

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу  
Міністерство освіти і науки України

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу  
Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

**ДОРОШЕНКО ЯРОСЛАВ ВАСИЛЬОВИЧ**

УДК 622.691.4: 622.692.4

**ДИСЕРТАЦІЯ**

**Наукові основи оцінювання енерговитратності та забезпечення  
працездатності складних трубопровідних систем**

05.15.13 – трубопровідний транспорт, нафтогазосховища

18 – виробництво та технології

Подається на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук

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



Я. В. Дорошенко

*Всі приєднані  
дисертації і документи  
за змістом  
Всього секретар спеціалізованої  
вченої ради № 20-052.04  
2.10.2020р.*

Науковий консультант

**Грудз Ярослав Володимирович**  
професор, доктор технічних наук

Івано-Франківськ – 2020



Підписи	<i>Грудз Я.В.</i>
посвідчую	<i>В. Процюк</i>
Учений секретар ІФНТУНГ	<i>В. Процюк</i>
« 02 »	10
	2020 р.

## АНОТАЦІЯ

*Дорошенко Я. В.* Наукові основи оцінювання енерговитратності та забезпечення працездатності складних трубопровідних систем. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора 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, 2020.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню важливої науково-технічної проблеми оцінювання енерговитратності та забезпечення працездатності складних трубопровідних систем. Для цього досліджено динаміку руху однофазних і багатофазних потоків фасонними елементами. Визначено закономірності впливу режимних параметрів транспортування, характеристик дисперсних фаз, їх концентрації, геометричних параметрів фасонних елементів трубопроводів на енерговитратність, ерозійне зношування складних трубопровідних систем. Комплексно досліджено напружено-деформований стан фасонних елементів трубопровідних систем із урахуванням закономірностей газодинамічних процесів, які відбуваються в їхній внутрішній порожнині, закономірностей ерозійного зношування стінки. Визначено закономірності технологічного процесу протягування поршнем рукава в трубопровід, який містить декілька дефектних відводів, розроблено технологію безтраншейної реконструкції складних трубопровідних систем.

Розглянуто конструктивні особливості, сферу застосування, виконано 3D моделювання найпоширеніших фасонних елементів трубопровідних систем.

Досліджено газодинамічні процеси, структуру однофазних потоків у внутрішній порожнині фасонних елементів трубопровідних систем, встановлено закономірності між досліджуваними процесами. Виявлено місця відривання потоку від стінки, утворення турбулентних вихорів, рециркуляцій, виникнення

конфузорних і дифузорних ефектів. Визначено місця відводів і трійників, де швидкість потоку, тиск досягають максимальних, мінімальних значень.

Визначено закономірності впливу напрямків руху потоку трійниками, радіуса відбортування, діаметра відгалуження трійників на газодинамічні процеси в їх внутрішній порожнині, втрати гідравлічної енергії в трійниках. Визначено залежність між величиною втрат гідравлічної енергії в трійниках і їхніми геометричними параметрами. Розраховано коефіцієнти місцевого опору кожного досліджуваного трійника та втрати в ньому гідродинамічного напору. Рекомендовано під час проектування нових і реконструкції старих трубопровідних систем надавати перевагу штампованим трійникам, у яких радіус відбортування більше за 0,25.

Ейлеровим підходом (модель Mixture) досліджено газодинамічні двофазні процеси, втрати енергії двофазних потоків у фасонних елементах трубопровідних систем. Вивчено розподіл об'ємної частки суцільної та дисперсної фази, тиску в внутрішній порожнині фасонних елементів трубопроводів. Визначено закономірності впливу експлуатаційних параметрів транспортування, характеристик і об'ємної частки дисперсних фаз, геометричних параметрів досліджуваних елементів на втрати гідравлічної енергії в їх внутрішній порожнині. Встановлено суттєву залежність величини втрати енергії двофазного потоку в фасонних елементах трубопроводів від об'ємної частки дисперсних фаз. Найсуттєвіший такий вплив об'ємної частки спостерігався у відводах трубопроводів із великим кутом і малим радіусом вигину. Особливо втрати тиску в відводах зростали при великих швидкостях багатофазного потоку та малих тисках. Щодо трійників, то найсуттєвіший вплив на втрати гідравлічної енергії в них об'ємна частка дисперсної фази чинить, коли радіус їх відбортування є найменший або відбортування взагалі відсутнє (зварні трійники). Отримано емпіричні залежності для визначення втрати тиску двофазних потоків у фасонних елементах трубопровідних систем.

Лагранжевим підходом (модель Discrete Phase Model) виконано тривимірне моделювання руху багатофазних потоків у фасонних елементах трубопровідних

систем. Визначено розподіл швидкості та розмірів дисперсних фаз у їх внутрішній порожнині. Досліджено траєкторії руху дисперсних фаз фасонними елементами, виявлено місця інтенсивного їх ударяння в стінку, місця завихрення, зміни напрямку руху. Визначено швидкість, кути атаки, діаметри дисперсних фаз у місці ударяння в стінку фасонних елементів. Визначено закономірності впливу напрямків руху потоку трійниками, геометричних параметрів фасонних елементів трубопроводів, режимних параметрів транспортування на траєкторії руху дисперсних фаз фасонними елементами.

Чисельним моделюванням (модель Фінні) та експериментально досліджено ерозійне зношування фасонних елементів трубопровідних систем. Визначено місця концентрації дисперсних фаз на стінці, місця інтенсивного ерозійного зношування, швидкість стоншення стінки. Експериментально виявлені місця ерозійного зношування фасонних елементів трубопроводів підтвердили достовірність моделювання. Визначено закономірності впливу швидкості та діаметра дисперсних фаз, кутів атаки, концентрації дисперсної фази на стінці на місцезнаходження та інтенсивність ерозійного зношування фасонних елементів. Визначено залежність місцезнаходження та інтенсивності ерозійного зношування відводів трубопроводів від їх діаметра, кута та радіуса вигину, швидкості двофазного потоку, розмірів і витрати дисперсних фаз. Експериментально визначено вплив тривалості експлуатації відводів газопроводів на швидкість їх ерозійного зношення. Отримано нову емпіричну залежність між інтенсивністю ерозійного зношування відводів трубопроводів та основними параметрами процесу.

Експериментально визначено причини аварійного витoku теплоносія з трійника тепломережі м. Київ. Виконано дослідження взірців сталі трійника, дослідження мікроструктури сталі, чисельне моделювання руху теплоносія трійником. Встановлено, що причинами аварійного витoku теплоносія є синергетичний вплив на його стінку ерозійних та корозійних процесів.

Досліджено напружено-деформований стан фасонних елементів трубопровідних систем із урахуванням закономірностей газодинамічних процесів, які відбуваються у їхній внутрішній порожнині, ерозійного зношування стінки та

температурного перепаду. Визначено зони потенційного ризику втрати міцності фасонних елементів трубопровідних систем. Побудовано геометричні моделі фасонних елементів трубопроводів зі складною тривимірною формою ерозійних дефектів стінки. Визначено закономірності впливу величини ерозійних дефектів на напружено-деформований стан фасонних елементів трубопроводів.

Математично описаний напружено-деформований стан ерозійно та корозійно зношених відводів трубопроводів. Задачу вирішено в тороїдальній системі координат. Систему рівнянь рівноваги в рамках лінійної теорії крученості зведено до одного рівняння, яке є основним рівнянням задачі Ламе. Отримано формулу для розрахунку кільцевих напружень у стінці ерозійно чи корозійно зношених відводів трубопроводів від дії внутрішнього тиску. Визначено закономірності впливу зміни товщини стінки відводів трубопроводів у місці їх ерозійного зношення на величину еквівалентних напружень. Встановлено, що отриману формулу для розрахунку кільцевих напружень можна застосовувати тоді, коли фактична товщина стінки відводу в місці максимального ерозійного зношення перевищує 70 % його номінальної товщини стінки. Розроблено алгоритм визначення значень допустимих товщин стінки фасонних елементів у місці ерозійного зношення, оцінювання їх міцності.

Ремонт складних трубопровідних систем, які містять ерозійно чи корозійно зношені відводи у важкодоступних місцях, запропоновано виконувати безтраншейно – протягуванням поршнем рукава. Можливість реалізації такої ідеї обґрунтовано теоретично та підтверджено експериментально.

Теоретично й експериментально визначено всі сили опору, які діють на рухому систему, закономірності зміни тиску компресора під час протягування поршнем рукава трубопроводом, який містить дефектний відвід. Для протягування поршнем рукава трубопроводом довжиною 100 м та внутрішнім діаметром 49 мм, який містить у середній частині відвід з кутом вигину  $90^\circ$ , потрібен незначний тиск – до 0,3 МПа. Зі зменшенням кута вигину відводу потрібний тиск на виході компресора для протягування рукава зменшується і для кута вигину  $30^\circ$  склав 0,2 МПа. Визначено закономірності зміни тиску, необхідного

для подолання сили тертя (зумовленої притисканням рукава через зміну напрямку протягування) між рукавом та внутрішньою стінкою трубопроводу в місці дефектного відводу. Експериментальні дослідження підтвердили достовірність теоретично виведених залежностей.

Новизна одержаних результатів полягає в отриманні якісно нових результатів щодо впливу динамічних процесів у внутрішній порожнині складних трубопровідних систем на їх енерговитратність, працездатність та визначається такими положеннями. Вперше визначено закономірності впливу геометричних параметрів фасонних елементів трубопровідних систем, напрямків руху ними двофазних потоків (для трійників) на траєкторії руху дисперсних фаз, що дало змогу визначити основні параметри, які впливають на процеси їх ерозійного зношування (місця вдаряння дисперсних фаз в стінку, кути атаки, швидкість, діаметри дисперсних фаз у місці удару). Вперше встановлено закономірності між місцезнаходженням, інтенсивністю ерозійного зношування фасонних елементів газопроводів і їх геометричними параметрами, режимними параметрами транспортування та характеристиками і концентрацією дисперсних фаз, що дозволило визначити місця обстежень фасонних елементів на ерозійне зношування, побудувати тривимірні геометричні моделі ерозійних дефектів. Вперше встановлено закономірності впливу глибини ерозійних дефектів фасонних елементів трубопроводів на їх напружений стан, визначено зони потенційного ризику втрати міцності та допустиму глибину ерозійних дефектів, розроблено алгоритм 3D-моделювання фасонних елементів трубопроводів зі складною об'ємною геометричною формою їх ерозійних дефектів, що дає змогу оцінити працездатність цих елементів, визначити їх залишковий ресурс. Вперше запропонована, науково обґрунтована та якісно підтверджена порівнянням із результатами чисельного моделювання розрахункова залежність для визначення кільцевих напружень, які виникають у стінці ерозійно чи корозійно зношених відводів трубопроводів, що дозволило розробити покроковий алгоритм оцінювання їх міцності. Вперше встановлено закономірності зміни тиску компресора під час протягування поршнем рукава трубопроводом, який містить ерозійно чи корозійно

зношені відводи на основі яких розроблена технологія безтраншейної реконструкції складних трубопровідних систем. Удосконалена методологія оцінювання енерговитратності фасонних елементів трубопроводів із урахуванням їх геометричних параметрів, режимних параметрів транспортування, характеристик дисперсних фаз та визначено залежності між цими параметрами і коефіцієнтами місцевих опорів, втратами тиску двофазних потоків у таких елементах. Набуло подальшого розвитку вивчення закономірностей газогідродинамічних процесів у фасонних елементах трубопровідних систем, розширені наукові знання про турбулентні процеси, розподіл тиску, швидкості, кінетичної енергії турбулентності, об'ємних часток суцільної і дисперсної фази у їх внутрішній порожнині.

Сукупність одержаних наукових результатів складає наукові основи оцінювання енерговитратності та забезпечення працездатності складних трубопровідних систем.

Практичне значення одержаних результатів. Результати досліджень є корисними для проектування мінімально енерговитратних і стійких до ерозійного зношування складних трубопровідних систем та керування їх енерговитратністю. Також отримані результати дають змогу своєчасно визначити місцезнаходження, геометричні параметри та динаміку ерозійного зношування фасонних елементів трубопровідних систем, значно якісніше та ґрунтовніше їх обстежувати, підходити до оцінювання міцності, визначення періодичності обстеження, прогнозувати їх стан та визначати залишковий ресурс із метою планування ремонтних робіт.

Розроблено комплексну галузеву методику технічного діагностування та розрахунку міцності фасонних елементів трубопровідних систем, яку впроваджено в Науково-виробничому центрі технічної діагностики “Техдіагаз” АТ “Укртрансгаз” НАК “Нафтогаз України”. Також розроблено методику розрахунку напружено-деформованого стану балкових систем надземних переходів, яку впроваджено в ТОВ “ЕКСПРЕС-ГАЗБУД”.

Виконані в дисертаційній роботі теоретичні й експериментальні дослідження дали змогу розробити нову техніку та технологію безтраншейної реконструкції

складних трубопровідних систем, які містять декілька дефектних відводів, рукавом чи гнучкими композитними трубами. Розроблена технологія промислово апробована та впроваджена у СП “Київські теплові мережі” КП “Київтеплоенерго” РТМ “Печерськ”. Основні розроблені положення щодо безтраншейного ремонту ерозійно чи корозійно зношених відводів трубопроводів гнучкими композитними трубами включені в національний стандарт України ДСТУ 9003:2020 “Технологія будівництва магістральних і промислових трубопроводів із гнучких композитних труб. Загальні технічні вимоги”.

**Ключові слова:** енерговитратність, газодинамічний процес, ерозійне зношування, напружений стан, ремонт, фасонні елементи, відвід, трійник, CFD моделювання, дисперсна фаза, підхід Ейлера, підхід Лагранжа, рівняння Фінні, рукав, траєкторія руху.

## СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

### Наукові праці, в яких опубліковано основні наукові результати дисертації

1. Numerical simulation of the stress state of an erosion-worn tee of the main gas pipeline / Ya. Doroshenko, V. Zapukhliak, Ya. Grudz, L. Poberezhny, A. Hrytsanchuk, P. Popovych, O. Shevchuk // *Archives of Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 101, No 2. P. 63–78. **(індексується в Scopus, кuartиль Q3)**. (Особистий внесок – виконав CFD моделювання та дослідив закономірності руху потоків трійником, ерозійного зношування його стінки та напруженого стану. Розробив методіку розрахунку залишкового ресурсу ерозійно зношеного трійника. Підготував статтю до публікації).

2. Modeling computational fluid dynamics of multiphase flows in elbow and T-junction of the main gas pipeline / Ya. Doroshenko, Ju. Doroshenko, V. Zapukhliak, L. Poberezhny, P. Maruschak // *Transport*. 2019. Vol. 34, No 1. P. 19–29. **(індексується в Scopus, кuartиль Q2)**. (Особистий внесок – виконав 3D моделювання фасонних елементів лінійної частини газопроводів, моделювання руху ними багатофазних потоків, дослідив траєкторії руху крапель конденсату та твердих частинок цими елементами. Підготував статтю до публікації).



3. Doroshenko Ya., Rybitskyi I. Investigation of the influence of the gas pipeline tee geometry on hydraulic energy loss of gas pipeline systems. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. Vol. 1, No 8 (103). P. 28–34. **(індексується в Scopus, кuartиль Q3)**. (Особистий внесок – визначив закономірності впливу радіусу заокруглення переходу від відводу до магістралі трійників на газодинамічні процеси в його внутрішній порожнині. Встановив залежність коефіцієнта місцевого опору рівнопрохідних трійників від їх геометричних параметрів. Підготував статтю до публікації).

4. Doroshenko Ya. V., Oliynyk A. P., Karpash O. M. Modeling of stress-strain state of piping systems with erosion and corrosion wear. *Physics and chemistry of solid state*. 2020. Vol. 21, No 1. P. 151–156. **(індексується в Scopus, Web of Science Core Collection)**. (Особистий внесок – здійснив постановку задачі дослідження, брав участь у виведенні формули для розрахунку кільцевих напружень, які виникають у стінці ерозійно чи корозійно зношених відводів трубопроводів. Визначив закономірності впливу зміни товщини стінки відводів трубопроводів у місці їх ерозійного чи корозійного зношення на величину кільцевих напружень. Підготував статтю до публікації).

5. Development of trenchless technology of reconstruction of “Pulling pig P” pipeline communications / Ya. Doroshenko, V. Zapukhliak, K. Poliarush, R. Stasiuk, S. Bagriy // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. Vol. 2, No. 1(98). P. 28–38. **(індексується в Scopus, кuartиль Q3)**. (Особистий внесок – запропонував ідею виконати безтраншейну реконструкції зношеного трубопроводу протягуванням поршнем нової поліетиленової труби, брав участь у розробленні технології, теоретичному дослідженні закономірностей процесу, виконанні експериментальних досліджень і обробці їх результатів).

6. Developing a set of measures to provide maximum hydraulic efficiency of gas gathering pipelines / V. B. Volovetskyi, A. V. Uhrynovskyi, Ya. V. Doroshenko, O. M. Shchyrba, Yu. S. Stakhmych // *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*. 2020. Vol. 101, Issue 1, July. P. 27–41. **(індексується в Scopus, кuartиль Q2)**. (Особистий внесок – запропонував комплекс заходів для

підвищення гідравлічної ефективності газозбірних трубопроводів газових родовищ).

7. Doroshenko Ya. V., Karpash O. M., Rybitskyi I. V. Investigation of dispersed contaminants influence on the hydraulic energy consumption of elements of gas pipeline systems with complex geometry. *Topical scientific researcher into resource-saving technologies of mineral mining and processing* : multi-authored monograph. Sofia, 2020. P. 182–207. **(розділ у колективній монографії іноземного видання)**. (Особистий внесок – визначив закономірності впливу геометричних параметрів фасонних елементів трубопроводів, експлуатаційних параметрів транспортування, характеристик і об'ємної частки дисперсних фаз на гідравлічну енерговитратність складних трубопровідних систем. Дослідив розподіл об'ємної частки суцільної та дисперсної фази, тиску в внутрішній порожнині фасонних елементів трубопроводів. Підготував розділ у колективній монографії до публікації).

8. Doroshenko Ya. V. Investigation of strength of shaped elements of the main gas pipeline. *Journal of Hydrocarbon Power Engineering*. 2019. Vol. 6, Issue 1. P. 14–21. **(наукове фахове видання України)**.

9. Дорошенко Я. В. Дослідження впливу геометричних параметрів відводів газопроводів на внутрішньотрубні ерозійні процеси. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2020. № 1(74). С. 7–17. **(наукове фахове видання України)**.

10. Дорошенко Я. В. Розроблення технології ремонту фасонних елементів трубопровідних систем у важкодоступних місцях. *Нафтогазова енергетика*. 2020. № 1 (33). С. 36–46. **(наукове фахове видання України)**.

11. Дорошенко Я. В. CFD-дослідження газодинамічних процесів у зварних трійниках магістральних газопроводів. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Технічні науки*. 2020. Том 31(70), № 1, Частина 2. С. 27–33. **(наукове фахове видання України)**.

12. Дорошенко Я. В. Дослідження впливу параметрів двофазних потоків на ерозійне зношування відводів газопроводів. *Комунальне господарство міст*. 2020. Том 1, Вип. 154. С. 240–247. **(наукове фахове видання України)**.

13. Дорошенко Я. В. Моделювання витікань газу з газопроводів в аварійних ситуаціях. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2020. № 3 (150). С. 22–28. **(наукове фахове видання України)**.

14. Дорошенко Я. В., Карпаш О. М., Гожаєв Б. Н. Дослідження складу трубопровідних газорідинних потоків та впливу наявних у них шкідливих домішок на режими перекачування, енерговитрати на транспортування. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2019. № 4(73). С. 35–45. **(наукове фахове видання України)**. (Особистий внесок – описав види та властивості характерних забруднень, які містяться у внутрішній порожнині трубопроводів. Виконав аналіз негативних наслідків, які відбуваються при накопиченні забруднень у внутрішній порожнині трубопроводів, їх руху з транспортованим продуктом трубопроводом. Підготував статтю до публікації).

15. Сучасні технології будівництва промислових газонафтопроводів / Я. В. Дорошенко, В. А. Кучерявий, Н. М. Андрієшин, С. М. Стецюк, Ю. М. Левкович // *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2019. № 3(72). С. 19–31. **(наукове фахове видання України)**. (Особистий внесок – виконав аналіз зарубіжного досвіду будівництва, реконструкції трубопроводів із застосуванням гнучких композитних труб. Обґрунтував доцільність застосування таких труб у газонафтовому комплексі України. Встановив особливості безтраншейної реконструкції гнучкими композитними трубами дефектних, зношених сталевих трубопроводів. Підготував статтю до публікації).

16. 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. Приймав участь у підготовці статті до публікації).

17. 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 – виконав аналіз можливостей існуючих тягових засобів для безтраншейної реконструкції трубопроводів. Приймав участь у дослідженні закономірностей технологічного процесу безтраншейної реконструкції трубопровідних комунікацій очисним поршнем, розробленні технології виконання таких робіт. Приймав участь у підготовці статті до публікації).

18. 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 залежності напружено-деформованого стану ділянок газопроводу від геометричних параметрів дефектів форми поперечного перерізу труби (вм'ятин, овальності) з урахуванням газодинамічних процесів у трубопроводі в місці дефектів, визначив допустимі розміри таких дефектів. Приймав участь у підготовці статті до публікації).

19. Дослідження фізичної картини руху газових потоків відводами магістральних газопроводів / Я. В. Дорошенко, В. Б. Запихляк, Ю. І. Дорошенко, Н. М. Запихляк // *Нафтогазова галузь України*. 2017. № 5(29). С. 25–29. **(наукове фахове видання України)**. (Особистий внесок – чисельним моделюванням та експериментально дослідив закономірності руху газового потоку відводами газопроводів. Виявив місця інтенсивного ударяння дисперсної фази до стінки відводу, місця інтенсивного його ерозійного зношування).

