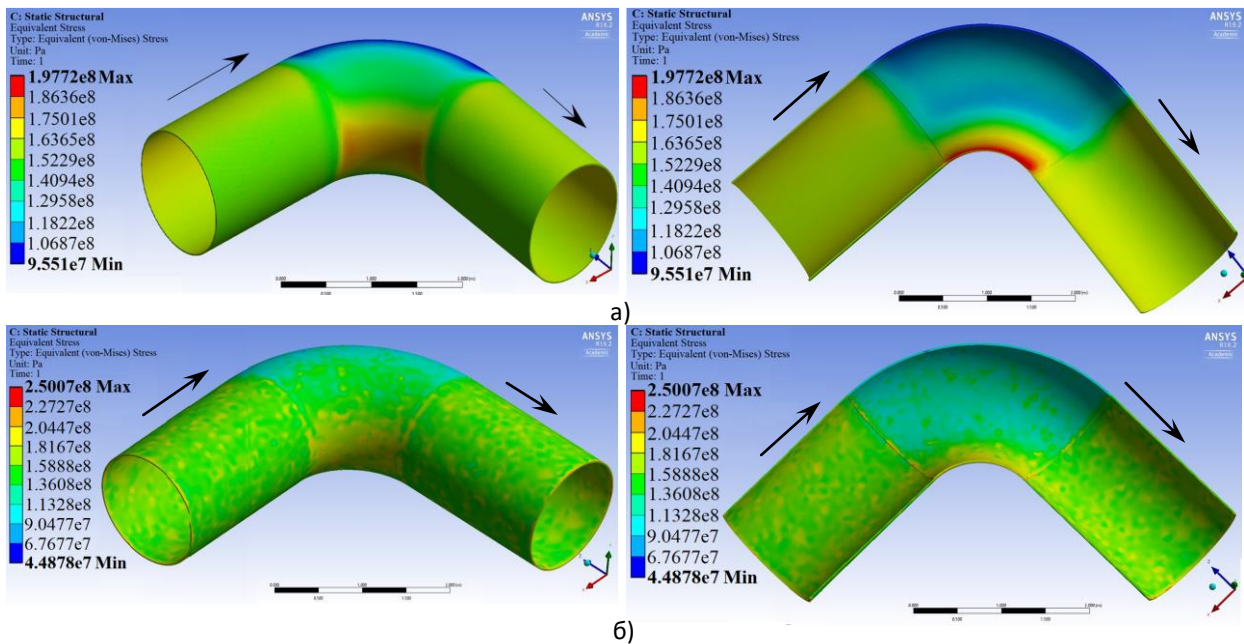


Рис. 8. Розподіл еквівалентних напружень Мізеса у стінці відводу: а) – від дії внутрішнього тиску; б) – від дії внутрішнього тиску та температурного перепаду.

міцності відводів спостерігається з вгнутого боку. При цьому еквівалентні напруження в стінці відводу з вгнутого його боку більші ніж в прямолінійних

відводу. Тоді результати таких моделювань та геометричні моделі ерозійно зношених відводів було імпортовано в механічний модуль ANSYS Static

Structural для моделювання напруженого стану.

Результати моделювання напруженого стану відводів з ерозійними дефектами стінки було візуалізовано побудовою кольорових полів еквівалентних напружень за Мізесом в стінці відводів від дії тільки внутрішнього тиску (рис. 9, а, б, г, е, ж)

Якщо максимальна глибина ерозійного дефекту стінки відводу складала 6,9 мм то максимальні еквівалентні напруження зосереджені з вгнутого боку відводу та у найглибших місцях ерозійного дефекту (рис. 9, а, б, в). Якщо ж максимальна глибина ерозійних дефектів стінки відводу складає 9,6 мм, 10,5