20. Doroshenko Ya. V., Marko T. I., Doroshenko Yu. I. The study of erosive wear of the shaped elements of compressor station manifold of a gas pipeline. *Journal of Hydrocarbon Power Engineering*. 2016. Vol. 3, Issue 2. P. 65–78. **(наукове фахове видання України)**. (Особистий внесок – виконав 3D моделювання обв'язки компресорної станції й її фасонних елементів, CFD моделюванням визначив закономірності газодинамічних процесів у їх внутрішній порожнині, виявив місця

та визначив інтенсивність їх ерозійного зношування. Підготував статтю до публікації).

21. Експериментальні дослідження ерозійного зношування фасонних елементів трубопроводів / Я. В. Дорошенко, В. Б. Запхляк, Т. І. Марко, Р. Б. Стасюк // *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2017. № 1(62). С. 66–76. **(наукове фахове видання України)**. (Особистий внесок – розробив багатофункціональний експериментальний стенд для досліджень руху двофазних потоків прозорими фасонними елементами трубопроводів, методику експериментальних досліджень ерозійного зношування фасонних елементів трубопроводів. Приймав участь в експериментальних дослідженнях, виконав обробку й узагальнення результатів. Підготував статтю до публікації).

22. Дорошенко Я. В., Марко Т. І., Дорошенко Ю. І. Дослідження динаміки руху газу фасонними елементами обв'язки компресорної станції. *Науковий вісник*. 2016. № 1(40). С. 57–71. **(наукове фахове видання України)**. (Особистий внесок – розробив методику моделювання газодинамічних процесів, дослідив структуру потоку в внутрішній порожнині фасонних елементів обв'язки компресорної станції, встановив закономірності газодинамічних процесів у трійниках залежно від напрямків руху ними газових потоків. Підготував статтю до публікації).

23. Марко Т. І., Дорошенко Я. В. Механізми ерозійного зношування стінки труби газопроводів. *Прикарпатський вісник НТШ. Число*. 2015. № 1(29). С. 315–326. **(наукове фахове видання України)**. (Особистий внесок – виконав аналіз механізмів ерозійного зношування фасонних елементів трубопроводів, дослідив вплив усіх чинників на швидкість ерозійного зношування фасонних елементів трубопроводів. Підготував статтю до публікації).

24. 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 – виконав аналіз технічних можливостей сучасних безтраншейних технологій. Класифікував і здійснив аналіз існуючих методів безтраншейного ремонту газових і теплових мереж; навів чинники, які необхідно

враховувати під час прийняття рішення про ремонт газових і теплових мереж безтраншейними технологіями. Приймав участь у підготовці статті до публікації).

25. 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 – встановив, які дефекти можуть виникати у важкодоступних місцях підземних ділянок газонафтопроводів, обґрунтував доцільність застосування внутрішньотрубних засобів для обстеження та ремонту важкодоступних ділянок газонафтопроводів. Приймав участь у підготовці статті до публікації).

26. Марко Т. І., Дорошенко Я. В. Ерозійне зношування фасонних елементів газопроводів. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2014. № 4(53). С. 153–159. **(наукове фахове видання України)**. (Особистий внесок – виконав аналіз складу та фізичних властивостей накопичень, які містяться у внутрішній порожнині газопроводів. Встановив основні параметрами, які впливають на величину ерозійного зношування фасонних елементів газопроводів. Побудував схеми руху твердих частинок фасонними елементами лінійної частини газопроводів. Підготував статтю до публікації).

27. Дорошенко Я. В., Марко Т. І., Тихонов С. І. Сучасні технології обслуговування, ремонту та реконструкції підводних газонафтопроводів. *Науковий вісник*. 2014. № 1(36). С. 118–131. **(наукове фахове видання України)**. (Особистий внесок – виконав аналіз інноваційних технологій, які можуть бути застосовані для ремонту дефектів стінки труби прибережних і руслових ділянок підводних газонафтопроводів. Запропонував технології внутрішньотрубного ремонту важкодоступних ділянок підводних переходів газонафтопроводів. Підготував статтю до публікації).

28. Аналіз причин зниження гідравлічної ефективності міжпромислових газопроводів та вибір способів її підвищення / В. Б. Воловецький, О. М. Щирба, О. Ю. Витязь, Я. В. Дорошенко // *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2013. № 3(48). С. 147–156. **(наукове фахове видання України)**.

(Особистий внесок – встановив основні причини накопичення рідких забруднень у внутрішній порожнині міжпромислових газопроводів, визначив основні чинники впливу на обсяг забруднень у їх внутрішній порожнині).

29. Дорошенко Я. В., Дорошенко Ю. І. Дослідження впливу руху поршня на надійність балкового переходу прокладеного за схемою пружновикривленого трубопроводу. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2011. № 3(40). С. 34–36. **(наукове фахове видання України)**. (Особистий внесок – розробив методику розрахунку впливу інерційної відцентрової сили, зумовленої рухом поршня криволінійною ділянкою на стінку трубопроводу. Підготував статтю до публікації).

30. Дорошенко Я. В., Дорошенко Ю. І., Тихонов С. І. Застосування сучасних програмних комплексів комп'ютерного моделювання для підвищення якості проектування та спорудження трубопроводів. *Науковий вісник ІФНТУНГ*. 2010. № 2(24). С. 117–120. **(наукове фахове видання України)**. (Особистий внесок – виконав аналіз можливостей сучасних програмних комплексів комп'ютерного моделювання. Розглянув проблеми та задачі трубопровідного транспорту, які можна вирішити з допомогою програмних комплексів комп'ютерного моделювання. Підготував статтю до публікації).

31. Дорошенко Я. В., Дорошенко Ю. І. Міцність криволінійних ділянок трубопроводів. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2010. № 2(35). С. 112–116. **(наукове фахове видання України)**. (Особистий внесок – виконав аналіз міцності криволінійних ділянок трубопроводів із урахуванням усіх навантажень, які діють на трубопровід, ерозійного зношування стінок труб, наявності корозійних дефектів у місцях мінімального запасу міцності. Дослідив вплив радіуса згину трубопроводу на його міцність і запропонував оптимальні за рівнем напружень конструктивні рішення криволінійних ділянок трубопроводу. Підготував статтю до публікації).

### Патенти

1. 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. Автори: Дорошенко Я. В., Поляруш К. А., Запужляк В. Б. **(патент на корисну модель)**. (Особистий внесок – запропонував ідею реконструкції трубопровідних комунікацій протягуванням поршнем нової поліетиленової труби, приймав участь у патентному пошуку, оформленні патенту).

2. 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. Автори: Дорошенко Я. В., Поляруш К. А. **(патент на корисну модель)**. (Особистий внесок – запропонував ідею санації трубопровідних комунікацій протягуванням рукава поршнем, приймав участь у патентному пошуку, оформленні патенту).

### **Праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації**

1. Дорошенко Я. В., Карпаш О. М., Олійник А. П. Математичне і чисельне моделювання напружено-деформованого стану ерозійно зношених елементів трубопровідних систем складної геометричної форми. *Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні. ІТММ'2020* : тези доп. Міжнар. наук.-техн. конф. імені професора Михальова О.І., м. Дніпро, 17–19 березня 2020 р. Дніпро, 2020. С. 143–147.

2. Дорошенко Я. В. CFD аналіз впливу геометричних параметрів трійників на гідравлічну енерговитратність трубопровідних систем. *Теоретичні та практичні аспекти розвитку науки та освіти (частина I)* : матеріали Міжнар. наук.-практ. конф., м. Львів, 22–23 січня 2020 р. Львів, 2020. С. 55–58.

3. Дорошенко Ю. І. Дорошенко Я. В. Дослідження іноземного досвіду визначення втрат газу через наскрізні дефекти магістрального газопроводу. *Topical issues of the development of modern science* : abstracts of V International scientific and practical conf., с. Sofia, 15–17 January 2020 у. Sofia, 2020. P. 421–430.

4. Дослідження ерозійного зношування та міцності відводів магістральних газопроводів / Я. В. Дорошенко, В. Б. Запужляк, Л. Я. Побережний, Ю. Г. Мельниченко, Ю. І. Дорошенко // *Пошкодження матеріалів під час експлуатації, методи його діагностування і прогнозування* : праці VI Міжнар. наук.-техн. конф., м. Тернопіль, 24–27 вересня 2019 р. Тернопіль, 2019. С. 153–156.



5. 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 6<sup>th</sup> Inter. scient. conf., c. Stuttgart, 19 april 2019 y. Stuttgart, 2019. P. 139–151.

6. Огляд існуючих методів очищення та осушення газу на підприємствах газової галузі / Ю. І. Дорошенко, Я. В. Дорошенко, В. Б. Михалків, М. Т. Лушпак // *Наукова думка сучасності і майбутнього* : збірн. статей учасників восьмої Всеукраїнської практично-пізнавальної конф., м. Дніпро, 30 січня – 7 лютого 2017 р. Дніпро, 2017. С. 68–71.

7. Дорошенко Я. В., Поляруш К. А. Метод безтраншейного релайнінгу теплогазових мереж. *Нафтогазова енергетика-2017* : тези доп. 6-тої Міжнар. наук.-техн. конф., м. Івано-Франківськ, 15–19 травня 2017 р. Івано-Франківськ, 2017. С. 196–197.

8. Дорошенко Я. В., Марко Т. І., Дорошенко Ю. І. Дослідження фізичної картини руху газових потоків трійниками магістральних газопроводів. *Нафтогазова енергетика-2017* : тези доп. 6-тої Міжнар. наук.-техн. конф., м. Івано-Франківськ, 15–19 травня 2017 р. Івано-Франківськ, 2017. С. 195–196.

9. Дорошенко Я. В., Зінич А. І. CFD Моделювання роботи циклонних пиловловлювачів магістральних газопроводів. *Нафтогазова енергетика-2017* : тези доп. 6-тої Міжнар. наук.-техн. конф., м. Івано-Франківськ, 15–19 травня 2017 р. Івано-Франківськ, 2017. С. 206–207.

10. Дорошенко Я. В., Марко Т. І., Дорошенко Ю. І. Комп’ютерне моделювання ерозійного зношування відводів лінійної частини магістрального газопроводу. *Актуальні проблеми енергетики та екології* : матеріали XVI Всеукраїнської наук.-техн. конф., м. Одеса, 5–8 жовтня 2016 р. Одеса, 2016. С. 85–88.

11. Дорошенко Я. В., Марко Т. И., Дорошенко Ю. И. Компьютерное моделирование динамики движения газа фасонными элементами линейной части газопроводов. *Трубопроводный транспорт – 2016* : материалы XI Междунар.

учеб.-науч.-практ. конф., г. Уфа, 24–25 мая 2016 г. Уфа, 2016. С. 60–61.

12. Дорошенко Я. В., Дорошенко Ю. І. Проблеми і перспективи спорудження та ремонту підводних газонафтопроводів. *Проблеми і перспективи транспортування нафти і газу* : матеріали Міжнар. наук.-техн. конф., м. Івано-Франківськ, 15–18 травня 2012 р. Івано-Франківськ, 2012. С. 2006–2008.

**Опубліковані праці, які додатково відображають наукові результати дисертації**

1. ДСТУ 9003:2020 Технологія будівництва магістральних і промислових трубопроводів із гнучких композитних труб. Загальні технічні вимоги. Вид. офіц. Київ : ДП УкрНДНЦ, 2020. 66 с. Автори: Дорошенко Я. В., Кучерявий В. А., Литвин В. Л., Підзирайло О. М.

2. Грудз В. Я., Дорошенко Я. В., Запхляк В. Б. Галузева методика. Технічне діагностування, розрахунок міцності фасонних елементів трубопровідних систем. Затверджено 27.07.2020. Київ : НВЦТД "Техдіагаз", 2020. 42 с.

3. Грудз В. Я., Запхляк В. Б., Дорошенко Я. В., Верхоляк Ю. Ю. Методика та розрахунок напружено-деформованого стану балкових систем надземних переходів. Затверджено 29.05.2020. Івано-Франківськ : ТОВ "ЕКСПРЕС-ГАЗБУД", 2020. 53 с.

4. Doroshenko Y. V. Gas and Oil Pipeline Valve, Pig Launcher & Receiver. Saarbrucken. Germany : LAP Lambert Academic Publishing, 2016. 132 p. ISBN 978-3-659-94320-1.

5. Doroshenko Y. V. Gas and Oil Pipeline Bridges, Road and Railway Crossings. Saarbrucken. Germany : LAP Lambert Academic Publishing, 2015. 157 p. ISBN 978-3-659-69018-1.

6. Дорошенко Я. В. Спорудження та ремонт зосереджених об'єктів газонафтопроводів : підручник. Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2015. 845 с. ISBN 978-3-659-37720-4.

7. Дорошенко Я. В. Спорудження магістральних трубопроводів : навчальний посібник. Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2010. 563 с. ISBN 978-966-694119-3.

8. Дорошенко Ю. І., Михалків В. Б., Дорошенко Я. В. Розробка проектних

рішень для зменшення втрат тиску у газових мережах із поліетиленових труб. *Питання розвитку газової промисловості України*. 2011. Вип. 39. С. 258–263.

9. Дорошенко Я. В., Марко Т. І., Дорошенко Ю. І. Дослідження динаміки руху багатофазних потоків фасонними елементами обв'язки компресорної станції магістрального газопроводу. *Міжнародний науковий журнал*. 2016. № 7. С. 68–77.

#### ANNOTATION

*Doroshenko Ya. V.* Scientific bases of assessing the energy consumption and ensuring the efficiency of complex pipeline systems. – Qualifying scientific work with the manuscript copyright.

The dissertation for a doctor of technical sciences degree in specialty 05.15.13 – pipeline transportation, oil and gas storages (18 – manufacturing and technologies). – Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk, Ministry of Education and Science of Ukraine, 2020.

The dissertation is devoted to the research of movement dynamics of single- and multiphase flows by the shaped elements of complex pipeline systems. The study of the influence regularities of the transportation mode parameters, dispersed phases characteristics, their concentration, geometric shape and geometric parameters of shaped elements of pipelines on energy consumption, erosion wear of complex pipeline systems. A comprehensive study of the stress-strain state of shaped elements of pipeline systems, taking into account the mechanisms of gas-dynamic processes that occur in their internal cavity, the mechanisms of the wall erosion wear. Investigation of the regularities of the technological process of pulling the sleeve by the piston into the pipeline with defective branches, development of the technology for such pipelines trenchless reconstruction.

The design features, scope of application were considered, 3D modelling of the most common shaped elements of pipeline systems were performed.

Gas-dynamic processes, the structure of single-phase flows in the inner cavity of shaped elements of pipeline systems were investigated, regularities between the processes under study were established. The places of flow separation from the wall, the formation

of turbulent vortices, recirculation, the occurrence of confuser and diffuser effects were located. The places of branches and tees where the flow rate, pressure reached maximum, minimum values, places of vortex formation, recirculation were determined, the values of the flow rate and pressure in these places were determined.

The influence regularities of the flow direction in the tees, the peculiarities of their geometric shape, the diameter of the tees branch on the gas-dynamic processes in their inner cavity, the energy consumption of the tees were investigated. The relationship between the value of hydraulic energy losses in tees and their geometric parameters was justified. The coefficients of local resistance of each investigated tee and the loss of hydrodynamic head in it were calculated. Equations were obtained for calculating the coefficients of local resistances of tees, depending on their geometric parameters. It was recommended that for the design of new and reconstruction of old gas pipeline systems, the stamped tees should be selected, in which the flanging radius is greater than 0.25.

The Euler approach (Mixture model) was used for investigation of gas-dynamic two-phase processes, energy losses of two-phase flows in shaped elements of pipeline systems. The distribution of the volume fraction of the continuous and dispersed phases, the pressure in the inner cavity of the shaped elements of pipelines was studied. The influence regularities for operational parameters of transportation, characteristics and volume fraction of dispersed phases and geometric parameters of the investigated elements on their hydraulic energy consumption were determined. A significant dependence of the value of the energy loss of a two-phase flow in shaped elements of pipelines on the volume fraction of dispersed phases was established. This significant effect of the volume fraction was observed in pipe bends with a large angle and a small bend radius. The pressure loss in the branches was increasing significantly at high multiphase flow rates and low pressures. As for tees, the most significant effect on the loss of hydraulic energy in them was caused by the volume fraction of the dispersed phase when the flanging radius was small or there was no flanging at all (welded tees). Empirical dependences for determining the pressure loss of two-phase flows in the shaped elements of pipeline systems are obtained.

The Lagrangian approach (Discrete Phase Model) was used for performing the

three-dimensional modelling of multiphase flows movement in shaped elements of pipeline systems. The distribution of the velocity and size of dispersed phases in their inner cavity was determined. The trajectories of movement of dispersed phases by shaped elements were investigated, the places of their intense impact to the wall, the places of their turbulence, changes in the direction of movement were investigated. The speed, angles of attack, diameters of dispersed phases in the place of impact to the wall of shaped elements were determined. The influence regularities of flow directions in the tees, the geometric parameters of the shaped elements of the pipelines, the regime parameters of transportation on the trajectory of dispersed phases movement by the shaped elements were determined.

Numerical modelling (Finney's model) was used for experimental investigation of the erosion wear of shaped elements of pipeline systems. The places of concentration of dispersed phases on their walls, places of intense erosive wear, and the rate of wall thinning were determined. The places of erosion wear of the shaped elements of the pipelines were experimentally found and the reliability of the modelling was confirmed. The influence regularities of the velocity and diameter of dispersed phases, angles of attack, concentration of the dispersed phase on the wall on the location and value of erosion wear of shaped elements were determined. The dependence of the location and value of erosion wear of pipeline bends on their diameter, angle and bend radius, two-phase flow rate, size and flow rate of dispersed phases were studied. The influence of the duration of gas pipeline branches operation on the rate of their erosion wear was experimentally determined. A new empirical relationship between the intensity of erosion wear of pipeline bend and the main process parameters is obtained.

The causes of emergency coolant leakage from the tee of the heating network in Kiev were experimentally investigated. Studies of steel tee samples, steel microstructure studies, numerical modelling of the coolant movement with a tee were carried out. It was established that the reasons for the emergency leakage of the carrier were the synergistic effect of erosion and corrosion processes in its wall.

The stress-strain state of shaped elements of pipeline systems was investigated taking into account the regularities of gas-dynamic processes that occurred in their inner

cavity, erosional wear of the wall and temperature drop. Areas of potential risk of strength loss in shaped elements of pipeline systems were determined. Geometric models of shaped elements of pipelines with a complex three-dimensional shape of erosional wall defects were elaborated. The influence regularities of the magnitude of erosion defects on the stress-strain state of pipelines shaped elements was determined. An algorithm was developed for determining the values of the permissible wall thicknesses of shaped elements in the place of erosion wear, assessing their strength.

The stress-strain state of erosion and corrosion worn out pipeline bends was mathematically described. The problem was solved in a toroidal coordinate system. The system of equilibrium equations in the framework of the linear theory of torsion was reduced to one equation, which was the basic equation of the Lamé problem. A formula for calculating the circumferential stresses in the wall of erosion or corrosion worn out pipelines caused by the effect of internal pressure was obtained. The influence regularities of changes in the wall thickness of pipe bends in place of their erosion wear on the value of equivalent stresses were determined. It was found that the obtained formula for calculating circumferential stresses could be used when the actual wall thickness of the bend at the point of maximum erosive wear did exceed 70 % of its nominal wall thickness.

It was proposed to repair pipelines with erosion or corrosively worn bends in hard-to-reach places by trenchless methods by pulling a hose or flexible composite pipes with a pig. The possibility of implementing such an idea is theoretically justified. The regularities of the technological process of pulling the hose by the pig through the pipeline, which contains a defective bend, were determined and experimentally confirmed.

All resistance forces acting on the moving system, the regularities of the pressure change at the compressor outlet during the pulling of the hose by the pig by the pipeline, which contains a defective bend, were theoretically and experimentally determined. To pull the hose by the pig in a pipeline with the length 100 m and inner diameter 49 mm, including a 90° bend in the middle, a slight pressure of up to 0.3 MPa was needed. With a decrease in the bend angle, the required pressure at the outlet of the compressor decreased and for a bend angle of 30° it was equal 0.2 MPa. The regularities of the change

in the pressure required to overcome the friction force (caused by pressing the sleeve through the change in the direction of pulling) between the hose and the inner wall of the pipeline at the place of the defective bend were determined. Experimental studies confirmed the reliability of the theoretically derived dependences.

The novelty of the research was in obtaining the qualitatively new approaches for assessing the influence of dynamic processes in the internal cavity of complex pipeline systems on their energy efficiency, wall and was determined by the following provisions. For the first time, the influence regularities of the geometric parameters, the directions of movement of two-phase flows by shaped elements of pipeline systems on the movement trajectory of dispersed phases by such elements were determined, which allowed to determine places of their impact in the wall, angles of attack in the place of impact. For the first time, regularities were established between the location and intensity of erosion wear of shaped elements of gas pipelines and geometric parameters, regime parameters of transportation and characteristics, concentration of dispersed phases, which made it possible to perform three-dimensional geometric modeling of erosion defects. For the first time, regularities were established between the location and intensity of erosion wear of shaped elements of gas pipelines and geometric parameters, regime parameters of transportation and characteristics, concentration of dispersed phases, which made it possible to perform three-dimensional geometric modelling of erosion defects, which allows you to assess the efficiency of such elements. For the first time, the calculated dependence for the circumferential stresses arising in the wall of erosion or corrosively worn pipe bend were proposed and scientifically substantiated by comparison with the results of numerical modelling and qualitative confirmation. For the first time, the regularities of the compressor pressure change during the pulling of the hose by the pig in the pipeline with erosion or corrosion worn bends, which makes it possible to perform trenchless reconstruction of complex pipeline systems. The study of the regularities of gas-hydrodynamic processes in shaped elements of pipeline systems, expanded scientific knowledge about turbulent processes, the distribution of pressure, velocity, kinetic energy of turbulence, volume fractions of the continuous and dispersed phases in their internal cavity were identified for further developing. Elaborated scientific data on the

dependence of the energy consumption of shaped elements of pipelines on their geometric parameters, regime parameters of transportation, characteristics of dispersed phases, new empirical relationships were obtained, and allowed to determine the coefficients of local resistances of such elements.

The set of obtained scientific results is the scientific basis for assessing energy consumption, erosion wear, stress-strain state and increase the reliability of shaped elements of complex pipeline systems.

The practical value of the obtained results. The research results are useful for forecasting the gas-dynamic processes in shaped elements, designing minimally energy-intensive and erosion-resistant complex pipeline systems. The obtained results allow to determine on-time the location, geometric parameters and erosion wear dynamics of shaped elements of pipeline systems, to inspect them much better and reasonably, to find new approaches to strength assessment, to determine inspection frequency, to forecast their condition and to determine residual life for planning the repair operations.

A comprehensive industry method of technical diagnostics and calculation of the strength of the shaped elements of pipeline systems has been developed, which has been introduced in the Research and Production Center for Technical Diagnostics "Techdiagaz" JSC "Ukrtransgaz" NJSC "Naftogaz of Ukraine". Also, the methodology for calculating the stress-strain state of girder systems of above surface crossings was developed, which was implemented in LLC "EXPRESS-GAZBUD".

Theoretical and experimental researches performed in the dissertation made it possible to develop the technique and technology of trenchless repair of erosion or corrosion worn bends of pipelines in hard-to-reach places. The developed technology is industrially tested and implemented in JE "Kyiv Heat Networks" of KP "Kyivteploenerho" RTM "Pechersk". The main developed provisions for trenchless repair of erosion or corrosion-worn pipelines bends by flexible composite pipes were included in the national standard of Ukraine DSTU 9003: 2020 "Technology of construction of main and industrial pipelines by flexible composite pipes. General technical requirements".

**Key words:** energy loss, gas-dynamic process, erosion wear, stress-strain state,



repair, shaped elements, bend, tee, CFD modelling, dispersed phase, Euler approach, Lagrange approach, Finney equation, hose, movement trajectory.

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	31
ВСТУП	32
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ПІДХОДІВ ТА РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ ЩОДО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ ТА БЕЗАВАРІЙНОСТІ СКЛАДНИХ ТРУБОПРОВІДНИХ СИСТЕМ	44
1.1 Особливості руху однофазних потоків фасонними елементами трубопроводів	44
1.2 Аналіз досліджень руху багатофазних потоків фасонними елементами трубопроводів	53
1.3 Стан проблеми ерозійного зношування складних трубопроводних систем	67
1.4 Аналіз досліджень напружено-деформованого стану фасонних елементів трубопроводів	75
1.5 Постановка задач і конкретизація мети досліджень	90
РОЗДІЛ 2 ДОСЛІДЖЕННЯ ГАЗОДИНАМІКИ ОДНОФАЗНИХ ПОТОКІВ У ФАСОННИХ ЕЛЕМЕНТАХ ТРУБОПРОВІДНИХ СИСТЕМ	97
2.1 Найпоширеніші фасонні елементи складних трубопроводних систем	98
2.2 Дослідження газогідродинамічних процесів у фасонних елементах трубопроводів	102
2.2.1 Вибір методики дослідження	102
2.2.2 Математичні моделі однофазних трубопроводних потоків у фасонних елементах	105
2.2.3 Геометричне 3D моделювання внутрішньої	

порожнини фасонних елементів трубопроводів	108
2.2.4 Граничні умови	111
2.2.5 Дослідження структури однофазних потоків у фасонних елементах трубопровідних систем	114
2.3 Дослідження впливу геометричних параметрів трійників трубопроводів на газогідродинамічні процеси в їхній внутрішній порожнині, втрати гідравлічної енергії потоку	126
Висновки до розділу 2	141
<b>РОЗДІЛ 3 ДОСЛІДЖЕННЯ РУХУ БАГАТОФАЗНИХ ПОТОКІВ         ФАСОННИМИ ЕЛЕМЕНТАМИ ТРУБОПРОВІДНИХ         СИСТЕМ</b>	143
3.1 Характеристика дисперсних фаз трубопровідних потоків	144
3.1.1 Магістральні газопроводи	144
3.1.2 Промислові та міжпромислові газопроводи	146
3.1.3 Нафтопроводи, нафтопродуктопроводи	148
3.2 Дослідження газодинаміки та втрат гідравлічної енергії двофазних потоків у фасонних елементах трубопроводів	149
3.2.1 Вибір методики дослідження	150
3.2.2 Математична модель багатофазної суміші у фасонних елементах трубопроводів	153
3.2.3 Дослідження структури та гідравлічних втрат енергії двофазних потоків у відводах трубопроводів	157
3.3 Дослідження руху багатофазних потоків фасонними елементами трубопроводів	170
3.3.1 Математичне моделювання руху багатофазних потоків фасонними елементами трубопроводів	170
3.3.2 Дослідження траєкторій руху дисперсних частинок фасонними елементами трубопроводів	177

Висновки до розділу 3	194
РОЗДІЛ 4 ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ЕРОЗІЙНОГО ЗНОШУВАННЯ СКЛАДНИХ ТРУБОПРОВІДНИХ СИСТЕМ	196
4.1 Чисельне моделювання ерозійного зношування фасонних елементів трубопроводів	197
4.2 Експериментальні дослідження ерозійного зношування фасонних елементів	210
4.2.1 Експериментальний стенд	210
4.2.2 Методика експериментальних досліджень	219
4.2.3 Результати експериментальних досліджень	222
4.3 Дослідження впливу геометричних параметрів відводів на їх ерозійне зношування	225
4.4 Дослідження впливу параметрів багатофазних потоків на ерозійне зношування відводів	230
4.5 Експериментальні вимірювання товщини стінки фасонних елементів газопроводів	239
4.6 Дослідження процесів ерозійно-корозійного зношення трійника тепломережі	243
Висновки до розділу 4	251
РОЗДІЛ 5 ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ФАСОННИХ ЕЛЕМЕНТІВ ТРУБОПРОВІДНИХ СИСТЕМ	254
5.1 Розроблення алгоритму моделювання напружено- деформованого стану фасонних елементів трубопроводів	255
5.2 Чисельне моделювання напружено-деформованого стану фасонних елементів трубопроводів	257
5.3 Дослідження напружено-деформованого стану ерозійно зношених фасонних елементів трубопроводів	265

5.4 Математичне моделювання напружено-деформованого стану ерозійно-корозійно зношених відводів трубопровідних систем	283
5.5 Розроблення алгоритму оцінювання міцності фасонних елементів трубопровідних систем	292
Висновки до розділу 5	296
<b>РОЗДІЛ 6 РОЗРОБЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ БЕЗТРАНШЕЙНОГО РЕМОНТУ ВІДВОДІВ ТРУБОПРОВОДІВ</b>	<b>299</b>
6.1 Теоретичні дослідження процесу протягуванням поршнем рукава трубопроводом, який містить відвід	299
6.2 Експериментальні дослідження процесу протягуванням поршнем рукава трубопроводом, який містить відвід	310
6.3 Розроблення технології безтраншейного ремонту відводів трубопроводів	319
6.4 Апробація розробленої технології безтраншейного ремонту відводів трубопроводів	323
Висновки до розділу 6	324
<b>ЗАГАЛЬНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ</b>	<b>326</b>
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ</b>	<b>330</b>
<b>ДОДАТОК А СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ</b>	<b>361</b>
<b>ДОДАТОК Б АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ТЕОРЕТИЧНИХ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ЕРОЗІЙНОГО ЗНОШУВАННЯ ФАСОННИХ ЕЛЕМЕНТІВ ТРУБОПРОВОДІВ</b>	<b>373</b>
<b>ДОДАТОК В УЗГОДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ МОДЕЛЮВАННЯ ЕРОЗІЙНОГО ЗНОШУВАННЯ ФАСОННИХ ЕЛЕМЕНТІВ ГАЗОПРОВОДІВ ІЗ ЧИННИМИ НОРМАМИ</b>	<b>390</b>

ДОДАТОК Г ДОКУМЕНТИ ПРО ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ  
ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ

396

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

CFD – computational fluid dynamics (обчислювальна гідродинаміка);

DPM – discrete phase model (модель дискретної (дисперсної) фази);

ГПА – газоперекачувальний агрегат;

КС – компресорна станція;

МСЕ – метод скінченних елементів;

НД – нормативний документ;

НДС – напружено-деформований стан;

⊗ – рукав.

## ВСТУП

**Обґрунтування вибору теми дослідження.** Основними вимогами, яким повинні відповідати складні трубопровідні системи, є мінімальна енерговитратність, працездатність та екологічна безпека. Ці показники залежать від якості проектування та спорудження, ефективності технічного обслуговування, правильності оцінки технічного стану та прогнозування довговічності, вчасності та якості ремонту.

Сучасні трубопровідні системи є складними розгалуженими мережами трубопроводів, які містять велику кількість фасонних елементів. У таких елементах змінюється напрям потоку, що спричиняє складну фізичну картину руху. Відбувається відривання потоку від стінки, утворюються значні турбулентні вихори, рециркуляції, що призводить до нерівномірного складного розподілу тиску, швидкості потоку тощо. Все це призводить до збільшення втрат гідравлічної енергії потоку в таких елементах.

Якщо потік багатофазний, то в результаті зміни напрямку руху потоку в фасонних елементах відбувається нерівномірний перерозподіл фаз, що зумовлено різною їх густиною. Збільшення концентрації дисперсної фази призводить до збільшення величини втрат гідравлічної енергії в таких елементах. Також дисперсна фаза в фасонних елементах вдаряється в стінку, що зумовлює ерозійне зношування. Нерівномірний розподіл тиску у внутрішній порожнині, ерозійне та корозійне зношування, геометрична форма елементів трубопровідних систем впливають на одного напружено-деформований стан (НДС). Усі ці чинники накладаються один на одного і на складну тривимірну геометричну форму таких елементів, тому вони є потенційно небезпечними. Ерозійне та корозійне зношування до того ж призводить до локального зменшення товщини стінки фасонних елементів трубопровідних систем та впливає на їх працездатність. Якщо фасонні елементи трубопровідних систем не обстежувати належним чином та вчасно не виконувати ремонтні роботи, то ерозійне чи корозійне зношування може призвести до аварій.



Усі ці процеси надзвичайно складні, оскільки залежать від багатьох чинників, а саме: геометричної форми і геометричних параметрів фасонних елементів трубопровідних систем, режимних параметрів транспортування та характеристик і концентрації дисперсних фаз, характеристик стінки, місцезнаходження та геометричних параметрів дефектів. Тому, щоб проектувати мінімально енерговитратні трубопровідні системи та забезпечити працездатність існуючих, потрібне всебічне дослідження фізичної картини руху трубопровідних потоків фасонними елементами; дослідження впливу газодинамічних процесів у їх внутрішній порожнині на ерозійне зношування, НДС; розроблення ефективних технологій ремонту таких елементів. Особливо актуальним це є сьогодні, коли більшість родовищ вуглеводнів в Україні експлуатується на завершальній стадії розробки в умовах низьких тисків, а видобутий продукт характеризується високим вмістом пластової води і вуглеводневого конденсату, частинок породи та піску. Робота сепараторів установок комплексної підготовки газу газодобувних підприємств у непроєктних режимах при низьких тисках призводить до винесення в міжпромислові та магістральні газопроводи великого обсягу дисперсних фаз. Обсяги транспортування газу магістральними газопроводами останніми роками є значно менші проектних. Тому компресорні станції таких магістральних газопроводів працюють через одну. За таких режимів роботи тиск уздовж газопроводу падає на більшу величину ніж це передбачено проектом, що призводить до збільшення швидкості потоку і, як наслідок, збільшення інтенсивності турбулентних процесів у фасонних елементах. У внутрішній порожнині довго експлуатованих трубопроводів тепломереж відбуваються активні корозійні процеси та продукти корозії захоплюються теплоносієм. Такі процеси призводять до збільшення обсягів забруднень у внутрішній порожнині тепломереж.

Збільшення швидкості трубопровідних потоків, збільшення обсягу забруднень трубопроводів призводить до збільшення втрат гідравлічної енергії в фасонних елементах трубопровідних систем, посилення інтенсивності їх ерозійного зношування. Ерозійні дефекти можуть призвести до катастрофічних наслідків, оскільки, більшість фасонних елементів розміщені в об'язках різних

технологічних об'єктів і є надзвичайно небезпечним для персоналу, який працює в безпосередній близькості, адже вони є внутрішньотрубними і візуально непомітними та непередбачуваними. Розуміння механізмів ерозійного зношування фасонних елементів трубопровідних систем є основою для обстеження їх технічного стану.

Масштаби втрат енергії, процеси ерозійного зношування, їх вплив на НДС, працездатність фасонних елементів трубопровідних систем ще недостатньо вивчені, оскільки залежать від багатьох чинників і є надзвичайно складними. Сьогоднішні вимоги енергоефективності, надійності вимагають звернути увагу на багато аспектів і питань щодо проектування, обстеження та реконструкції різноманітних трубопровідних систем.

Дослідження одно-, багатофазних потоків у фасонних елементах трубопровідних систем, в основному, виконуються експериментально в лабораторних умовах шляхом візуалізування потоків у прозорих фітингах [1–3]. Їх результатами є структура потоку [4–6], емпіричні залежності, значення емпіричних коефіцієнтів, які уточнювали теоретично виведені залежності [7–9]. Однак фізична картина потоку в фасонних елементах трубопроводів є складною, тривимірною і її важко дослідити експериментально; до того ж експериментальні дослідження мають багато недоліків. Більшість із отриманих емпіричних залежностей, емпіричних коефіцієнтів стосуються тільки конкретних досліджуваних режимів роботи трубопроводу, геометричних параметрів фасонних елементів і не є універсальними. В реальних умовах роботи трубопроводів, особливо магістральних газопроводів, нафтопроводів, такі експерименти виконати взагалі неможливо.

Величина втрат тиску, гідравлічної енергії потоку в фасонних елементах трубопровідних систем визначається за коефіцієнтами місцевих опорів  $\zeta$ . Значення коефіцієнтів місцевих опорів фасонних елементів наведені в довідниках [4, 10–12]. Однак на практиці зустрічаються випадки, коли для певної геометричної форми елемента трубопровідної системи, певного напрямку руху потоку фасонним елементом у довіднику немає потрібного значення коефіцієнта місцевого опору,

тому потрібні додаткові дослідження для їх визначення. Розрахункові формули для визначення коефіцієнтів місцевих опорів фасонних елементів, наведені в літературних джерелах [4, 8, 13–16], є наближеними, оскільки більшість із них отримана розв'язанням рівняння збереження імпульсу і рівняння збереження енергії з певними припущеннями. А експериментально визначені значення поправних коефіцієнтів не є універсальними і не в повному обсязі враховують усі можливі на практиці параметри. Порівняно з розрахунками однофазних потоків розрахункові формули для визначення коефіцієнтів місцевих опорів фасонних елементів, якими рухаються двофазні потоки [17, 18], надзвичайно складні, також не є точними через прийнятий ряд припущень і до того ж не враховують структури двофазних потоків.

Якісно нового рівня дослідження гідрогазодинамічних процесів у фасонних елементах трубопроводів можна досягти Computational fluid dynamics (CFD) моделюванням у сучасних програмних комплексах. Таке моделювання найбільш наближене до реальності, і можна в деталях вивчати складний тривимірний розподіл усіх параметрів потоку в внутрішній порожнині фасонних елементів. На сьогодні результатів CFD моделювань потоків у фасонних елементах трубопровідних систем надзвичайно мало в літературних джерелах і, в основному, вони стосуються відводів і приточних або витяжних трійників водопроводів чи пневмопроводів малих діаметрів [19–22].

У нормативних документах (НД) із обстеження лінійної частини, технологічних об'єктів трубопровідних систем [23–28] немає чітко вказаних місць обстеження фасонних елементів на ерозійне зношування, які б були визначені шляхом детального дослідження руху багатофазних потоків фасонними елементами трубопроводів.

Правильно вибрати модель для розрахунку швидкості ерозійного зношування стінки фасонних елементів трубопроводів надзвичайно важко, оскільки таких моделей є велика кількість [29–36], але не всі вони враховують усі параметри процесу. Значна кількість моделей ерозійного зношування була розроблена на основі експериментальних досліджень, і вони не є універсальними,

а стосуються конкретних умов роботи або геометричних параметрів. На сьогодні недостатньо інформації щодо ерозійного зношування фасонних елементів трубопровідних систем різноманітного призначення особливо газонафтопроводів в умовах яких виконувати експериментальні дослідження надзвичайно важко, а в багатьох випадках неможливо.

В існуючих методиках розрахунку НДС фасонних елементів трубопровідних систем [37–39] не зазначено, як визначати величини напружень у місцях різкої зміни геометрії таких елементів, де напруження мають максимальні значення. Практично в усіх аналітичних [40, 41], чисельних [42–46], експериментальних, у лабораторних умовах [47], дослідженнях НДС дефектних фасонних елементів геометрична форма їх ерозійних, корозійних дефектів надзвичайно спрощена (ідеалізована до сферичної чи прямокутної).

Аналітичні, чисельні, експериментальні дослідження в літературних джерелах стосуються окремих процесів, які відбуваються у фасонних елементах, – гідрогазодинамічних чи ерозійного зношування або НДС. Спроб зробити синергію цих процесів, поєднати їх у єдину цілісну фізичну картину на сьогодні не зроблено.

**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 тема ІФНТУНГ 2018 – 2021 роки, номер державної реєстрації 0118U007132).

Також дисертаційна робота виконана у відповідності з планом науково-дослідної роботи ДЗ 77/2019 “Розроблення екологічно безпечної технології контролю структури та складу газорідинних потоків” (держбюджетна науково-дослідна робота ІФНТУНГ 2019 – 2020 роки, номер державної реєстрації 0119U002939) і науково-дослідної роботи № НДІ-126/20п-19 ДП “Науканафтогаз” “Розроблення національного стандарту з проектування, будівництва, контролю

якості та приймання робіт для газопроводів з гнучких композитних труб”.

**Мета і завдання дослідження.** Мета дисертаційної роботи полягає в розробленні наукових основ оцінювання енерговитратності та забезпечення працездатності складних трубопровідних систем шляхом досліджень особливостей руху однофазних і багатофазних потоків фасонними елементами, їх напружено-деформованого стану, процесів ерозійного зношування та ремонту.

**Завдання дисертаційної роботи:**

– проаналізувати сучасні підходи та результати досліджень щодо забезпечення ефективності функціонування та безаварійності складних трубопровідних систем;

– визначити закономірності газодинамічних процесів, втрат гідравлічної енергій трубопровідних потоків у фасонних елементах;

– визначити та дослідити траєкторії руху дисперсних фаз фасонними елементами трубопроводів;

– визначити закономірності впливу геометричних параметрів фасонних елементів трубопроводів, режимних параметрів транспортування та характеристик дисперсних фаз на місцезнаходження та інтенсивність ерозійного зношування таких елементів;

– дослідити вплив ерозійного зношення фасонних елементів трубопровідних систем на їх напружено-деформований стан;

– розробити технологію безтраншейного ремонту складних трубопровідних систем, які містять декілька дефектних відводів.

**Об’єкт дослідження** – процеси транспортування газоподібних та рідких речовин складними трубопровідними системами.

**Предмет дослідження** – динаміка руху однофазних і багатофазних потоків та її вплив на втрати гідравлічної енергії і працездатність фасонних елементів трубопровідних систем.

**Методи дослідження.** Виконані в роботі дослідження базуються на застосуванні 3D моделювання фасонних елементів складних трубопровідних систем, CFD (Computational Fluid Dynamics – обчислювальна гідродинаміка)

моделюванні з застосуванням скінченно-об'ємних методів розв'язання рівнянь гідрогазодинаміки, ейлерової моделі Mixture (модель багатофазної суміші), лагранжевої моделі DPM (Discrete Phase Model – модель дисперсної фази), моделі Фінні (модель ерозійного зношування). Чисельне моделювання напружено-деформованого стану фасонних елементів трубопровідних систем було виконане методом скінченних елементів. Виконувалась візуалізація результатів моделювання та системний аналіз структури однофазних, багатофазних потоків у фасонних елементах трубопроводів, ерозійного зношування і напружено-деформованого стану їх стінки. Математична модель, яка описує напружено-деформований стан ерозійно-корозійно зношених відводів трубопроводів, містить систему рівнянь рівноваги в рамках лінійної теорії крученості, яка була зведена до одного рівняння, що є основним рівнянням задачі Ламе. Для експериментального визначення місць та інтенсивності ерозійного зношування фасонних елементів було виготовлено експериментальну установку та виконано ультразвукові вимірювання фактичної товщини стінки відводів і трійників магістральних газопроводів. Здійснено математичне моделювання й експериментальні дослідження процесу протягування поршнем рукава трубопроводом, який містить ерозійно чи корозійно зношений відвід. Застосовувались методи математичного планування і виконання експериментів та обробки їх результатів. Основні висновки роботи узгоджуються з відповідними даними теоретичних та експериментальних досліджень.

3D моделювання фасонних елементів виконано в системі автоматизованого проектування і креслення AutoCAD. CFD моделювання однофазних, багатофазних потоків, ерозійного зношування було виконано в програмному комплексі ANSYS Fluent Academic. Чисельне моделювання напружено-деформованого стану в програмному комплексі ANSYS Static Structural Academic.