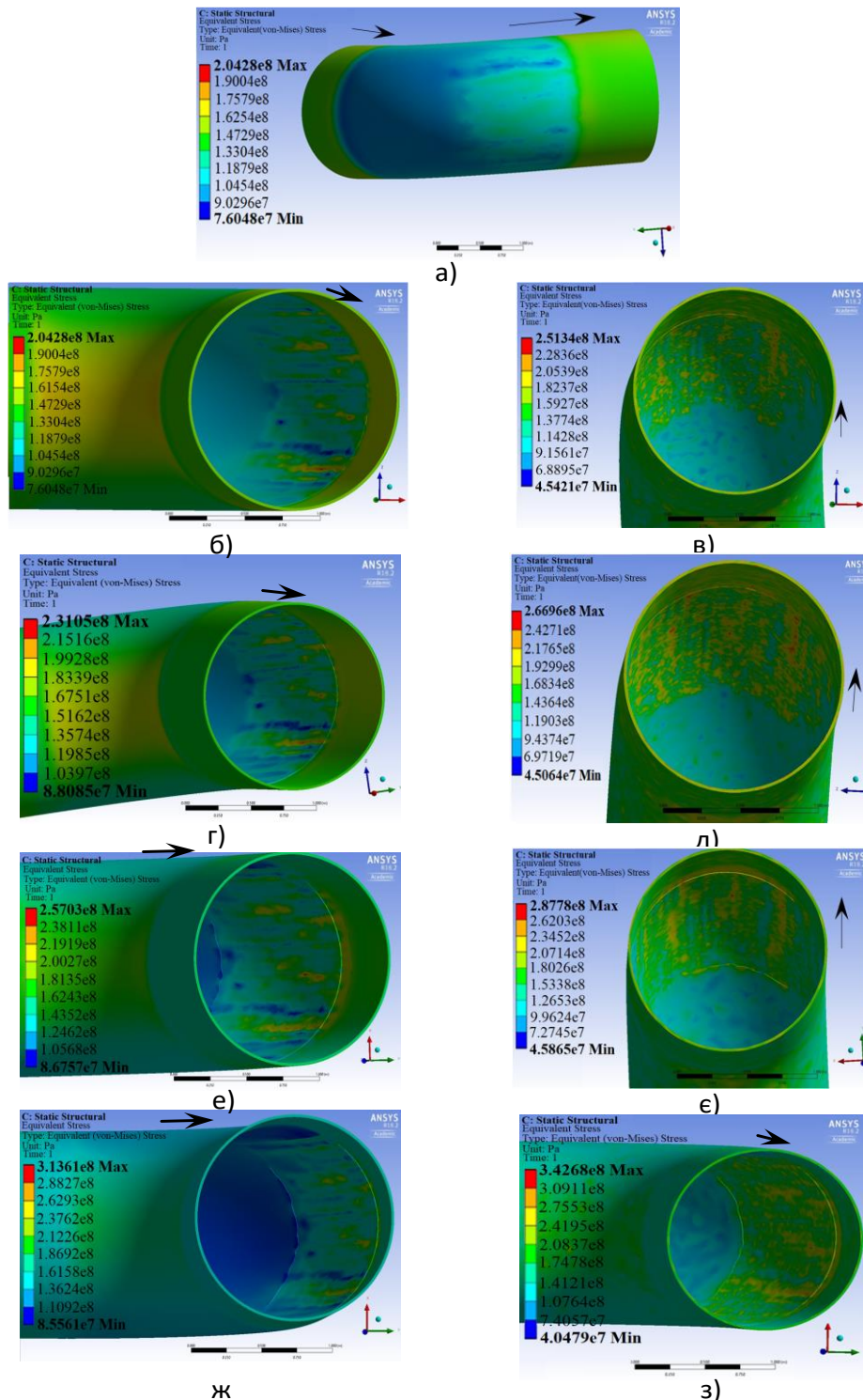


Рис. 9. Розподіл еквівалентних напружень Мізеса у відводі з ерозійним зношенням стінки: а), б), в) – максимальна глибина ерозійного дефекту стінки 6,9 мм; г), д) – максимальна глибина ерозійного дефекту стінки 9,6 мм; е), є) – максимальна глибина ерозійного дефекту стінки 10,5 мм; ж), з) – максимальна глибина ерозійного дефекту стінки 11,9 мм.

та від дії внутрішнього тиску і температурного перепаду (рис. 9, в, д, е, з) для різної величини ерозійних дефектів.

мм і 11,9 мм то максимальні еквівалентні напруження зосереджені у найглибших місцях ерозійного дефекту (рис. 9, г, д, е, є, ж, з). Величини максимальних

Таблиця 2

№	Максимальна глибина ерозійного дефекту стінки відводу, мм	Максимальні еквівалентні напруження, МПа	
		від дії внутрішнього тиску	від дії внутрішнього тиску та температурного перепаду
1	6,9	204,3	240,9
2	9,6	231,1	267,0
3	10,5	257,0	287,8
4	11,9	313,6	342,7

еквівалентних напружень у відводі з ерозійними дефектами стінки від дії тільки внутрішнього тиску та від дії внутрішнього тиску і температурного перепаду наведені в табл. 2.