**Наукова новизна** одержаних результатів полягає в отриманні якісно нових результатів щодо впливу динамічних процесів у внутрішній порожнині складних трубопровідних систем на їх енерговитратність, працездатність та визначається такими положеннями:

– вперше:

а) визначено закономірності впливу геометричних параметрів фасонних елементів трубопровідних систем, напрямків руху ними двофазних потоків (для трійників) на траєкторії руху дисперсних фаз, що дало змогу визначити основні параметри, які впливають на процеси їх ерозійного зношування (місця вдарення дисперсних фаз у стінку, кути атаки, швидкість, діаметри дисперсних фаз у місці удару);

б) встановлено закономірності між місцезнаходженням, інтенсивністю ерозійного зношування фасонних елементів газопроводів і їх геометричними параметрами, режимними параметрами транспортування та характеристиками і концентрацією дисперсних фаз, що дозволило визначити місця обстежень фасонних елементів на ерозійне зношування, побудувати тривимірні геометричні моделі ерозійних дефектів;

в) встановлено закономірності впливу глибини ерозійних дефектів фасонних елементів трубопроводів на їх напружений стан, визначено зони потенційного ризику втрати міцності та допустиму глибину ерозійних дефектів, розроблено алгоритм 3D-моделювання фасонних елементів трубопроводів зі складною об'ємною геометричною формою їх ерозійних дефектів, що дає змогу оцінити працездатність таких елементів, визначити їх залишковий ресурс;

г) запропонована, науково обґрунтована та якісно підтверджена порівнянням із результатами чисельного моделювання розрахункова залежність для визначення кільцевих напружень, які виникають у стінці ерозійно чи корозійно зношених відводів трубопроводів, що дозволило розробити покроковий алгоритм оцінювання їх міцності;

д) встановлено закономірності зміни тиску компресора під час протягування поршнем рукава трубопроводом, який містить ерозійно чи корозійно зношені відводи на основі яких розроблена технологія безтраншейної реконструкції складних трубопровідних систем;

– удосконалена методологія оцінювання енерговитратності фасонних елементів трубопроводів із урахуванням їх геометричних параметрів, режимних

параметрів транспортування, характеристик дисперсних фаз та визначено залежність між цими параметрами та коефіцієнтами місцевих опорів, втратами тиску двофазних потоків у таких елементах;

– набуло подальшого розвитку вивчення закономірностей газогідродинамічних процесів у фасонних елементах трубопровідних систем, розширені наукові знання про турбулентні процеси, розподіл тиску, швидкості, кінетичної енергії турбулентності, об'ємних часток суцільної і дисперсної фази у їх внутрішній порожнині.

Сукупність одержаних наукових результатів складає наукові основи оцінювання енерговитратності та забезпечення працездатності складних трубопровідних систем.

**Практичне значення одержаних результатів.** Результати досліджень є корисними для проектування мінімально енерговитратних і стійких до ерозійного зношування складних трубопровідних систем та керування їх енерговитратністю. Також отримані результати дають змогу своєчасно визначити місцезнаходження, геометричні параметри та динаміку ерозійного зношування фасонних елементів трубопровідних систем, значно якісніше та ґрунтовніше їх обстежувати, підходити до оцінювання міцності, визначення періодичності обстеження, прогнозувати їх стан та визначати залишковий ресурс із метою планування ремонтних робіт.

Розроблено комплексну галузеву методику технічного діагностування та розрахунку міцності фасонних елементів трубопровідних систем, яку впроваджено в Науково-виробничому центрі технічної діагностики “Техдіагаз” АТ “Укртрансгаз” НАК “Нафтогаз України”. Також розроблено методику розрахунку напружено-деформованого стану балкових систем надземних переходів, яку впроваджено в ТОВ “ЕКСПРЕС-ГАЗБУД”.

Виконані в дисертаційній роботі теоретичні й експериментальні дослідження дали змогу розробити нову техніку та технологію безтраншейної реконструкції складних трубопровідних систем, які містять декілька дефектних відводів, рукавом чи гнучкими композитними трубами. Розроблена технологія промислово апробована та впроваджена у СП “Київські теплові мережі” КП “Київтеплоенерго”



РТМ “Печерськ”. Основні розроблені положення щодо безтраншейного ремонту ерозійно чи корозійно зношених відводів трубопроводів гнучкими композитними трубами включені в національний стандарт України ДСТУ 9003:2020 “Технологія будівництва магістральних і промислових трубопроводів із гнучких композитних труб. Загальні технічні вимоги”.

Результати досліджень використовуються в навчальному процесі кафедри газонафтопроводів та газонафтосховищ Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу під час викладання дисциплін “Ремонт зосереджених об'єктів газонафтопроводів”, “Спорудження зосереджених об'єктів газонафтопроводів”, “Спорудження магістральних трубопроводів” для студентів спеціальності 185 – “Нафтогазова інженерія та технології”.

#### **Особистий внесок здобувача.**

Безпосередньо автором виконано:

– інформаційний пошук та аналіз літературних даних за темою дисертації;  
– досліджено структуру однофазних потоків, закономірності газогідродинамічних процесів, втрат гідравлічної енергії у фасонних елементах трубопровідних систем [48–55];

– досліджено залежність втрат енергії двофазних потоків у фасонних елементах трубопровідних систем від режимних параметрів транспортування, характеристик дисперсних фаз і геометричних параметрів досліджуваних елементів, визначено та досліджено траєкторії руху дисперсних фаз такими елементами [56–65];

– досліджено процеси ерозійного зношування фасонних елементів трубопровідних систем, встановлено закономірності між траєкторіями руху дисперсних фаз, геометричними параметрами елементів, режимними параметрами транспортування, характеристиками дисперсних фаз і місцезнаходженням й інтенсивністю ерозійного зношування досліджуваних елементів [66–76];

– досліджено НДС фасонних елементів трубопроводів із урахуванням газодинамічних процесів у їх внутрішній порожнині, температурного перепаду в стінках та ерозійних дефектів складної геометричної форми. Встановлено

закономірності впливу глибини ерозійних дефектів на величину максимальних напружень у стінці фасонних елементів [77–87];

– встановлено закономірності зміни тиску під час протягування поршнем рукава трубопроводом, який містить ерозійно чи корозійно зношений відвід; розроблено технологію ремонту дефектних відводів складних трубопровідних систем [88–103].

У наукових працях, опублікованих у співавторстві, дисертанту належить фактичний матеріал і основний творчий доробок. Автор виконав планування і всі експериментальні дослідження, здійснив аналіз їх результатів, брав безпосередню участь у промисловій апробації та впровадженні результатів дисертаційної роботи у виробництво. Всі наукові узагальнення, положення, результати, висновки та рекомендації, викладені в дисертації, виконані автором особисто.

#### **Апробація результатів дисертації.**

Основні положення роботи викладено й обговорено на наукових конференціях різного рівня: Міжнародній науково-технічній конференції “Проблеми і перспективи транспортування нафти і газу” (м. Івано-Франківськ, 15–18 травня 2012 р.); одинадцятій Міжнародній навчально-науковій-практичній конференції “Трубопровідний транспорт – 2016” (м. Уфа, 24–25 травня 2016 р.); шістнадцятій Всеукраїнській науково-технічній конференції “Актуальні проблеми енергетики та екології” (м. Одеса, 5–8 жовтня 2016 р.); восьмій Всеукраїнській практично-пізнавальній конференції “Наукова думка сучасності і майбутнього” (м. Дніпро, 30 січня – 7 лютого 2017 р.); шостій Міжнародній науково-технічній конференції “Нафтогазова енергетика–2017” (м. Івано-Франківськ, 15–19 травня 2017 р.); двадцять дев’яतій науковій сесії наукового товариства ім. Шевченка (м. Львів, 31 березня 2018 р.); шостій Міжнародній науковій конференції “Науковий прогрес у європейських країнах: нові концепції та сучасні рішення” (м. Штутгарт, 19 квітня 2019 р.); Міжнародній науково-технічній конференції “Нафтогазова енергетика” (м. Івано-Франківськ, 27–31 травня 2019 р.); Міжнародній науково-технічній конференції “Пошкодження матеріалів під час експлуатації, методи його діагностування і прогнозування” (м. Тернопіль, 24–27 вересня 2019 р.); п’ятій

Міжнародній науково-практичній конференції “Актуальні питання розвитку сучасної науки” (м. Софія, 15–17 січня 2020 р.); Міжнародній науково-практичній конференції “Теоретичні та практичні аспекти розвитку науки та освіти” (м. Львів, 22–23 січня 2020 р.); Міжнародній науково-технічній конференції імені професора Михальова О. І. “Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні ІТММ’2020” (м. Дніпро, 17–19 березня 2020 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 2020 році.

**Публікації.** За темою дисертаційної роботи опубліковано 45 друкованих праць, із яких: 6 – у міжнародних наукових журналах, що індексуються у наукометричних базах даних Scopus, Web of Science; 1 – розділ у колективній монографії, опублікованій у зарубіжному виданні; 24 – у наукових фахових виданнях; 2 – патенти на корисну модель; 12 – у збірниках матеріалів і тез доповідей на міжнародних і всеукраїнських конференціях.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертаційна робота містить вступ, шість розділів, загальні висновки, список використаних джерел та чотири додатки. Роботу викладено на 405 сторінках машинописного тексту, обсяг основного тексту дисертації складає 300 сторінок. Роботу проілюстровано 139 рисунками та 10 таблицями. Список використаних джерел містить 322 найменування, із яких 161 кирилицею та 161 латиницею.

## РОЗДІЛ 1

# АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ПІДХОДІВ ТА РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ ЩОДО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ ТА БЕЗАВАРІЙНОСТІ СКЛАДНИХ ТРУБОПРОВІДНИХ СИСТЕМ

Виконано аналіз підходів і результатів дослідження динаміки руху однофазних, багатофазних потоків фасонними елементами складних трубопроводних систем, втрат у них гідравлічної енергії, структури потоків у цих елементах. Проаналізовано існуючі механізми та моделі ерозійного зношування стінки фасонних елементів трубопроводів, розглянуто результати досліджень процесів ерозійного зношування таких елементів. Виконано аналіз результатів дослідження НДС фасонних елементів трубопроводних систем і НДС таких елементів із різноманітними дефектами стінки.

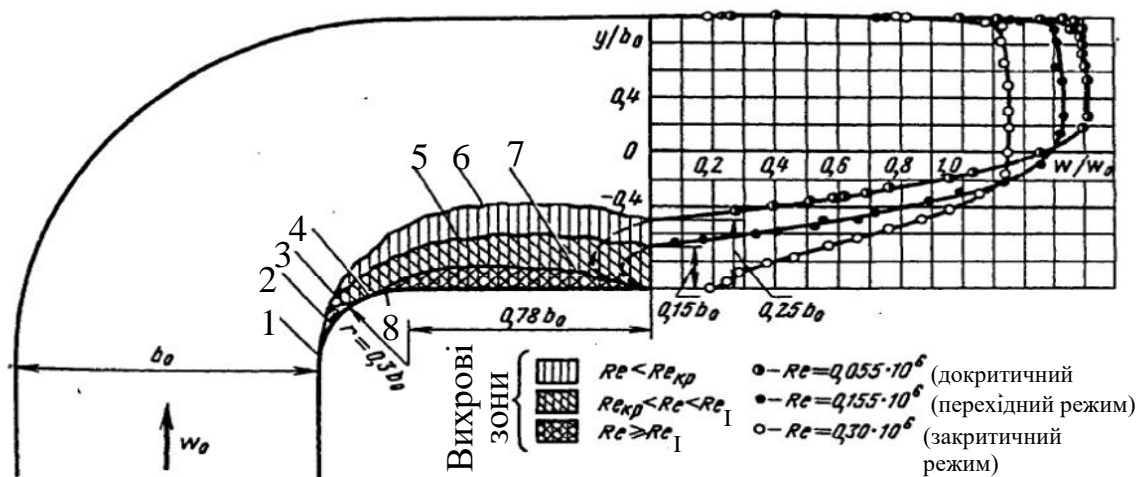
### **1.1 Особливості руху однофазних потоків фасонними елементами трубопроводів**

Теоретичні основи проектування складних трубопроводних систем із урахуванням газогідродинамічних процесів, втрат гідравлічної енергії в фасонних елементах складної заклали Бобровський С. А. [104, 105], Галіулін З. Т. [106], Гончарук М. І. [107], Грудз В. Я. [108], Євдокімов А. Г. [109, 110], Середюк М. Д. [111–113], Сухарев М. Г. [114–116]

Рух потоків у відводах трубопроводів досліджується як експериментально, так і шляхом розрахунку газодинамічних процесів у цих елементах [6, 117, 118]. Значні зусилля затрачено для експериментального вивчення потоків у відводах трубопроводів реактивних гідротурбін [119–121].

Під час руху потоку відводом трубопроводу з певним кутом вигину  $\varphi$  у результаті зміни напрямку потоку утворюється складна фізична картина руху. Відбувається перебудова профілю швидкостей у повздовжньому та поперечному перерізі. Можлива поява зон відривання потоку від стінки [122, 123]. У результаті

зміни напрямку руху потоку виникають відцентрові сили. Цим обумовлено підвищення тиску біля опуклого боку та зниження біля ввігнутого. Тому швидкість потоку, відповідно, буде меншою біля опуклого боку і більшою біля ввігнутого. Перехід потоку з відводу в прямолінійну ділянку трубопроводу супроводжується зворотним ефектом. При цьому відбувається відривання потоку від ввігнутої стінки відводу, яке посилюється інерцією. Зона вихорів, яка утворюється в результаті відривання потоку від стінки з опуклого боку відводу розповсюджується вперед, суттєво зменшує поперечний переріз основного потоку. Найбільша частина втрат тиску в відводі зумовлена утворенням вихорів біля вгнутої стінки. [4] Величина зони вихорів у відводі залежить від режиму течії. При малих числах Рейнольдса, до  $10^5$  пристінний шар потоку ламінарний, тому зона вихорів, яка утворюється в результаті відривання потоку від стінки у відводі, є найбільшою (рисунок 1.1). Турбулентність відірваного пристінного шару призводить до посилення обміну кількістю руху між окремими частинками потоку, зумовлює звуження зони вихорів і, як, наслідок, розширення потоку (рисунок 1.1). [124]



1 – точка ламінарного відривання; 2 – “мертва” зона; 3 – точка переходу; 4 – точка прилипання шару, який відірвався; 5 – турбулентне розширення шару, який відірвався; 6, 7 – нижня межа відповідно ламінарного та турбулентного шарів, які відірвались; 8 – точка турбулентного відриву

**Рисунок 1.1** – Схема відривання потоку від ввігнутого боку відводу трубопроводу та розподіл швидкостей по середній лінії перерізу відводу з гладкими стінками при різних режимах течії

Під час руху частинки  $M$  криволінійною траєкторією на неї діє відцентрова сила інерції  $dF_o$ , яка рівна

$$dF_o = \left( \frac{v_\theta^2}{r} \right) dm = \rho \cdot r \cdot d\varphi \cdot dr \left( \frac{v_\theta^2}{r} \right), \quad (1.1)$$

де  $v_\theta$  – швидкість частинки;

$r$  – радіус криволінійної ділянки;

$\rho$  – густина частинки.

У відводі виникає поперечний перепад тиску  $\Delta p$ , направлений від опуклого боку  $AB$  до ввігнутого боку  $DE$  відводу і забезпечує поперечну рівновагу частинок. Сила  $dR$ , яка зрівноважує відцентрову силу інерції  $dF_o$ , визначається добутком перепаду тисків  $\Delta p$  на площу  $S$ .

Таким чином, наближено умову радіальної рівноваги можна записати:

$$dp = \rho \cdot v_\theta^2 \left( \frac{dr}{r} \right). \quad (1.2)$$

Звідки, використовуючи рівняння Ейлера для одновимірного потоку,

$$dp = -\rho \cdot v_\theta dv_\theta, \quad (1.3)$$

$$2 \cdot \pi \cdot r \cdot v_\theta = \Gamma_0 = const, \quad (1.4)$$

де  $\Gamma_0$  – циркуляція швидкості, постійна для всіх ліній потоку. [7]

Теоретично турбулентні потоки у відводах трубопроводів розраховують, вирішуючи сукупно рівняння руху і нерозривності потоку. Ці рівняння утворюють невизначену систему, і для її вирішення треба записати шість додаткових рівнянь, які встановлюють зв'язок для десяти невідомих: трьох компонентів середньої

швидкості, середнього тиску і шести турбулентних навантажень що є надзвичайно складно. Тому отримання визначених систем рівнянь для окремих зон потоку в відводах є надзвичайно складною задачею.

Структура потоку в трійниках трубопровідних систем залежить від багатьох чинників, є складною і її важко дослідити експериментально, розрахувати теоретично. Чинниками, які суттєво впливають на газодинамічні процеси в трійниках, є напрямки руху потоку трійниками, геометрична форма та геометричні параметри трійників, співвідношення витрат магістраллю і відгалуженням трійника, режимні параметри транспортування.

Для прикладу, в витяжних трійниках на початку відгалуження трійника утворюється велика вихрова зона. У результаті відбувається відривання потоку від стінки, значне падіння тиску в відгалуженні трійника. Великий градієнт тиску зумовлює часткове відривання потоку від протилежної відгалуженню трійника стінки магістралі трійника. Обидві зони відривання потоку від стінки спричиняють місцеве стискання потоку як в відгалуженні, так і в магістралі трійника. [125] Розподіл швидкостей у повздовжньому і поперечних перерізах рівнопрохідного трійника, отриманий експериментально в [5], наведений на рисунку 1.2.

Фізична картина потоку в відводах, трійниках є складною, тривимірною та неоднозначною, і її досить важко вивчити експериментально; до того ж цей метод має ряд недоліків (невідповідність режимних, геометричних параметрів реальним, складність зміни геометричних параметрів). У реальних умовах трубопроводів, особливо магістральних, такі експерименти виконати взагалі неможливо.

У фасонних елементах трубопроводів відбуваються додаткові втрати гідравлічної енергії потоку через зміну напрямку його руху, зміну величини швидкості потоку та турбулентність. За визначеними експериментально чи чисельним моделюванням втратами тиску в фасонних елементах трубопроводів, а також теоретичним шляхом визначають коефіцієнти втрат енергії  $K$  (або їх ще називають коефіцієнтами місцевих опорів  $\zeta$ ). Значення коефіцієнтів місцевих опорів фасонних елементів наведені в довідниках [4, 11–13] за винятком окремих випадків, які зустрічаються на практиці, тому потрібні додаткові дослідження для

визначення цих коефіцієнтів. Коефіцієнти місцевих опорів не залежать від транспортованого середовища, а визначаються тільки геометричною формою та геометричними параметрами фасонних елементів трубопроводів [4].

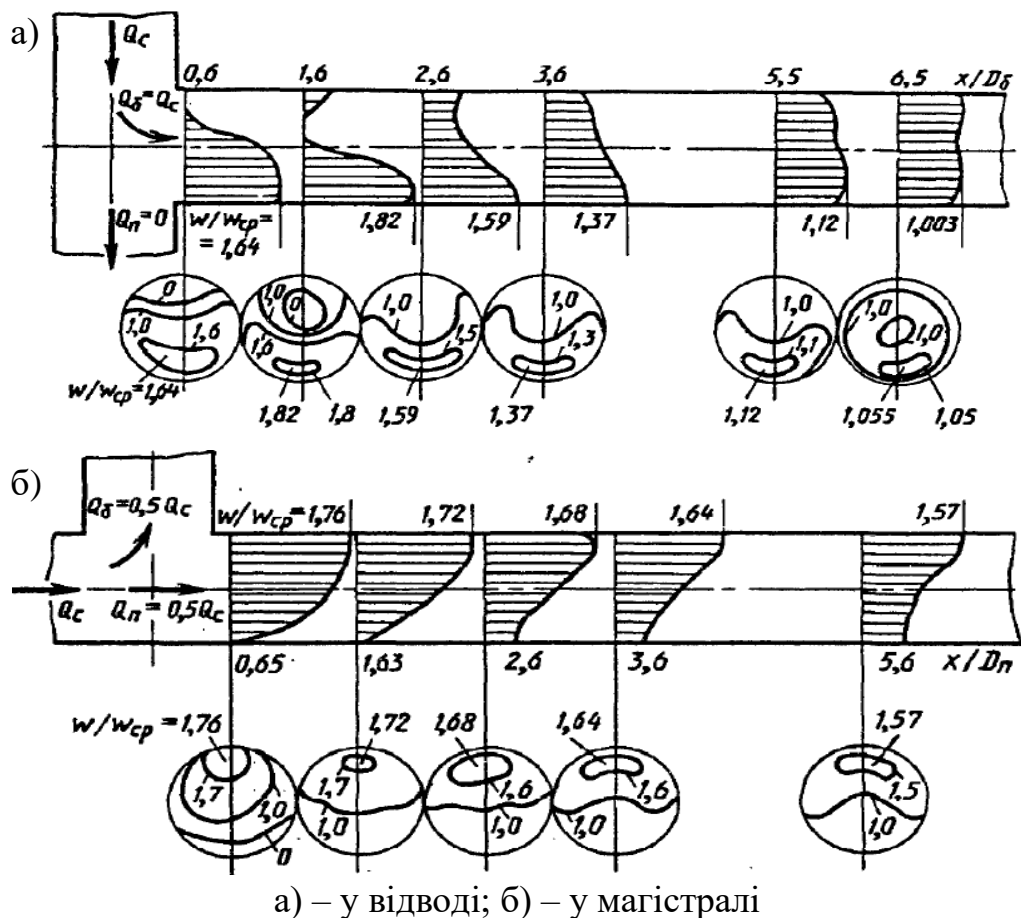


Рисунок 1.2 – Профілі і поля швидкостей у рівнопрохідному трійнику

Згідно з [126] коефіцієнт місцевого опору відводу рівний

$$\xi = \frac{\Delta P}{\frac{\rho V^2}{2}} = A_1 B_1 \quad (1.5)$$

де  $\Delta P$  – втрачений у відводі тиск (падіння тиску у відводі);

$\rho$  – густина транспортованого продукту;

$V$  – швидкість потоку;

$A_1$  – коефіцієнт, який враховує вплив кута вигину відводу;

$B_1$  – коефіцієнт, який враховує вплив відношення радіуса вигину відводу  $R_B$  до



діаметра відводу  $D_B$ .

За [8] величина коефіцієнта, який враховує вплив кута вигину відводу, рівна  $A_I=1$  (для кута вигину відводу  $\varphi=90^\circ$ ) і  $A_I=0,9\sin\varphi$  (для кута вигину відводу  $\varphi<70^\circ$ ).

Коефіцієнт, який враховує вплив відношення радіуса вигину відводу до діаметра відводу, рівний  $B_1 = \frac{0,21}{\left(\frac{R_B}{D_B}\right)^{0,25}}$  (якщо  $\frac{R_B}{D_B} < 1$ ) чи  $B_1 = \frac{0,21}{\sqrt{\frac{R_B}{D_B}}}$  (якщо  $\frac{R_B}{D_B} \geq 1$ ).

Якщо  $\frac{R_B}{D_B} \geq 3$  коефіцієнт місцевого опору відводу є функцією числа Рейнольдса, шорсткості та геометричних параметрів відводу, то

$$\xi = 0,0175\varphi\lambda_B \frac{R_B}{D_B}, \quad (1.6)$$

де  $\lambda_B$  – коефіцієнт гідравлічного тертя відводу. [14]

У [15, 127] для розрахунку коефіцієнтів місцевого опору відводів запропонована наступна формула

$$\xi = 2\tau(1 - \cos \varphi) = 4\tau \sin^2 \frac{\varphi}{2}, \quad (1.7)$$

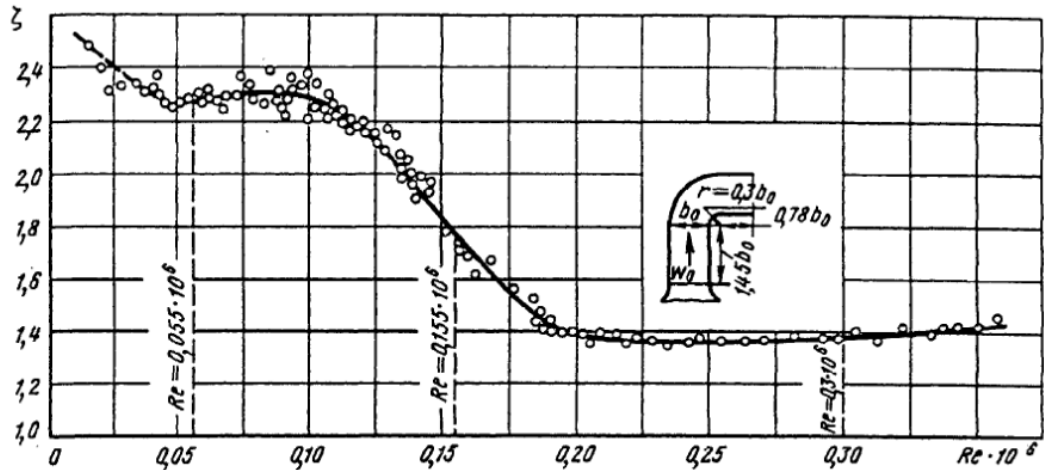
де  $\tau$  – визначений експериментально поправний коефіцієнт (рекомендовано  $\tau$  приймати рівним 0,55).

При великих числах Рейнольдса у [16] для розрахунку коефіцієнтів місцевого опору відводів запропонована наступна формула

$$\xi = 0,05 + 0,19 \frac{D_B}{R_B}. \quad (1.8)$$

При великих числах Рейнольдса ( $Re > 2 \cdot 10^5$ ) коефіцієнт місцевого опору відводу є практично сталим. Чим менше число Рейнольдса, тим його вплив більший

(рисунок 1.3). [4]



**Рисунок 1.3** – Залежність коефіцієнта повного опору відводу від числа Рейнольдса для відводу з кутом вигину 90° і гладкими стінками

Результати розрахунків за формулами (1.5) – (1.8) дещо відрізняється; причинами цього є експериментально визначені поправочні коефіцієнти, а експериментальні дослідження мають ряд недоліків.

Втрати гідравлічної енергії в трійниках залежать від напрямків руху потоку трійниками, їх геометричної форми та геометричних параметрів, співвідношення витрат магістралю і відводом трійника, режимних параметрів транспортування.

Для прикладу втрати гідравлічної енергії в витяжних трійниках, в основному, складаються з втрат зумовлених раптовим розширенням у місці розділення потоку, втрат на зміну напрямку частини потоку в результаті його перетікання у відгалуження трійника [4].

Коефіцієнти місцевих опорів трійників визначають теоретично [18, 128–130] й експериментально [131–133]. За отриманими результатами експериментів уточнювались теоретично виведені формули. [4, 9, 17, 134–136]. До прикладу, для зварних витяжних трійників коефіцієнт місцевого опору для відгалуження рівний

$$\xi_{м.в} = \frac{\Delta P_{м.в}}{\rho V_в^2} = A \left( 1 + \left( \frac{V_в}{V_м} \right)^2 - 2 \left( \frac{V_{м.1}}{V_м} \right)^2 - 2 \frac{F_в}{F_м} \left( \frac{V_в}{V_м} \right) \right) + K_б, \quad (1.9)$$

де  $\Delta P_{m.6}$  – падіння тиску між входом у магістраль трійника і виходом з відгалуження трійника;

$V_m$  – швидкість потоку в магістралі трійника до його розходження;

$V_{m.1}$  – швидкість потоку в магістралі трійника після його розходження;

$V_6$  – швидкість потоку в відгалуженні трійника;

$A$ ,  $K_6$  – поправочні коефіцієнти, значення яких отримані після опрацювання результатів експериментів наведених у [9].

Для магістралі трійника

$$\xi_m = \frac{\Delta P_m}{\frac{\rho V_m^2}{2}} = 1 - \left(1 - \frac{Q_6}{Q_m}\right)^2 - \left(1,4 - \frac{Q_6}{Q_m}\right) \left(\frac{Q_6}{Q_m}\right)^2 - 2K_{II} \frac{F_m}{F_6} \frac{Q_6}{Q_m}, \quad (1.10)$$

де  $\Delta P_m$  – падіння тиску в магістралі трійника;

$Q_6$  – витрата у відгалуженні трійника;

$Q_m$  – витрата в магістралі трійника;

$K_{II}$  – поправочний коефіцієнт, який залежить від співвідношення площі відгалуження і магістралі трійника.

Гідравлічний опір трійників можна зменшити, якщо заокруглити перехід від відгалуження до магістралі трійника [137, 138].

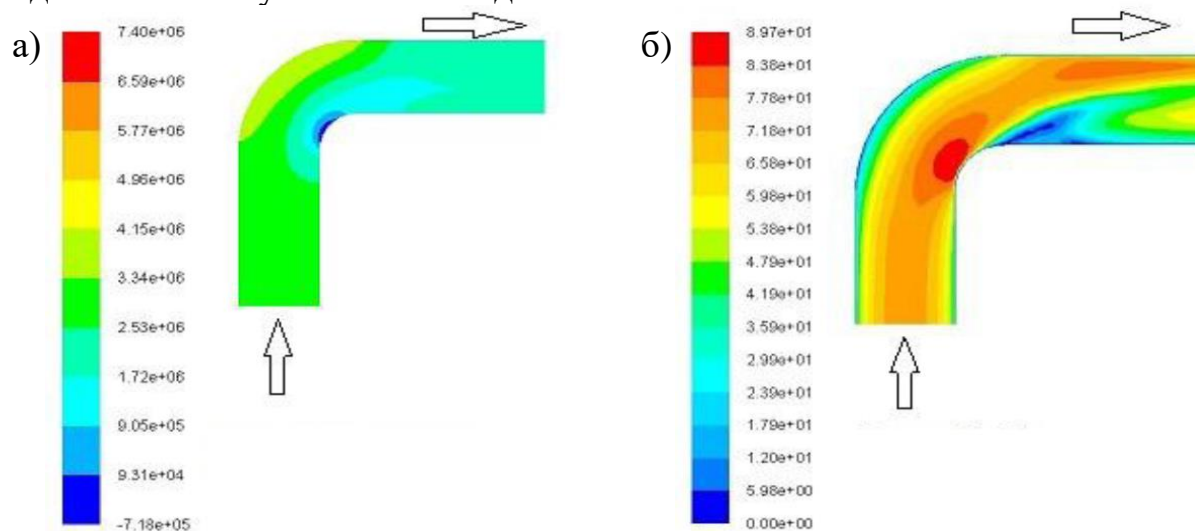
Згідно з викладеними в [139, 140] дослідженнями, як і для відводів трубопроводів, при великих числах Рейнольдса ( $Re > 10^5$ ) коефіцієнти місцевого опору трійників є сталими.

Вивчаючи розроблені теоретичні методи розрахунку місцевих опорів фасонних елементів трубопроводів, було помічено, що загальним для усіх них є розв'язання двох рівнянь – рівняння збереження імпульсу та рівняння збереження енергії. В результаті розв'язування цих рівнянь із певними припущеннями отримують розрахункові формули для наближеного визначення коефіцієнтів місцевих опорів фасонних елементів. Тоді пов'язують між собою розрахунково

визначені значення коефіцієнтів місцевих опорів із їх експериментально визначеними значеннями додаванням у формули поправочних коефіцієнтів, які не є універсальними. Своєю чергою експериментальні дослідження також мають ряд недоліків і не в повному обсязі враховують усі можливі практичні параметри.

Детально дослідити динаміку руху потоків фасонними елементами трубопроводів, їх енерговитратність можна CFD моделювання. CFD моделювання тривимірних потоків рідин та газів можна виконати в програмних комплексах Ansys Fluent, Ansys CFX, Flow Vision, Flow 3D. CFD моделюванням тривимірних потоків рідин та газів останніми роками набуває все більшого поширення серед науковців оскільки значно збільшилась потужність комп'ютерної техніки, що суттєво зменшило час розрахунків, дало змогу розв'язувати складніші задачі.

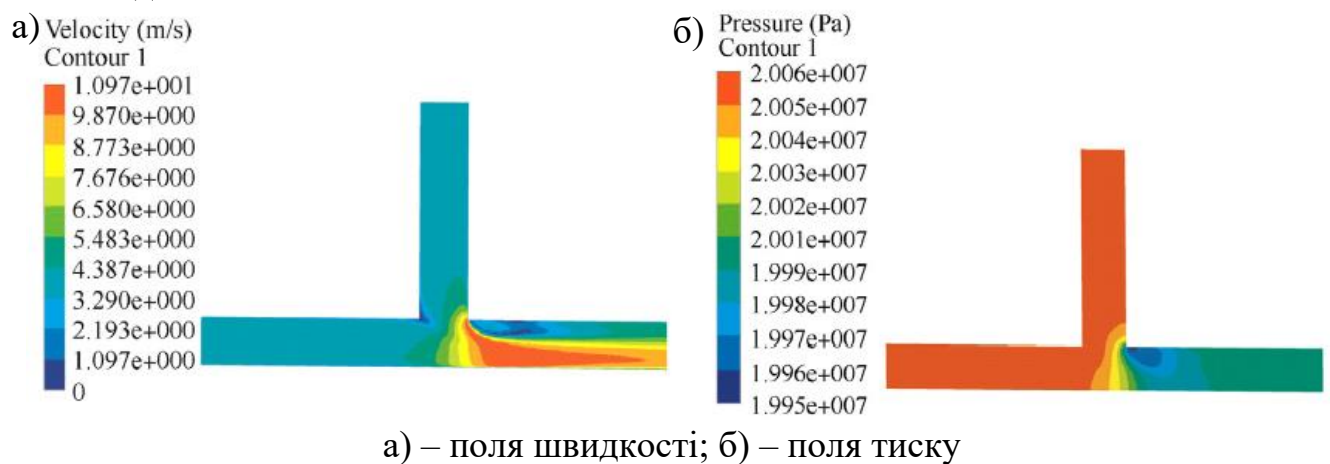
У [19, 141] виконано CFD моделювання гідрогазодинамічних процесів у відводах трубопровідних систем різноманітного призначення. За результатами моделювання отримувались поля розподілу тиску (рисунок 1.4, а), швидкості потоку (рисунок 1.4, б) у відводах. CFD моделюванням виконано дослідження залежності структури потоку у відводах, енерговитратності відводів від їх геометричних параметрів [20, 142, 143], числа Рейнольдса [19, 144], транспортованого продукту [20]. Встановлено, що поле тиску і швидкості потоку в відводі має незначну залежність від числа Рейнольдса при великих його значеннях.



а) – поля швидкості; б) – поля тиску

**Рисунок 1.4** – Результати CFD моделювання потоків у відводі трубопроводу

Також CFD моделюванням виконано ряд досліджень гідрогазодинамічних процесів у трійниках трубопровідних систем різноманітного призначення. Досліджувався вплив геометричної форми трійників [21, 22, 145, 146], співвідношення витрат відводом і магістраллю трійників [22, 146, 147], вибраної моделі турбулентності [148] на структуру потоку у трійниках (рисунок 1.5), втрати гідравлічної енергії. Отримані результати порівнювались із результатами теоретичних та експериментальних досліджень і було підтверджено достовірність CFD моделювання.



**Рисунок 1.5** – Результати CFD моделювання потоків у трійнику в якому відбувається зливання потоків

На сьогодні в літературних джерелах чисельних досліджень потоків у фасонних елементах трубопроводів надзвичайно мало. В основному вони стосуються відводів та приточних або витяжних трійників водопроводів чи пневмопроводів малих діаметрів. Такі результати не є повними, оскільки не охоплюють усі можливі комбінації напрямків потоку в трійниках, які зустрічаються у різноманітних трубопровідних системах, зокрема газонафтопровідних.

## **1.2 Аналіз досліджень руху багатофазних потоків фасонними елементами трубопроводів**

У внутрішній порожнині практично всіх не нових металевих трубопроводів,

не залежно від їх призначення, містяться різноманітні забруднення. У більшості випадків у трубопроводах має місце складна багатокомпонентна суміш забруднень різного походження: газовий конденсат, вода, мастило, продукти внутрішньотрубної корозії, будівельне сміття, винесені з свердловини частинки порід, окалина, яка відшарувалась від труб, парафіни, різні мінеральні солі, відклади шламу, пісок, ґрунт тощо.

В результаті обтікання твердих частинок потоком транспортованого продукту і через турбулентності виникає підймальна сила і відбувається зважування частинок і їх рух трубопроводом. Щоб частинки рухались трубопроводом потрібна необхідна для цього швидкість потоку. За наведеними в [149] дослідженнями мінімальна швидкість потоку, при якій тверді частинки будуть переміщуватись трубопроводом, залежить від властивостей речовини потоку, діаметра трубопроводу, тиску, густини та розміру частинок. Наприклад, при тиску 7 МПа мінімальна швидкість потоку для переміщення твердих частинок складає біля 3 м/с для трубопроводів діаметром 200 мм та 4,2 м/с для трубопроводів діаметром 1200 мм. Як тільки тверді частинки починають рухатись, рух буде тривати доти, поки витрата потоку не зменшиться або не буде збільшено тиск.

Smart J. і Winters R. визначили швидкість газового потоку в магістральному газопроводі, коли забруднення захоплюється і переноситься. Вони прийшли до висновку, що така швидкість коливається в межах від 3,2 м/с до 4,1 м/с. [150] При зниженні тиску мінімальна швидкість газу необхідна для переміщення твердих частинок газопроводом збільшується, що зумовлено зменшенням густини газу. [151]

Наявні у внутрішній порожнині газопроводів рідинні фази (вода, конденсат, мастила та інші вуглеводні) накопичуються в місцях пониження траси. Наведені в [152] експериментальні дослідження підтвердили, що рідкі накопичення під дією потоку газу деформуються і при швидкості потоку від 3,81 м/с до 6,12 м/с поступово переміщуються на висхідну ділянку зігнутої труби. При швидкості газового потоку 8,12 м/с відбувається відривання крапель рідини від загального об'єму і часткове їх винесення газовим потоком із понижених ділянок траси. Коли

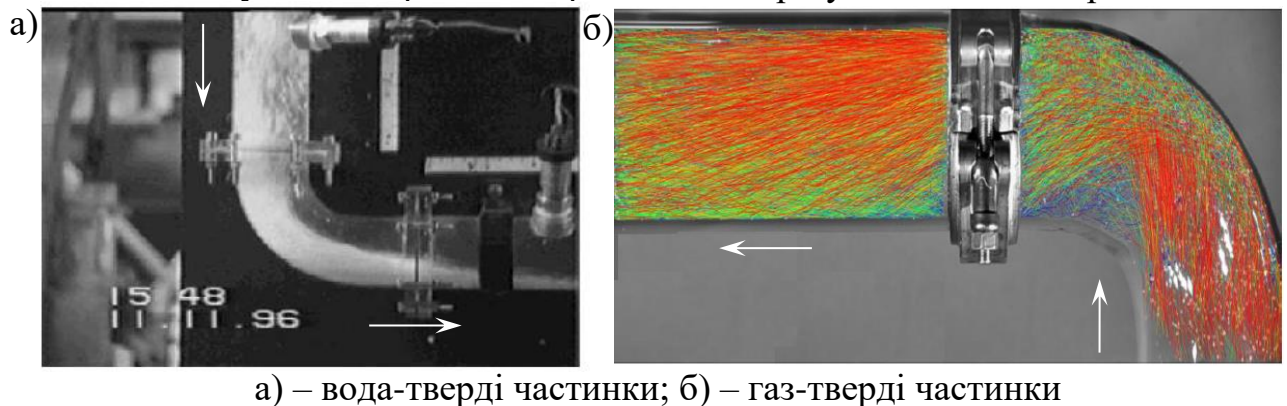
швидкість газового потоку склала 9,11 м/с, спостерігався рух рідинного скупчення в напрямку вектору швидкості газового потоку.

Перенесення твердих частинок або крапель рідини потоком транспортованої речовини, винесення газовим потоком рідких забруднень із понижених ділянок траси призводить до виникнення багатофазних потоків. Концентрацію твердих і рідких частинок у газопровідних потоках у режимі реального часу можна виміряти оптичним методом. Оптичний пристрій випромінює в газовий потік оптичні хвилі різної довжини в межах інфрачервоного діапазону. [153]

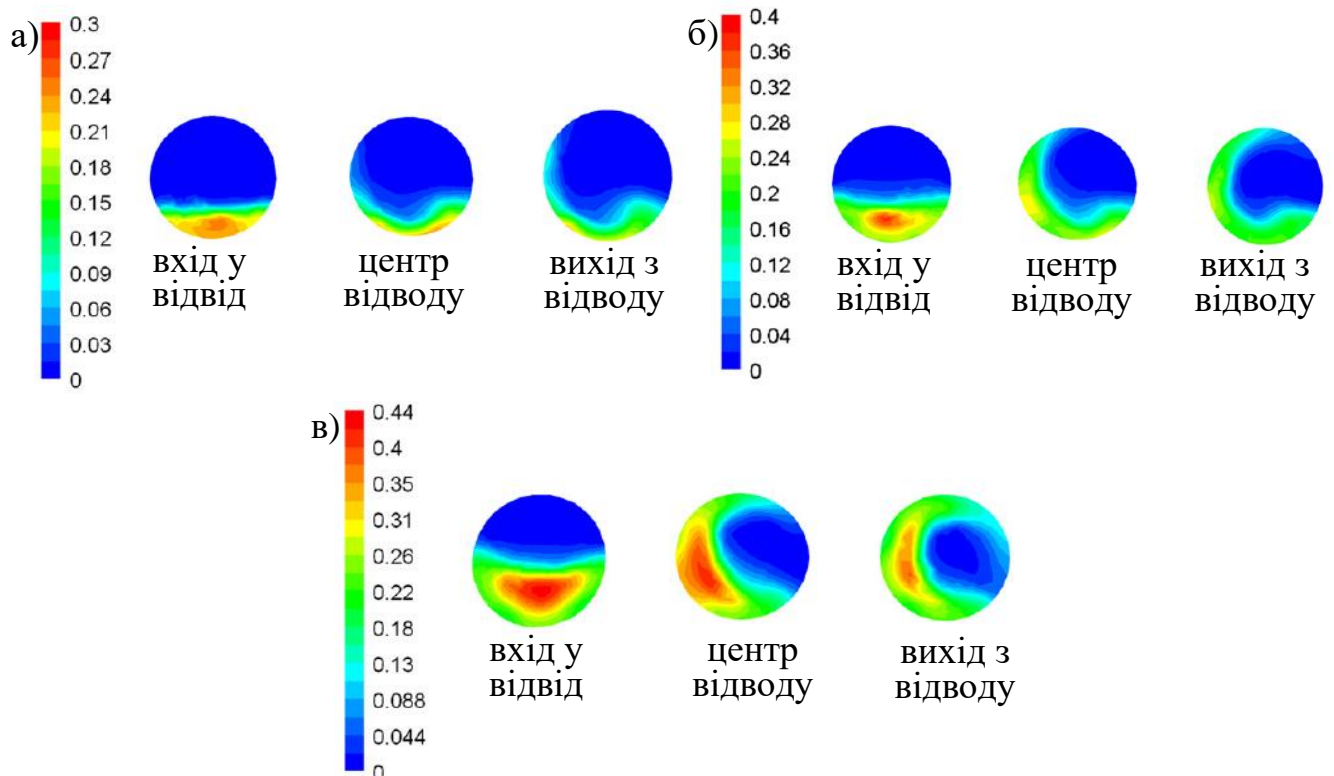
Під час руху багатофазного потоку елементами трубопровідних систем складної геометричної форми в результаті зміни напрямку потоку виникає відцентрова сила. Оскільки суцільна і дисперсна фаза мають різні густини, то дія відцентрової сили на фазу більшої густини є більшою. У результаті в елементах складної геометричної форми відбувається нерівномірний перерозподіл фаз. Структуру багатофазного потоку досліджують експериментально в прозорих фасонних елементах трубопроводів. У [1, 154, 155] наведено результати експериментальних досліджень рух потоку води та газу з твердими частинками відводами трубопроводів. Було виявлено, що структура двофазного потоку в відводах є складною. У відводі тверді частинки зміщувались до опуклого його боку (рисунок 1.6). Навіть за незначної витрати води, коли на прямих ділянках трубопроводу частинки ковзають нижньою частиною труби, увійшовши у відвід, вони піднімались і переміщувались вздовж опуклого боку відводу. За відводом вони повільно опускались до нижньої частини труби. Однак такі експериментальні дослідження мають недоліки (складність, неможливість визначення розподілу швидкості, концентрації, діаметра дисперсних частинок та інших параметрів складного 3D двофазного потоку у внутрішній порожнині фасонних елементів; невідповідність режимних, геометричних параметрів реальним; складність зміни геометричних параметрів фасонних елементів тощо).