Висновок

У відводах магістральних газопроводів зміна напрямку руху потоку призводить до виникнення поперечного градієнту тиску, ударяння дисперсної фази в стінку, що зумовлює ерозійне зношування. У відводах з кутом вигину 90° в стінку ударяється біля 40 % частинок дисперсної фази при цьому концентрація частинок більшого діаметра в місці ударяння є значно більшою, ніж меншого. Найінтенсивніше ударяння частинок відбувається в місці закінчення відводу з опуклого його боку і на початку привареної до відводу труби. Тому максимальне ерозійне зношування відводів відбувається з опуклого їх боку в місці виходу газового потоку між кутом 60° і 90° відводу та на початку привареної до нього труби за напрямком руху потоку.

Чисельним моделюванням розв'язана задача синергетичного впливу газодинамічних процесів (нерівномірного розподілу тиску у внутрішній порожнині), температурного перепаду і ерозійного зношування на напружений стан відводів магістральних газопроводів. Одержані результати моделювання процесів ерозійного зношування

відводів дали змогу розробити алгоритм моделювання тривимірних ерозійних дефектів їх стінки. Складна тривимірна геометрична форма ерозійних дефектів стінки відводів змінювалась відповідно до швидкості їх ерозійного зношування. Такий алгоритм дав змогу визначити закономірності впливу величини ерозійних дефектів відводів на їх напружений стан. Встановлено, що при максимальній глибині ерозійних дефектів стінки відводів 9,6 мм, 10,5 мм і 11,9 мм еквівалентні напруження у найглибших місцях ерозійного дефекту більші ніж з увігнутого боку відводу та в прямолінійних ділянках газопроводу і можуть призвести до втрати міцності.

Одержані результати дають можливість своєчасно визначати місцезнаходження ерозійних дефектів стінки відводів газопроводів, оцінити їх працездатність та виконати ранжування таких дефектних відводів за ступенем небезпеки, визначити які з них є в критичному стані і потребують негайного ремонту.

Дорошенко Я.В. – д.т.н., доцент, професор кафедри газонафтопроводів та газонафтоосховищ;

Когут Г.М. – доктор філософії, асистент кафедри енергетичного менеджменту та технічної діагностики;

Рибіцький І.В. – д.т.н., доцент, доцент кафедри енергетичного менеджменту та технічної діагностики;

Тараєвський О.С. – д.т.н., доцент, професор кафедри газонафтопроводів та газонафтоосховищ;

Пиріг Т.Ю. – к.т.н., доцент, доцент кафедри газонафтопроводів та газонафтоосховищ.

- [1] M.O. Karpash, A.P. Oliynyk, G.M. Kogut, A.M. Klyun, Science and Innovation 15(6), 73 (2019); <https://doi.org/10.15407/scin15.06.079>.
- [2] N. Aung, T. Yuwono, ASEAN Journal on Science and Technology for Development 30(1&2), 1 (2013); <https://doi.org/10.29037/ajstd.344>.
- [3] M. Toda, N. Kamori, S. Saito, S. Maeda, J. Chem. Eng. Jpn. 5, 4 (1972).
- [4] R. Wood, T. Jones, N. Miles, J. Ganeshalingam, Wear 250, 770 (2001); [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(01\)00715-3](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(01)00715-3).
- [5] J. Smart, Pipeline and Gas Journal 10, 82 (2007).
- [6] Ya. V. Doroshenko, O. M. Karpash, B. N. Hozhaiev, Rozvidka ta rozrobka naftovykh i hazovykh rodovysheh 4(73), 35 (2019); [https://doi.org/10.31471/1993-9973-2019-4\(73\)-35-45](https://doi.org/10.31471/1993-9973-2019-4(73)-35-45).
- [7] V.B. Volovetskyi, A.V. Uhrynovskyi, Ya.V. Doroshenko, O.M. Shchyrba, Yu.S. Stakhmych, Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering 101(1), 27 (2020); <https://doi.org/10.5604/01.3001.0014.4088>.
- [8] V.B. Volovetskyi, Ya.V. Doroshenko, G.M. Kogut, I.V. Rybitskyi, J.I. Doroshenko, O.M. Shchyrba, Archives of Materials Science and Engineering 108(1), 24 (2021); <https://doi.org/10.5604/01.3001.0015.0250>.
- [9] V.B. Volovetskyi, Ya.V. Doroshenko, O.S. Tarayevs'kyi, O.M. Shchyrba, J.I. Doroshenko, Yu.S. Stakhmych, Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering 105(2), 61 (2021); <https://doi.org/10.5604/01.3001.0015.0518>.
- [10] O. Tarayevs'kyi, Metallurgical and Mining Industry 3, 61 (2013).