Ефективним інструментом для дослідження руху багатофазних потоків елементами трубопровідних систем складної геометричної форми є CFD моделювання. В [156, 157] CFD моделюванням досліджено рух суспензій

відводами трубопроводів. Для цього був вибраний Ейлеровий підхід, який дає змогу дослідити розподіл об'ємної частки твердих і рідких фаз в елементах трубопровідних систем складної геометричної форми (рисунок 1.7). У центрі відводу тверді частинки зміщуються до опуклого боку відводу. Таке зміщення спостерігалось навіть у місці виходу потоку з відводу. Цей ефект стає більш помітний зі збільшенням швидкості потоку. Достовірність результатів моделювання була підтверджена порівнянням із результатами експериментів.



**Рисунок 1.6** – Експериментальні дослідження двофазних потоків у відводах



**Рисунок 1.7** – Поля розподілу концентрації дисперсних фаз у поперечних перерізах відводу при швидкості потоку 1,78 м/с



Під час проходження двофазного потоку трійниками трубопровідних систем відбувається нерівномірний поділ фаз, що впливає на енерговитратність трійників. У нафтогазовій промисловості трійники застосовуються як часткові двофазні сепаратори. Принцип роботи таких сепараторів заснований на різниці інерційності між двома фазами. Трійники є доцільними для попереднього розділення газу та рідини, які виносяться з свердловин. [158]

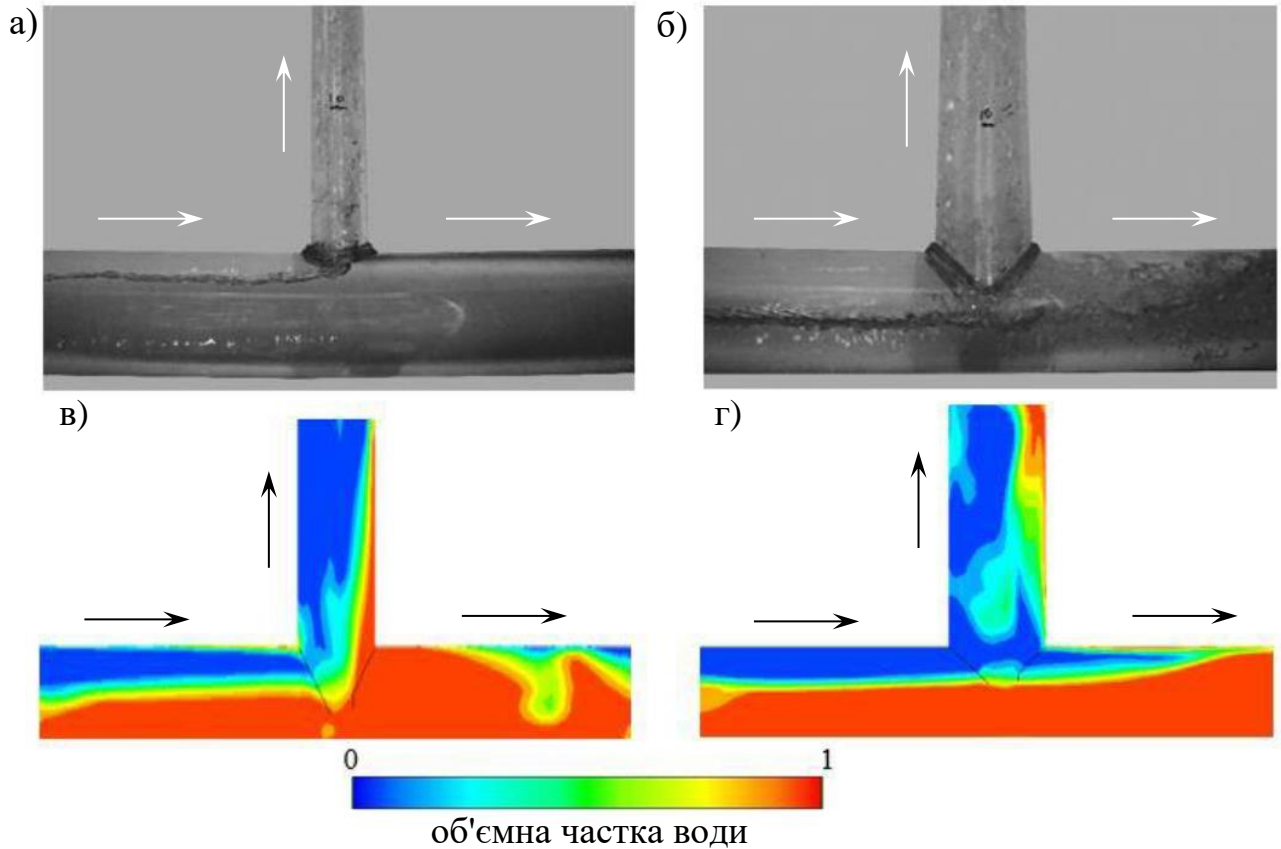
Опублікованих результатів досліджень структури багатофазних потоків у трійниках відносно мало. У [158] виконано CFD моделювання процесу розходження потоку повітря-вода у трійнику. Досліджувався вплив співвідношення діаметрів магістралі та відгалуження трійника і швидкостей потоків повітря та води на структуру двофазного потоку. Отримані результати порівнювались із викладеними в [159, 160] результатами експериментів. Розходження між результатами CFD моделювання й експериментальними даними не перевищувало 5 %. Чисельна модель показала значний вплив співвідношення діаметрів і швидкостей фаз на розподіл фаз у трійнику.

На рисунку 1.8, а, в частина потоку води зтягується у відгалуження трійника. Якщо сила тяги не може подолати силу тяжіння, вода не зтягується у відгалуження трійника (рисунок 1.8, б, г). Коли двофазний потік рухається трійником, більша частина потоку повітря перетікає у відгалуження трійника, що збільшує перепад тиску між відгалуженням і магістраллю трійника

Багатофазний потік призводить до збільшення втрат гідродинамічної енергії потоку в трубопровідних системах, порівняно з однофазним. Найсуттєвіше збільшення втрат тиску відбувається в елементах трубопровідних систем складної геометричної форми [161]. Також багатофазний потік призводить до ерозійного зношування елементів трубопровідних систем складної геометричної форми.

Енерговитратність елементів трубопровідних систем складної геометричної форми можна дослідити теоретично, експериментально та чисельним моделюванням. За результатами експериментальних досліджень і чисельного моделювання уточнюють теоретичні, розробляють нові емпіричні залежності для розрахунку падіння тиску двофазних потоків у фасонних елементах трубопроводів.

В основному, такі дослідження стосуються потоків тверді частинки-вода, повітря-вода в фасонних елементах трубопроводів малого діаметра [154, 161–165] і надзвичайно мало досліджень стосуються газонафтопроводів, особливо магістральних.



а), б) – експеримент; в), г) – CFD моделювання

**Рисунок 1.8** – Результати досліджень руху двофазного потоку (повітря-вода) трійником

Для визначення втрати тиску двофазних потоків у фасонних елементах трубопроводів розроблено дві методики:

– визначення втрат тиску двофазних потоків шляхом визначення еквівалентної довжини (відношення втрат тиску двофазного потоку в фасонному елементі до втрат тиску в прямій трубі) [166, 167];

– визначення втрат тиску двофазних потоків шляхом множення втрат тиску однофазних потоків на відповідні двофазні множники (коефіцієнти) [16, 18].

Згідно з [167] еквівалентна довжина  $L_e$  залежить від відношення радіуса

вигину відводу до його діаметра та від кута вигину відводу. Збільшується еквівалентна довжина за рахунок тертя двофазного потоку до внутрішньої стінки відводу, відцентрової сили й утворення вихорів у відводі. Тоді однофазний перепад тиску у відводі трубопроводу рівний

$$\Delta P_{1\phi} = f \frac{V^2}{2\rho} \left( \frac{L_e}{D_B} \right), \quad (1.11)$$

де  $f$  – коефіцієнт тертя;

$V$  – швидкість однофазного потоку;

$\rho$  – густина однофазного потоку;

$D_B$  – діаметр відводу.

Якщо припустити, що двофазний потік рухається як рідина, тоді коефіцієнт місцевого опору відводу рівний

$$\xi_l = f_l \left( \frac{L_e}{D_B} \right). \quad (1.12)$$

Якщо відвід трубопроводу повністю заповнює рідка фаза, тоді перепад тиску буде рівний

$$\Delta P_{1\phi,l} = \frac{\xi_l V^2}{2\rho}. \quad (1.13)$$

Тоді, згідно з [167] падіння тиску в відводі трубопроводу під час руху ним двофазної суміші

$$\Delta P_{2\phi} = \Delta P_{1\phi,l} \left( 1 + \left( E(x(1-x)) + x^2 \right) \right), \quad (1.14)$$

де  $E$  – коефіцієнт відводу, який для відводу трубопроводу з кутом вигину  $90^\circ$

рівний

$$E = 1 + \frac{2,2}{k_l \left( 2 + \frac{R_B}{D_B} \right)}, \quad (1.15)$$

де  $R_B$  – радіус вигину відводу.

Згідно з запропонованою в [168, 169] моделлю для визначення падіння тиску двофазного потоку в відводі трубопроводу визначають двофазний множник, який рівний відношенню втрат тиску двофазного потоку в відводі  $\Delta P_{2\phi}$  до втрат тиску в відводі однофазного потоку рідини  $\Delta P_{1\phi,l}$  з однаковою загальною витратою

$$\Phi^2 = \frac{\Delta P_{2\phi}}{\Delta P_{1\phi,l}}. \quad (1.16)$$

Двофазний множник потоку, визначений у [168], рівний

$$\Phi^2 = C + 7,42 Fr_l^{0,125} \frac{R_B}{D_B}^{0,502} x^{0,7} (1-x)^{0,1} \left( \frac{\rho_l - \rho_g}{\rho_l} \right)^{0,14} \left( \frac{\mu_l - \mu_g}{\mu_l} \right)^{0,12}, \quad (1.17)$$

$$C = (1-x) + \left( \frac{\rho_l \xi_g}{\rho_g \xi_l} \right) x^2. \quad (1.18)$$

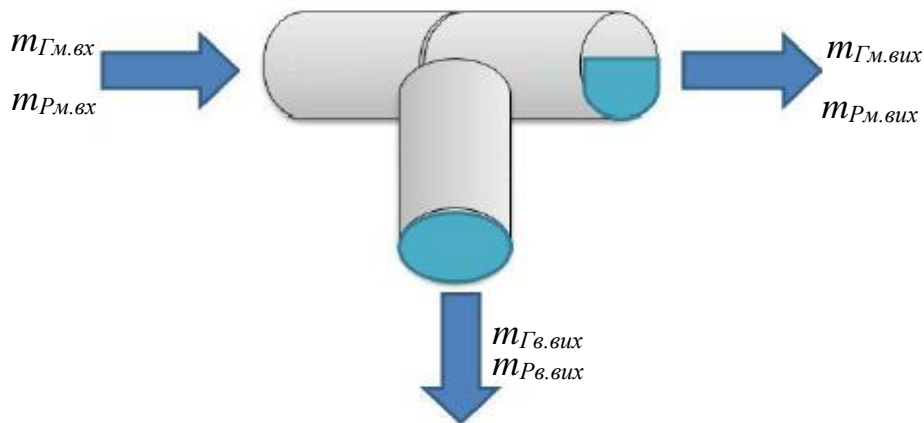
Число Фруда

$$Fr_l = \frac{(1-x^2) V^2}{\rho_l^2 g R_B}. \quad (1.19)$$

Величина втрат тиску багатофазного потоку в відводах трубопровідних

систем залежить від просторового положення відводу. Різниця між втратами тиску в горизонтально та вертикально розміщених відводах не перевищує 10 %. [170]

Під час руху двофазного потоку трійником, крім вираженого нерівномірного поділу фаз, відбуваються втрати гідравлічної енергії. Для оцінки явища розходження двофазного (газ-рідина) потоку в трійнику в [17, 171, 172] запропоновано застосувати коефіцієнти розходження. Коефіцієнти розходження визначаються, як відношення масової витрати фази, що виходить із магістралі чи відгалуження трійника до масової витрати фази, яка входить у магістраль трійника (рисунок 1.9). Очевидно, що коефіцієнт розходження може змінюватись від 0 до 1 і може бути визначений як для рідкої, так і для газової фази.



**Рисунок 1.9** – Розрахункова схема розходження двофазного потоку в трійнику

Коефіцієнти розходження рідкої та газової фази для відгалуження трійника

$$\lambda_{Р,мас} = \frac{m_{Р,вих}}{m_{Р,вх}}, \quad \lambda_{Г,мас} = \frac{m_{Г,вих}}{m_{Г,вх}}, \quad (1.20)$$

де  $m_{Р,вих}$ ,  $m_{Г,вих}$  – масова витрата відповідно рідкої та газоподібної фази, яка виходить із відгалуження трійника;

$m_{Р,вх}$ ,  $m_{Г,вх}$  – масова витрата відповідно рідкої та газоподібної фази, яка входить у магістраль трійника.

Коефіцієнти розходження рідкої та газової фази для магістралі трійника

$$\lambda_{P_{M,мас}} = \frac{m_{P_{M,вих}}}{m_{P_{M,вх}}}, \quad \lambda_{G_{M,мас}} = \frac{m_{G_{M,вих}}}{m_{G_{M,вх}}}, \quad (1.21)$$

де  $m_{P_{M,вих}}$ ,  $m_{G_{M,вих}}$  – масова витрата відповідно рідкої та газоподібної фази, яка виходить із магістралі трійника.

Зрозуміло, що

$$\lambda_{P_{в,мас}} + \lambda_{P_{M,мас}} = 1, \quad \lambda_{G_{в,мас}} + \lambda_{G_{M,мас}} = 1. \quad (1.22)$$

Модель рівномірного розходження багатозафазного потоку в трійнику може бути виражена наступним чином

$$\lambda_{P_{в,мас}} = \lambda_{P_{G_{в,мас}}}, \quad \lambda_{P_{M,мас}} = \lambda_{P_{G_{M,мас}}}. \quad (1.23)$$

У такому випадку розходження двофазного потоку в трійнику є рівномірним і відбуваються в рівних пропорціях. При цьому відбувається нехтування фазовою інерцією та чітко визначеними явищами нерівномірного розподілу фаз в трійнику.

У [17, 173] на основі експериментальних спостережень розроблена модель розходження багатозафазного потоку в трійнику, заснована на коефіцієнті кінетичної енергії. Коефіцієнт кінетичної енергії враховує інерційність фаз і рівний:

$$KE = \frac{\rho_G V_G^2}{\rho_P V_P^2}, \quad (1.24)$$

де  $\rho_G$ ,  $\rho_P$  – густина газу та рідини відповідно;

$V_G$ ,  $V_P$  – швидкість газу та рідини відповідно.

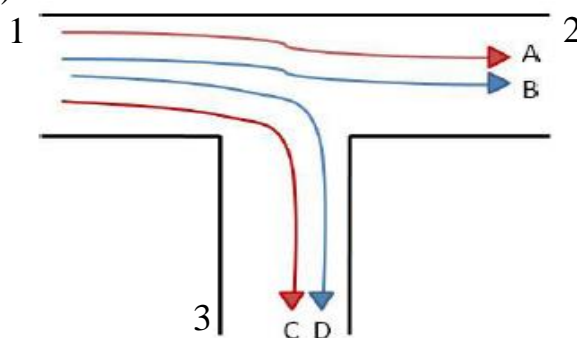
Кінетична модель розходження вказує на те, що коефіцієнт розходження рідкої фази для відгалуження трійника пов'язаний із коефіцієнтом розходження

газової фази для відгалуження трійника коефіцієнтом кінетичної енергії входу в магістраль трійника

$$\lambda_{P_{в,мас}} = \lambda_{P_{Гв,мас}} \cdot KE_{м.вх}. \quad (1.25)$$

На процес розходження двофазних потоків у трійнику впливають масові витрати газу та рідини на вході в трійник, густина і в'язкість газу та рідини, поверхневий натяг рідкої фази, геометричні параметри трійника. [173]

Модель двофазного потоку базується на допущенні, що потік газу і потік рідини, який поступає у магістраль трійника, може бути розбитий на два подвійні потоки (рисунок 1.10).



A, C – потік газу; B, D – потік рідини

**Рисунок 1.10** – Схема двофазного потоку в трійнику

Для моделі двофазного потоку рівняння, яке описує нерівномірний розподіл такого потоку, розроблене на основі рівняння Бернуллі для однофазного потоку, яке називається “розширене рівняння Бернуллі”, таким чином:

– для потоку вхід магістраль трійника – вихід магістраль трійника

$$(P_1 - P_2) + \frac{1}{2} \rho (V_1^2 - V_2^2) + \rho g (z_1 - z_2) = \xi_{12} \frac{1}{2} \rho V_1^2; \quad (1.26)$$

– для потоку вхід магістраль трійника – вихід відгалуження трійника

$$(P_1 - P_3) + \frac{1}{2} \rho (V_1^2 - V_3^2) + \rho g (z_1 - z_3) = \xi_{13} \frac{1}{2} \rho V_1^2, \quad (1.27)$$

де числа 1, 2 і 3 – входи і вихід трійника (рисунок 1.10);

$z$  – висота. [17]

Відніманням від рівняння (1.26) рівняння (1.27) і записом результату для газової та рідкої фази окремо отримаємо

$$(P_2 - P_3)_G + \frac{1}{2} \rho_G (V_{2G}^2 - V_{3G}^2) + \rho_G g (z_{2G} - z_{3G}) = \frac{1}{2} \rho_G V_{1G}^2 (\xi_{13} - \xi_{12}), \quad (1.28)$$

$$(P_2 - P_3)_P + \frac{1}{2} \rho_P (V_{2P}^2 - V_{3P}^2) + \rho_P g (z_{2P} - z_{3P}) = \frac{1}{2} \rho_P V_{1P}^2 (\xi_{13} - \xi_{12}). \quad (1.29)$$

У моделі подвійного потоку приймається припущення, що різниця тиску між виходом з магістралі трійника та виходом з відгалуження трійника рівні як для газової, так і для рідкої фаз

$$(P_2 - P_3)_G = (P_2 - P_3)_P. \quad (1.30)$$

Використовуючи визначення та формули для співвідношення кінетичної енергії (1.24), масової частки споживання газу та рідини у розгалуженні та пробігу (1.20), (1.21) і наступні наближення

$$z_{G2} = z_{G3}, \quad z_{P3} = z_{P2} + (D_1 - D_3), \quad \xi'_{13} - \xi'_{12} = \xi_{13} - \xi_{12}, \quad (1.31)$$

отримаємо загальні вирази для моделі подвійного потоку

$$(a^4 - 1) \lambda_P^2 + 2 \lambda_P - KE \left( (a^4 - 1) \lambda_G^2 + 2(\lambda_G - \lambda_0) \right) + \frac{1}{\beta_P Fr_{P13}} - 2 \lambda_0 = 0, \quad (1.32)$$



де  $a = \frac{D_1}{D_3}$ ;

$\beta_P$  – коефіцієнт, який залежить від режиму вхідного двофазного потоку (якщо потік турбулентний  $\beta_P = 1$ , а якщо ламінарний  $\beta_P = 1,54$ );

$Fr_{P13}$  – число Фруда

$$Fr_{P13} = \frac{V_{P1}^2}{g(D_1 - D_3)}; \quad (1.33)$$

$$\lambda_0 = \frac{1}{2}(1 + \xi_{12} - \xi_{13}); \quad (1.34)$$

$$\lambda_P = \lambda_0 + KE(\lambda_\Gamma - \lambda_0). \quad (1.35)$$

Тоді, з урахуванням отриманих у [18] залежностей, коефіцієнти місцевих опорів трійника будуть рівними

$$\xi_{12} = 0,03(1 - \lambda_\Gamma)^2 + 0,35\lambda_\Gamma^2 - 0,2\lambda_\Gamma(1 - \lambda_\Gamma), \quad (1.36)$$

$$\begin{aligned} \xi_{13} = & 0,95(1 - \lambda_\Gamma)^2 + \lambda_\Gamma^2 \left( \left( 1,3 \tan\left(\frac{\varphi}{2}\right) - 0,3 + (0,4a^2 - 0,1)a^2 \right) (1 - 0,9a\sqrt{r}) \right) + \\ & + 0,4\lambda_\Gamma(1 - \lambda_\Gamma)(1 + a^2) \tan\left(\frac{\varphi}{2}\right), \end{aligned} \quad (1.37)$$

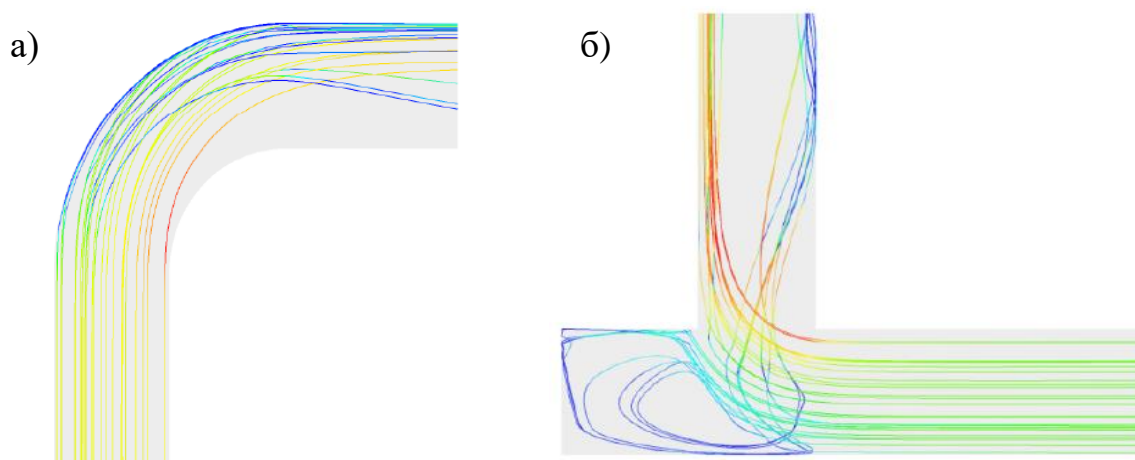
де  $\varphi$  – кут між відгалуженням і магістраллю трійника;

$r$  – радіус відборткування трійника.