- [11] O. Tarayevskyy, Metallurgical and Mining Industry 3, 68 (2013).
- [12] O. Tarayevskyy, Metallurgical and Mining Industry 7(2), 62 (2015).
- [13] L.S. Shlapak, M.P. Linchevskiy, V.O. Sarkisov, Naftohazova haluz Ukrainy 3, 44 (2014).
- [14] M.D. Serediuk, Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering 106(2), 77 (2021).
- [15] M.D. Serediuk, S.Ya. Hryhorskyi, Neftianoe khoziaistvo 2, 100 (2015).
- [16] M. Serediuk, S. Grygorsky, European Journal of Enterprise Technologies 5/2(83), 30 (2016); <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.77190>.
- [17] I.V. Rybitskyi, V.I. Trofimchuk, G.M. Kogut, Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu 3, 47 (2020); <https://doi.org/10.33271/nvngu/2020-3/047>.
- [18] Y. Melnychenko, L. Poberezhny, V. Hrudz, V. Zapukhliak, I. Chudyk, T. Dodyk, Lecture Notes in Civil Engineering 102, 241 (2021); https://doi.org/10.1007/978-3-030-58073-5_19.
- [19] P. Dutta, S. Saha, N. Nandi, International Journal of Applied Engineering Research 10(11), 128 (2015).
- [20] Ya. Doroshenko, I. Rybitskyi, Eastern-European Journal of Enterprise Technologies 1/8(103), 28 (2020); <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.192828>.
- [21] M. Abdulwahhab, N. Kumar, F. Dakhil, International Journal of Engineering Science and Technology 4(7), 33 (2012).
- [22] J. Zhang, J. Kang, J. Fan, J. Gao, Journal of Natural Gas Science and Engineering 32, 334 (2016); <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2016.04.056>.
- [23] Ya. Doroshenko, V. Zapukhliak, Ya. Grudz, L. Poberezhny, A. Hrytsanchuk, P. Popovych, O. Shevchuk, Archives of Materials Science and Engineering 101(2), 63 (2020); <https://doi.org/10.5604/01.3001.0014.1192>.
- [24] S. Marie, S. Chapuliot, Y. Kayser, M. Lacire, B. Drubay, B. Barthelet, P. Delliou, V. Rougier, C. Naudin, P. Gilles, M. Triay, International Journal of Pressure Vessels and Piping 84(10-11), 659 (2007); <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2007.05.006>.
- [25] O.O. Larin, K.E. Potopalska, Праці Одеського політехнічного університету 3(53), 12 (2017); <https://doi.org/10.15276/opu.3.53.2017.02>.
- [26] Ya.V. Doroshenko, Naftohazova enerhetyka 1(33), 36 (2020); [https://doi.org/10.31471/1993-9868-2020-1\(33\)-36-46](https://doi.org/10.31471/1993-9868-2020-1(33)-36-46).
- [27] Ya. Doroshenko, V. Zapukhliak, K. Poliarush, R. Stasiuk, S. Bagriy, Eastern-European Journal of Enterprise Technologies 2/1(98), 28 (2019); <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.164351>.
- [28] K. Squires, J. Eaton, Phys. Fluid 2(7), 1191 (1990); <https://doi.org/10.1063/1.857620>.
- [29] J.O. Hinze, Turbulence (McGraw-Hill, New York, 1975).
- [30] I. Finnie, Y. Kabil, Wear 8, 60 (1965); [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(65\)90251-6](https://doi.org/10.1016/0043-1648(65)90251-6).
- [31] R.H. Gallagher, Finite element analysis: Fundamentals (Prentice-Hall, New York, 1975).

Ya.V. Doroshenko, G.M. Kogut, I.V. Rybitskyi, O.S. Tarayevskyy, T.Yu. Pyrig

Numerical Investigation on Erosion Wear and Strength of Main Gas Pipelines Bends

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk, Ukraine, yaroslav.doroshenko@nung.edu.ua

The purpose of this work is to ensuring the strength of main gas pipelines bends by studying the peculiarities of single-phase and multiphase flows movement through the internal cavity, the processes of erosion wear and the wall stress state. The problem of synergistic influence of gas-dynamic processes (uneven pressure distribution in the internal cavity), temperature difference and erosion wear on the stress state of the bends of main gas pipelines was solved by numerical simulation. Based on the results of simulation the processes of bends erosion wear, an algorithm for three-dimensional simulation of bend walls erosion defects was developed. The complex three-dimensional geometric shape of the erosion defects of the bend wall varied according to the rate of erosion wear process. This algorithm made it possible to determine the regularities for the influence of the bend erosion defects magnitude on bends stress state. It was established that considering the maximum depth of bend erosion defects 9.6 mm, 10.5 mm and 11.9 mm, the equivalent stresses in the deepest places of the erosion defect were greater than on the concave side of the bend and in straight sections of the pipeline.

Keywords: multiphase flow, bend, gas pipeline, gas - dynamic process, erosion wear, stress state.