Порівняно з однофазними потоками рівняння руху двофазних потоків фасонними елементами трубопроводів надзвичайно складні, є наближеними через прийнятий ряд припущень, не враховують усі можливі структури потоків,

нерівномірний розподіл фаз тощо.

Щоб повно і всебічно дослідити ерозійне зношування елементів трубопроводів складної геометричної форми, необхідно знати місця інтенсивного ударяння дисперсної фази до їх стінки, швидкість, концентрацію, діаметри частинок, кути атаки в місці ударяння та багато інших параметрів, від яких залежить місцезнаходження та величина ерозійного зношування. Щоб отримати таку інформацію, необхідно знати траєкторії руху дисперсної фази в суцільній фазі елементами трубопровідних систем складної геометричної форми. У [174–178] траєкторії руху дисперсної фази в суцільній фазі фасонними елементами трубопроводів визначались CFD моделюванням. Для цього був вибраний Лагранжевий підхід, який дає змогу розрахувати траєкторію кожної окремої дисперсної частинки, інтегруючи другий закон Ньютона, записаний у Лагранжевій системі відліку [179]. Виконувалось відстеження траєкторій руху дисперсних частинок фасонними елементами (рисунок 1.11). Визначався розподіл розмірів частинок, швидкості частинок у внутрішній порожнині фасонних елементів. Результати моделювання порівнювались із експериментальними результатами, викладеними в [180–182], і було підтверджено достовірність моделювання та рекомендовано замість дорогого експериментального досліджування застосовувати CFD моделювання. В основному, такі дослідження виконувались для двофазних потоків вода-тверді частинки [174], газ-тверді частинки [175–177], газ-рідина [178] для трубопроводів малого діаметра.



а) – відводом; б) – трійником

**Рисунок 1.11** – Траєкторії руху дисперсних частинок фасонними елементами

### 1.3 Стан проблеми ерозійного зношування складних трубопровідних систем

Ерозійне зношування стінки фасонних елементів трубопровідних систем є однією із важливих проблем, яка зустрічається в трубопровідному транспорті [183, 184] і є причиною зменшення надійності трубопроводів і призводить до значної кількості аварій трубопровідних систем різноманітного призначення [185, 186]. Що ж до магістральних газопроводів, то згідно із даними, наведеними в [187], ерозійне зношування є причиною 3 % від загальної кількості відмов лінійної частини.

Ерозійне зношування – це фізичне явище, зумовлене механічним контактом між частинками, які рухаються в потоці продукту, та стінкою трубопроводу, що, у свою чергу, призводить до втрат металу (рисунок 1.12).



Рисунок 1.12 – Ерозійно-зношені відводи трубопроводів

На процеси ерозійного зношування фасонних елементів трубопроводів впливає велика кількість різноманітних чинників, ключові з яких описані в [184, 188].

У [189] І. Finnie запропонував досліджувати ерозійне зношування шляхом аналізу рівняння руху кожної дисперсної частинки під час її зіткнення з пластичною поверхнею металу. Для оцінки обсягу втрати матеріалу поверхні, зумовленої зіткненням з нею частинки, була досліджена траєкторія руху частинки. Також І. Finnie за результатами спостережень зробив висновок, що тільки передній

край абразивних частинок контактує з поверхнею під час зіткнення з нею. [29, 190]

Процеси ерозійного зношування фасонних елементів трубопровідних систем досліджують застосуванням типових моделей, отриманих аналітичним чи емпіричним шляхом, вимірюванням фактичної товщини стінки в місці ймовірного ерозійного зношування і чисельним (CFD) моделюванням.

Одне з перших рівнянь для розрахунку швидкості ерозійного зношування розробив I. Finni [29]

$$E = KF_S V_P^n f(\theta), \quad (1.38)$$

де  $K$  – стала, яка залежить від матеріалу стінки;

$F_S$  – коефіцієнт форми частинок, який рівний одиниці для гострого, напівкруглого та круглого піску;

$V_P^n$  – імпульс частинок;

$f(\theta)$  – емпірична константа.

У. Ока в [30] для розрахунку швидкості ерозійного зношування запропонував таку модель:

$$E = E_{90} g(\alpha), \quad (1.39)$$

де  $E_{90}$  – коефіцієнт вигину відводу трубопроводу з кутом вигину  $90^\circ$ ;

$g(\alpha)$  – коефіцієнт, який залежить від кута атаки.

Коефіцієнт вигину відводу трубопроводу

$$E_{90} = K(H_V)^{k_1} (V)^{k_2} (d)^{k_3}, \quad (1.40)$$

де  $K$  – коефіцієнт, який враховує властивості дисперсних частинок – такі як форма і твердість;

$H_V$  – твердість за Віккерсом;

$V$  – швидкість дисперсних частинок;

$d$  – діаметр дисперсних частинок;

$k_1, k_3$  – емпіричні коефіцієнти експоненти;

$k_2$  – функція твердості матеріалу та властивостей частинок.

Коефіцієнт, який залежить від кута атаки

$$g(\alpha) = (\sin \alpha)^{n_1} (1 + H_V (1 - \sin \alpha))^{n_2}, \quad (1.41)$$

де  $\alpha$  – кут атаки;

$n_1, n_2$  – коефіцієнти, які визначаються твердістю матеріалу, властивостями частинок, формою частинок.

Y. Zhang в [31] запропонував модель ерозійного зношування в такому вигляді

$$E = C(BH)^{-0,59} F_s V_p^n F(\theta), \quad (1.42)$$

де  $C$  – коефіцієнт, рівний  $2,17 \cdot 10^{-7}$ ;

$BH$  – твердість за Брінеллем;

$F_s$  – коефіцієнт форми частинок, який становить 1 для гострого краю (кутові) частинки, 0,53 – для напівкруглих частинок і 0,2 – для повністю округлих частинок;

$V_p$  – швидкість зіткнення частинки з стінкою;

$n$  – коефіцієнт, рівний 2,41;

$F(\theta)$  – функція кута атаки.

Функція кута атаки

$$F(\theta) = 5,4\theta - 10,11\theta^2 + 10,93\theta^3 - 6,33\theta^4 + 1,42\theta^5, \quad (1.43)$$

де  $\theta$  – кут атаки.

Американським інститутом нафти для розрахунку швидкості ерозійного зношування фасонних елементів трубопроводів, якими транспортується рідинне середовище, в стандарті API RP 14 E [32] запропонована емпірична формула

$$E = \frac{c}{\sqrt{\rho_f}}, \quad (1.44)$$

де  $c$  – стала, значення якої складає 100 при безперервній експлуатації трубопроводу та 125 при експлуатації з перервами;

$\rho_f$  – густина транспортованої рідини.

У [33] для розрахунку швидкості ерозійного зношування відводів і трійників частинками піску, які рухаються газовим потоком, запропонована формула

$$E = 37,585 \frac{WV^2}{PD^2}, \quad (1.45)$$

де  $W$  – витрата піску;

$V$  – швидкість газового потоку;

$P$  – параметр твердості сталі стінки;

$D$  – внутрішній діаметр труби.

Недоліками формули (1.57) є неврахування характеристик дисперсних частинок і характеристик стінок фасонних елементів.

У [34] швидкість ерозійного зношування фасонних елементів частинками піску, які рухаються газовим потоком, запропоновано розраховувати за формулою

$$E = \frac{11,574WV_m^2 d_p}{S_m D^2 \rho_m}, \quad (1.46)$$

де  $W$  – витрата піску;

$V_m$  – швидкість двофазної суміші;

$d_p$  – діаметр частинок;

$S_m$  – константа, яка залежить від геометричних параметрів фасонного елемента;

$D$  – діаметр труби;

$\rho_m$  – густина двофазної суміші.

Формула (1.58) враховує характеристики двофазної суміші та характеристики дисперсної фази.

Згідно з [35, 36] швидкість ерозійного зношування визначається за

$$E = \sum_{p=1}^N \frac{m_p C(d_p) f(\alpha) V^{b(v)}}{A_f}, \quad (1.47)$$

де  $m_p$  – масова витрата дисперсних частинок;

$C(d_p)$  – функція діаметра дисперсних частинок;

$f(\alpha)$  – функція кута атаки;

$\alpha$  – кут між траєкторією частинки та стінкою;

$V$  – швидкість дисперсних частинок;

$b(v)$  – функція відносної швидкості дисперсних частинок;

$A_f$  – площа поверхні, в яку відбувається вдарення дисперсної частинки.

Як бачимо, для розрахунку швидкості ерозійного зношування існує велика кількість різноманітних моделей, але не всі вони можуть бути застосовані для фасонних елементів трубопроводів, оскільки їх точність є сумнівною. Багато з них не враховують повністю усі параметри процесу, а саме: геометричну форму фасонних елементів трубопроводів, характеристики дисперсних частинок, режимні параметри транспортування, характеристики стінки тощо. Більшість моделей ерозійного зношування були розроблені емпірично, на основі експериментальних даних, отриманих не в умовах фасонних елементів трубопроводних систем. Такі

моделі не є універсальними і стосуються конкретних умов. Тому для прийнятно точного розрахунку, моделювання ерозійного зношування фасонних елементів трубопроводів необхідно правильно вибрати модель.

Періодичне контролювання товщини стінки фасонних елементів трубопроводів та оцінювання їх надійності, працездатності, визначення залишкового ресурсу дає змогу запобігти виникненню аварій. Найпростішим і найдоступнішим методом контролювання товщини стінки трубопроводів без зупинки транспортування продукту є ультразвуковий метод [191].

Досвід діагностування газопроводів свідчить, що швидкість ерозійного зношування відводів із опуклого боку складає до 0,3 мм у рік. [28] Згідно з цим документом контролювання товщини стінки фасонних елементів газопроводів слід виконувати регулярно, з періодичністю, визначеною швидкістю ерозійного зношування стінки труби, але не рідше одного разу на рік.

Шлапак Л. С. досліджував ерозійне зношування відводів трубопроводів обв'язки газоперекачувальних агрегатів (ГПА) компресорних станцій (КС), зокрема відводів трубопроводів обв'язки ГПА КС "Тарутине" [192]. Аналіз результатів товщинометрії показав, що за час експлуатації трубопроводів обв'язки КС спостерігається неоднакове ерозійне зношування відводів як за часом, так і за агрегатами. Величина ерозійного зношування відводів не перевищує загально статистичні дані в межах 0,2 – 0,3 мм на рік. За час моніторингу середнє ерозійне зношення відводів на випуклій поверхні складає близько 0,5 мм для ГПА-2 і до 0,7 мм для ГПА-3. Максимальне зношення стінки відводів цих ГПА складає 1,26 мм для ГПА-2 і 1,57 мм для ГПА-3, що становить більше, ніж 50 % від допустимого зношення товщини відводів на рік.

За результатами періодичного контролювання товщини стінки фасонних елементів трубопроводів у місцях їх ерозійного зношування визначають основні показники ерозійного процесу, такі як: значення величини стоншування стінки, швидкість зменшення товщини стінки. [193]

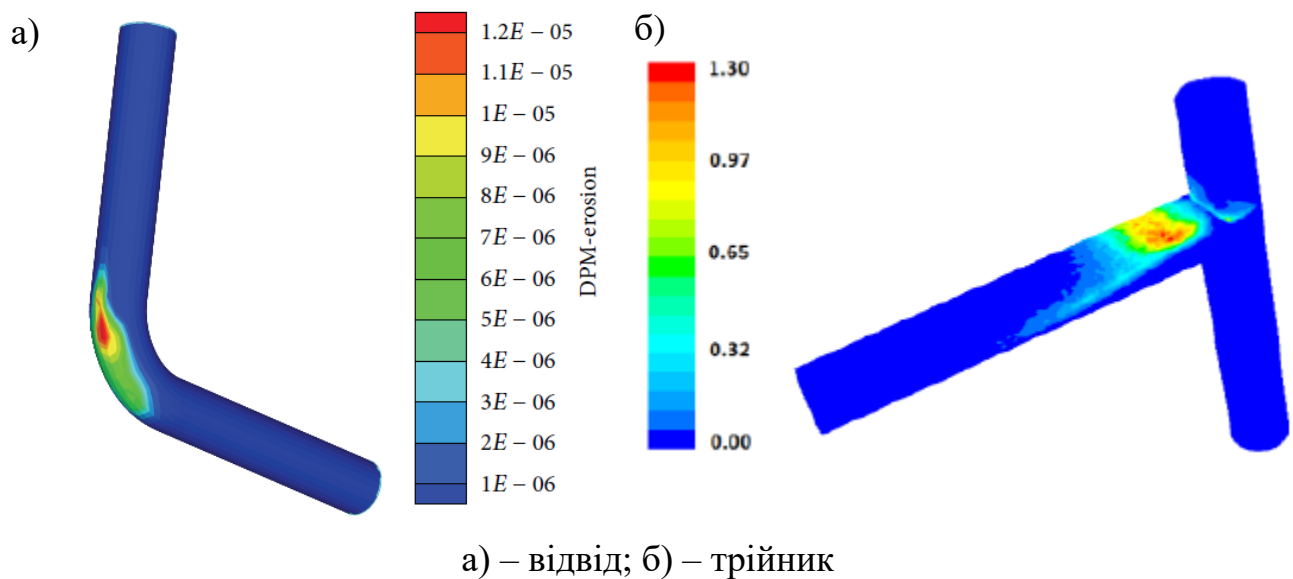
У [194, 195] при обробці даних експлуатаційного контролювання товщини стінки фасонних елементів трубопроводів визначались тривалість експлуатації



елементів трубопровідних систем, максимальна величина стоншування стінки, середня величина стоншування стінки, максимальна швидкість стоншування стінки, середня швидкість стоншування стінки, відношення максимального стоншування стінки до номінальної товщини стінки.

Детальне дослідження ерозійного зношування фасонних елементів трубопроводів можна виконати CFD моделюванням. Таким моделюванням досліджувались ерозійні процеси, зумовлені рухом твердих частинок у воді [196–198], газі [199–201], повітрі [202, 203], нафті [186, 199].

Результати CFD моделювання ерозійного зношування фасонних елементів трубопровідних систем різноманітного призначення візуалізовувались побудовою полів швидкості ерозійного зношування на їх контурах (рисунок 1.13). [196, 204] В основному, переважна більшість висвітлених результатів CFD моделювання ерозійного зношування фасонних елементів трубопроводів у літературних джерелах стосується відводів. Результатів CFD моделювання ерозійного зношування трійників є надзвичайно мало.



**Рисунок 1.13** – Поля швидкості ерозійного зношування на контурах

За результатами CFD моделювань ерозійного зношування отримано емпіричні формули для розрахунку швидкості ерозійного зношування відводів трубопровідних систем різноманітного призначення [196, 202, 203, 205].

Переважна більшість отриманих експериментально та CFD моделюванням

формул для розрахунку швидкості ерозійного зношування відводів трубопровідних систем різноманітного призначення залежать від численних коефіцієнтів, визначених для конкретних умов роботи або геометричних параметрів, що розглядаються у літературних джерелах. Тому вони не є універсальними, і існує значна недостатність інформації щодо ерозійного зношування фасонних елементів трубопровідних систем різноманітного призначення, особливо щодо газонафтопроводів в умовах, в яких виконувати експериментальні дослідження надзвичайно важко.

Результати CFD моделювання порівнювались з результатами експериментальних досліджень у лабораторних умовах [202, 203, 206], результатами вимірювання в умовах реальних трубопроводів, які знаходяться в експлуатації [205, 207], і була підтверджена достовірність моделювання. Розбіжність результатів не перевищувала 15 %.

У [201, 208, 209] досліджено процеси ерозійного зношування двох відводів трубопроводу, розміщених один за одним. Було встановлено, що швидкість ерозійного зношування другого відводу трубопроводу є меншою, ніж першого на величину від 40 % до 70 %.

Перевагою CFD моделювання є максимально точне врахування геометричної форми, геометричних параметрів фасонних елементів. Недоліками є складність і значні витрати часу на зміну геометричної форми, геометричних параметрів фасонних елементів. Оскільки CFD моделювання дає змогу побачити, як геометрія фасонних елементів трубопроводів впливає на динаміку руху ними багатofазних потоків, місцезнаходження і величину ерозійних дефектів, то його доволі часто застосовують для розслідування причин аварій. [210–212] CFD моделювання є ефективним інструментом для вивчення того, які з фасонних елементів трубопровідних систем є найстійкішими до ерозійного зношування. Порівнювались величини ерозійного зношування відводів трубопровідних систем і трійників, у яких увесь потік із магістралі перетікає у відвід, і було виявлено, що трійники є стійкіші. [174, 204]

## 1.4 Аналіз досліджень напружено-деформованого стану фасонних елементів трубопроводів

НДС прямолінійних ділянок трубопроводів і фасонних елементів суттєво відрізняються, що зумовлено багатьма чинниками, одним із яких є геометрична форма останніх. Фасонні елементи знаходяться під статичними та динамічними навантаженням під час експлуатації і є найнапруженішими елементами трубопровідних систем, а тому по потенційно небезпечними. Згідно зі статистичними даними, серед обладнання трубопровідного транспорту найвищою є інтенсивність відмов трійників, дещо меншою – відводів. Так, наприклад, кількість відмов трійників значно більша, ніж обладнання, яке має рухомі елементи (вентилі й обертові деталі). [213]

Нерівномірне ерозійне зношення відводів трубопроводів призводить до зменшення товщини їх стінки з опуклого боку, овалізує поперечний переріз, що призводить до не прогнозованого перерозподілу напружень як по перерізу, так і по периметру відводів, що негативно впливає на їх міцність, надійність. Найбільші за величиною напруження знаходяться не в крайніх волокнах, як при згинанні прямої труби, а у волокнах, менш віддалених від нейтральної осі. Значення цих напружень можуть у декілька разів перевищувати значення напружень, які б виникли в прямій трубі при рівному моменті згину і можуть значно перевищувати поздовжні напруження від дії внутрішнього тиску. [192]

НДС фасонних елементів трубопровідних систем можна дослідити аналітичними, експериментальними методами або чисельним аналізом МСЕ в різних програмних комплексах комп'ютерного моделювання.

У [214] наведена формула для визначення розрахункових поздовжніх напружень у криволінійних ділянках надземного трубопроводу

$$\sigma_{нов} = n_t \alpha_t \Delta t E + \mu \sigma_{кц} + \sigma_{нест} + \frac{n_{3z} E D_3}{2\rho}, \quad (1.48)$$

де  $n_t$  – коефіцієнт надійності за температурним впливом;

$\alpha_t$  – коефіцієнт лінійного розширення металу труб;

$\Delta t$  – температурний перепад;

$E$  – модуль пружності матеріалу труб;

$\mu$  – коефіцієнт Пуассона;

$\sigma_{кц}$  – розрахункові кільцеві напруження;

$\sigma_{нест}$  – напруження, зумовлені нестационарністю течії речовини в трубопроводі;

$n_{зг}$  – коефіцієнт надійності за навантаженням від пружного згину;

$D_3$  – зовнішній діаметр криволінійної ділянки;

$\rho$  – радіус кривизни трубопроводу на криволінійній ділянці.

Методика оцінки НДС відводів трубопроводів без дефектів і з поверхневими напівеліптичними внутрішніми та зовнішніми тріщинами викладена в [40] і французьких НД (нормативний документ) RSE-M [215] і RCC-MR [216]. Розрахункова схема відводу трубопроводу наведена на рисунку 1.14.

Номінальні кільцеві напруження у відводі трубопроводу від дії внутрішнього тиску, згідно з [40], рівні

$$\sigma_{кц.в} = \frac{Pr_i}{h} \left( \frac{2R_c + r_i \sin \varphi}{2(R_c + r_m \sin \varphi)} \right), \quad (1.49)$$

де  $r_i$  – внутрішній радіус відводу;

$h$  – товщина стінки відводу;

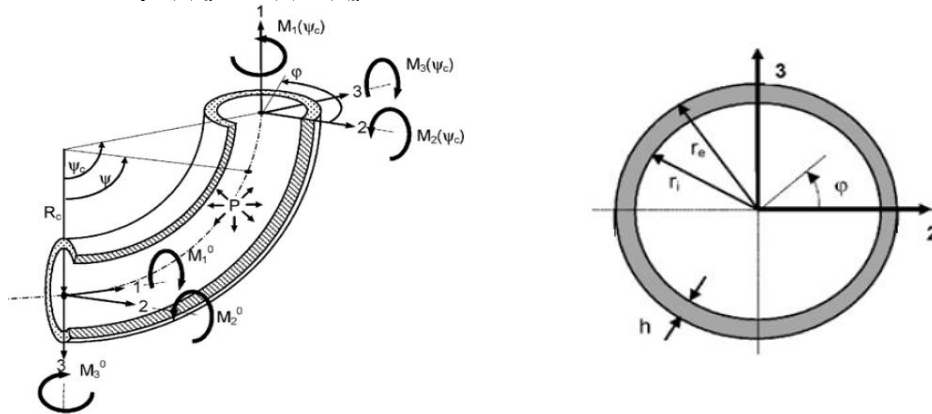
$R_c$  – радіус вигину відводу;

$\varphi$  – полярний кут у поперечному перерізі відводу;

$r_m$  – середній радіус відводу

$$r_m = r_e - \frac{h}{2}, \quad (1.50)$$

де  $r_e$  – зовнішній радіус відводу.



**Рисунок 1.14** – Розрахункова схема відводу

Для тонкостінного відводу в [217] запропоновано формулу для визначення допустимого тиску

$$[P] = \frac{\sigma_0 h}{r_m} \frac{1 - r_m / R_c}{1 - r_m / (2R_c)}, \quad (1.51)$$

де  $\sigma_0$  – границя плинності еластичного ідеально пластичного матеріалу.

Кільцеві напруження від дії внутрішнього тиску в стінці магістралі трійника, приведені до нормальної температури, можна визначити за формулою, наведеною в [37]

$$\sigma_{m.m} = \frac{P(D_{3.m} - \delta_{m.m})}{2\varphi\delta_{m.m} A_t}, \quad (1.52)$$

де  $D_{3.m}$  – зовнішній діаметр магістралі трійника;

$\delta_{m.m}$  – номінальна товщина стінки магістралі трійника;

$\varphi$  – розрахунковий коефіцієнт міцності трійника;

$A_t$  – температурний коефіцієнт (таблиця 2 [37]).

Аналогічно є формула для розрахунку напруження від дії внутрішнього тиску в стінці відгалуження трійника

$$\sigma_{m.m} = \frac{P(D_{3.в} - \delta_{в.м})}{2\varphi\delta_{в.м} A_t}, \quad (1.53)$$

де  $D_{3.в}$  – зовнішній діаметр відгалуження трійника;

$\delta_{в.м}$  – номінальна товщина стінки відгалуження трійника.

Допустимий тиск у магістралі трійника згідно з [37] рівний

$$[P] = \frac{2[\sigma^{20}]\varphi A_t \delta_{м.м}}{D_{3.м} - \delta_{м.м}}, \quad (1.54)$$

де  $[\sigma^{20}]$  – допустиме напруження.

Аналогічною є формула для розрахунку допустимого тиску в відгалуженні трійника.

Коефіцієнт міцності трійника згідно з [37]

$$\varphi = \frac{2}{1,75 + \frac{D_{B.в}}{\sqrt{(D_{B.м} - \delta_{м.м})\delta_{м.м}}}} \left( 1 + \frac{\Sigma A}{2\delta_{м.м} \sqrt{(D_{B.м} - \delta_{м.м})\delta_{м.м}}} \right), \quad (1.55)$$

де  $D_{B.в}$  – внутрішній діаметр відгалуження трійника;

$D_{B.м}$  – внутрішній діаметр магістралі трійника;

$\Sigma A$  – сумарна площа підсилюючих елементів трійника.

Згідно з ВСН 185 [38] напружений стан основних елементів (відводів, трійників) трубопроводів обв'язки КС треба визначати в два етапи. Головна мета першого етапу полягає у визначенні значень компонент зусилля  $\vec{Q}$  і моменту  $\vec{M}$  в відводах, трійниках від впливу розрахункових навантажень при їх основних поєднаннях з урахуванням зупинок КС за найнесприятливіших температурних умов. На другому етапі знаходять напружений стан окремих елементів (відводів,

трійників) за попередньо знайденими значенням  $\bar{Q}$  і  $\bar{M}$ . Значенням  $\bar{Q}$  і  $\bar{M}$  повинні враховувати дію внутрішнього тиску, нерівномірного температурного поля, розподілених і зосереджених вагових навантажень, вітрових навантажень.

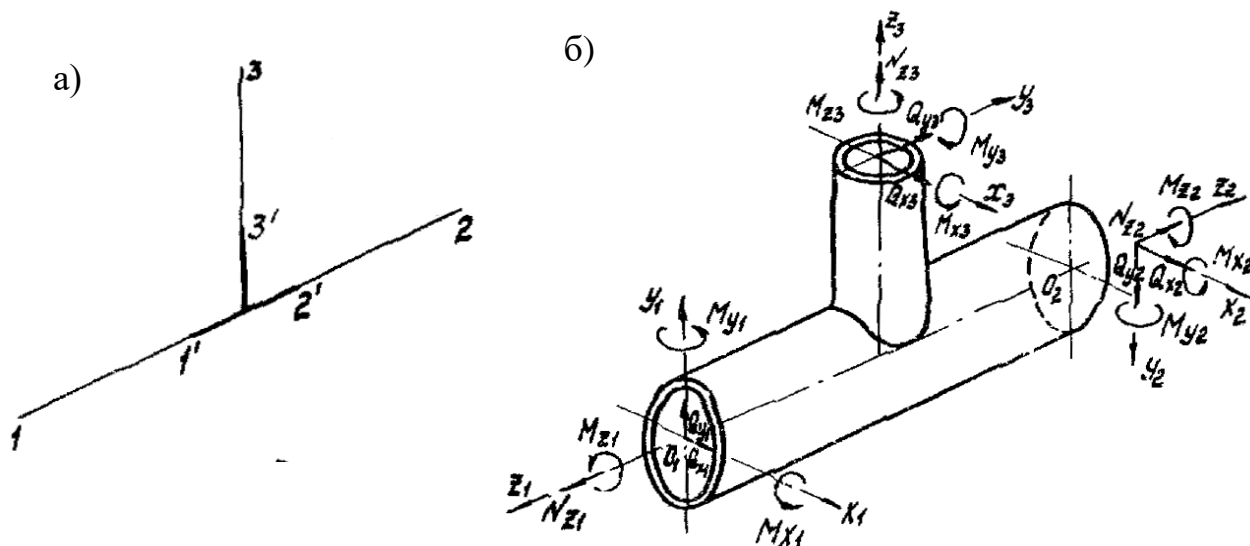
Номінальні значення компонент напружень, які відповідають зусиллю  $\bar{Q}_i$ , моменту  $\bar{M}_i$  ( $i = x, y, z$ ) (рисунок 1.15) і внутрішньому тиску, рекомендовано знаходити за такими залежностями

$$\hat{\sigma} = \frac{P(D_3 - 2\delta_n)}{2\delta_n}, \quad (1.56)$$

де  $D_3$  – зовнішній діаметр;

$\delta_n$  – номінальна товщина стінки;

$$\hat{\sigma} = \frac{P(D_3 - 2\delta_n)}{2\delta_n}, \quad (1.57)$$



а) – стрижнева модель; б) – компоненти моментів і сил по торцях;  
1 - 1', 2 - 2', 3 - 3' – пружні елементи; 1', 2', 3' – абсолютно жорстка вставка

**Рисунок 1.15** – Схема навантаження трійника

$$\hat{\sigma}_{2,2} = \frac{N_{z,3}}{F_3}, \quad \hat{\sigma}_{2,3}(i) = \frac{N_{z,i}}{F}, \quad \hat{\sigma}_{2,4}(i) = \frac{M_{x,i}}{W}, \quad (i = 1, 2), \quad (1.58)$$

$$\hat{\sigma}_{2,5}(i) = \frac{M_{x,3}}{W_p}, \quad \hat{\sigma}_{2,6}(i) = \frac{M_{y,3}}{W_p}, \quad \hat{\sigma}_{2,7}(i) = \frac{M_{y,i}}{W}, \quad (i=1, 2), \quad (1.59)$$

$$\hat{\sigma}_2 = \pm \sqrt{\hat{\sigma}_{2,5}^2 + \hat{\sigma}_{2,6}^2}, \quad \hat{\sigma}_2(i) = \pm \sqrt{\hat{\sigma}_{2,4}^2(i) + \hat{\sigma}_{2,7}^2(i)}, \quad (i=1, 2), \quad (1.60)$$

$$\bar{\sigma}_2 = \hat{\sigma}_2 + \hat{\sigma}_{2,2} + 0,5\hat{\sigma}_1, \quad \bar{\sigma}_2(i) = \hat{\sigma}_2(i) + \hat{\sigma}_{2,3}(i) + 0,5\hat{\sigma}_1, \quad (i=1, 2), \quad (1.61)$$

$$\hat{\sigma}_{12}(i) = \frac{M_{z,i}}{2W}, \quad (i=1, 2) \quad \hat{\sigma}_{12}(i) = \frac{M_{z,3}}{2W_p}, \quad (1.62)$$

$$\hat{\sigma}_{12}^{(x)} = \frac{K\sqrt{Q_{x1}^2 + Q_{y1}^2}}{F_1}, \quad \hat{\sigma}_{13}^{(y)} = \frac{K\sqrt{Q_{x2}^2 + Q_{y2}^2}}{F_2}, \quad \hat{\sigma}_{13}^{(z)} = \frac{K\sqrt{Q_{x3}^2 + Q_{y3}^2}}{F_3} \quad (0 \leq K \leq 2). \quad (1.63)$$

На другому етапі розрахунку визначають напружений стан відводів, трійників розв'язуванням відповідної задачі теорії пружності чи пластичності або визначають номінальний напружений стан, компоненти якого множаться на відповідні значення коефіцієнтів  $K_\sigma$  і  $K_t$ , які характеризують найнапруженіші зони відводів, трійників.

Істинний розподіл напружень у відводах, трійниках трубопроводу дає рішення відповідної задачі теорії пружності або пластичності з граничними умовами, які враховують раніше знайдені значення  $\bar{Q}$  і  $\vec{M}$ . Рішення може бути знайдено аналітично, чисельно за допомогою МСЕ або експериментально.

У [39] для найбільш навантажених точок трійника рекомендовано визначати історію навантаження від моменту початку навантаження  $t_1$  до моменту закінчення навантаження  $t_m$ .

Для кожного з моментів  $t_1$  обчислюють значення компонентів тензора напружень  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\sigma_z$ ,  $\sigma_{xy}$ ,  $\sigma_{yz}$ ,  $\sigma_{xz}$  еквівалентні напруження для



найнавантажениших точок трійника з використанням моделі лінійно-пружної поведінки конструктивних матеріалів.

Еквівалентні напруження без урахування концентрації визначають

$$(\sigma_e)_t = \frac{1}{\sqrt{2}} \left( ((\sigma_x)_t - (\sigma_y)_t)^2 + ((\sigma_y)_t - (\sigma_z)_t)^2 + ((\sigma_z)_t - (\sigma_x)_t)^2 + \right. \\ \left. + 6((\tau_{xy})_t^2 + (\tau_{yz})_t^2 + (\tau_{zx})_t^2) \right)^{0.5}. \quad (1.64)$$

За шістьма компонентами НДС визначають розмах окремих складових напружень  $\Delta\sigma_x$ ,  $\Delta\sigma_y$ ,  $\Delta\sigma_z$ ,  $\Delta\tau_{xz}$ ,  $\Delta\tau_{xy}$ ,  $\Delta\tau_{yz}$ ,  $\Delta\sigma_1$ ,  $\Delta\sigma_2$ ,  $\Delta\sigma_3$  як різницю напружень між двома моментами напруження за формулами

$$(\Delta\sigma_x)_{t,t-1} = (\sigma_x)_t - (\sigma_x)_{t-1}; (\Delta\sigma_y)_{t,t-1} = (\sigma_y)_t - (\sigma_y)_{t-1}; (\Delta\sigma_z)_{t,t-1} = (\sigma_z)_t - (\sigma_z)_{t-1} \quad (1.65)$$

$$(\Delta\tau_{xy})_{t,t-1} = (\tau_{xy})_t - (\tau_{xy})_{t-1}; (\Delta\tau_{yz})_{t,t-1} = (\tau_{yz})_t - (\tau_{yz})_{t-1}; (\Delta\tau_{zx})_{t,t-1} = (\tau_{zx})_t - (\tau_{zx})_{t-1}. \quad (1.66)$$

Недоліком наведених методик розрахунку напруженого стану фасонних елементів трубопроводів є те, що найнапруженішими зонами таких елементів є місця різкої зміни їх геометрії. Послідовність визначення напруження у цих місцях методиками не передбачена, тільки зазначено, що компоненти напружень треба множити на відповідні значення коефіцієнтів  $K_\sigma$  і  $K_\tau$ , які характеризують найнапруженіші зони. Проте, яким чином визначити ці коефіцієнти, в розглянутих методиках не зазначено.

НДС прямолінійних ділянок трубопроводів із різноманітними дефектами стінки досліджений у роботах Банахевича Ю. В. [218, 219], Грудза В. Я. [220, 221], Олійника А. П. [222, 223], Шлапака Л. С. [224, 225]. Однак розроблені дослідниками математичні моделі, отримані залежності, закономірності не можуть

бути застосовані для визначення напружено-деформованого стану елементів трубопровідних систем складної геометричної форми з дефектами стінки.

Згідно з [40], напруження у відводі з напівеліптичною внутрішньою тріщиною розташованою у середній частині відводу (рисунок 1.16) від дії внутрішнього тиску рівні:

– повздовжнє напруження

$$\sigma_{\text{пов.в.вст}} = \frac{Pr_m}{2h(\varphi)} \frac{1}{q_p} \left( 1 + \frac{1}{z} \right), \quad (1.67)$$

де  $h(\varphi)$  – залежна від кута  $\varphi$  товщина стінки відводу;

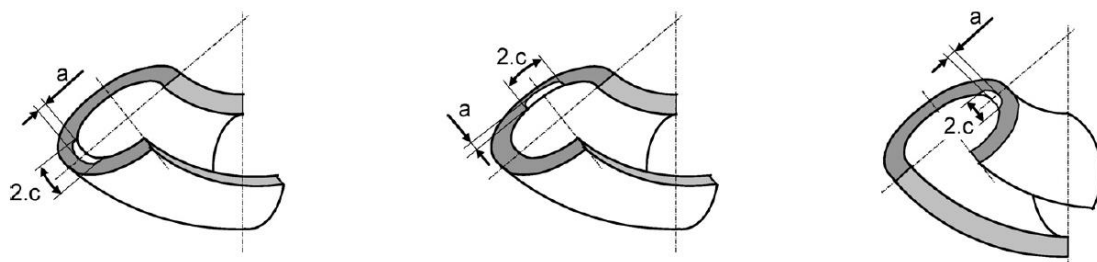
$q_p$  – коефіцієнт зменшення товщини стінки в поперечному перерізі відводу;

$z$  – коефіцієнт;

– кільцеве напруження

$$\sigma_{\text{кц.в.вст}} = \frac{Pr_m C_{1c}^*}{h(\varphi) q_p}, \quad (1.68)$$

де  $C_{1c}^*$  – коефіцієнт, який залежить від геометричних параметрів відводу.



**Рисунок 1.16** – Розрахункова схема відводу з напівеліптичною внутрішньою тріщиною

Коефіцієнт зменшення товщини стінки в поперечному перерізі відводу рівний

$$q_p = \left(1 - \frac{a}{h(\varphi)}\right) + \frac{a}{h(\varphi)} \frac{1}{1 + \left(c / \sqrt{r_m a}\right)}, \quad (1.69)$$

де  $a$  – глибина довжини тріщини;

$c$  – половина довжини тріщини.

Коефіцієнт  $z$  рівний

$$z = 1 + \frac{Pr_m}{2h(\varphi)} \frac{2\pi r_m^2 h}{|M_1|}, \quad (1.70)$$

де  $M_1$  – крутний момент у перерізі відводу в місці тріщини.

Коефіцієнт, який залежить від геометричних параметрів відводу рівний

$$C_{1c}^* = \frac{1,85R_c + 1,35r_m \sin(\varphi)}{2(R_c + r_m \sin(\varphi))}. \quad (1.71)$$

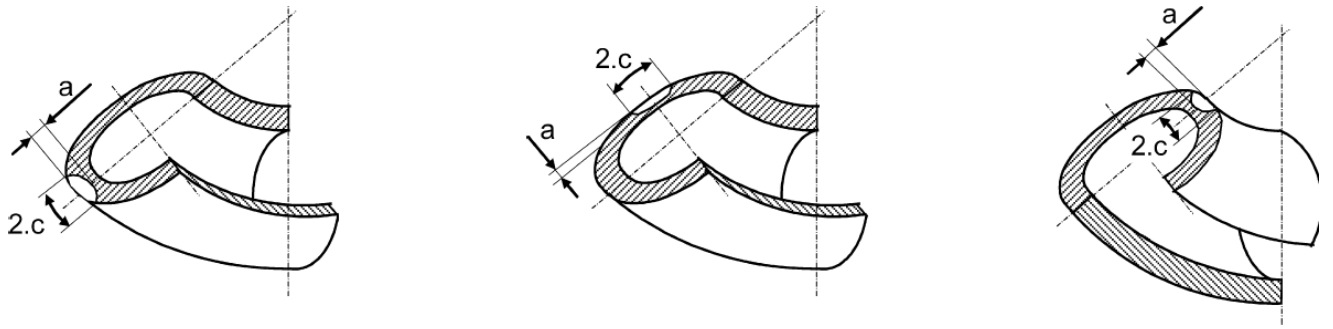
Згідно з [40], напруження у відводі з напівеліптичною зовнішньою тріщиною, розташованою в середній частині відводу (рисунок 1.17), від дії внутрішнього тиску рівні:

– повздовжнє напруження

$$\sigma_{пов.в.зм} = \frac{Pr_m}{2h(\varphi)} \frac{1}{q_p} \frac{1}{0,95}; \quad (1.72)$$

– кільцеве напруження

$$\sigma_{кц.в.зм} = \frac{Pr_m}{h(\varphi)} \frac{C_{1c}^*}{q_p} \frac{1}{0,95}. \quad (1.73)$$



**Рисунок 1.17** – Розрахункова схема відводу з напівеліптичною зовнішньою тріщиною

Для відводів з поодинокими дефектами в [226] модифіковано формулу (1.63) для визначення максимально допустимого тиску

$$[P] = \frac{\sigma_0 h}{r_m} \frac{1 - r_m / R_c}{1 - r_m / (2R_c)} f_d, \quad (1.74)$$

де  $f_d$  – фактор дефекту.

Фактор дефекту рівний

$$f_d = 18,483G^2 - 7,108G + 1,023, \quad (1.75)$$

де  $G$  – коефіцієнт дефекту.

Коефіцієнт дефекту рівний

$$G = \left( \frac{\gamma}{\pi/4} \right)^{0,5} \left( \frac{\theta}{2\pi} \right)^{0,1} \left( \frac{d}{h} \right), \quad (1.76)$$

де  $\gamma$  – осьовий кут локально стоншеного місця;

$\theta$  – коловий кут локально стоншеного місця;

$d$  – глибина дефекту.

Для оцінювання несучої здатності трійників трубопроводів з дефектами в

СТО Газпром 2-2.3-453 [41] рекомендовано використовувати теорію граничної пластичності. Критерій руйнування записано у вигляді залежності граничної інтенсивності деформацій – граничної пластичності  $\varepsilon_c$  від показника об'ємності напруженого стану  $j$

$$\varepsilon_c = \varphi(j), \quad (1.77)$$

$$j = \frac{\sigma_m}{\sigma_i}, \quad (1.78)$$

де  $\sigma_m$  – перший інваріант тензора напружень (середнє напруження);

$\sigma_i$  – другий інваріант тензора напружень (інтенсивність напружень).

Перший і другий інваріанти тензора напружень  $\sigma_m$  і  $\sigma_i$ , відповідно, визначаються за формулами

$$\sigma_m = \frac{1}{3}(\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33}), \quad (1.79)$$

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + (\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + (\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 + 6(\sigma_{12}^2 + \sigma_{23}^2 + \sigma_{31}^2)}, \quad (1.80)$$

де  $\sigma_{11}, \dots, \sigma_{31}$  – компоненти тензора напружень.

Функція  $\varepsilon_c = \varphi(j)$  є характеристикою матеріалу, яка визначається на циліндричних зразках

При оцінці небезпеки руйнування в кожній точці конструкції необхідно розраховувати всі компоненти НДС (рекомендовано застосовувати МСЕ) і визначити граничну пластичність матеріалу  $\varepsilon_c$  (для кожної точки). Досягнутий рівень інтенсивності деформацій визначається за формулою

$$\varepsilon_i = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varepsilon_{11} - \varepsilon_{22})^2 + (\varepsilon_{22} - \varepsilon_{33})^2 + (\varepsilon_{33} - \varepsilon_{11})^2 + 6(\varepsilon_{12}^2 + \varepsilon_{23}^2 + \varepsilon_{31}^2)}. \quad (1.81)$$

Умовою руйнування трійника є перевищення граничної пластичності

$$\varepsilon_i > \varepsilon_c. \quad (1.82)$$

Шлапак Л. С. експериментально дослідив НДС трубопроводів газової обв'язки ГПА КС «Тарутине» [227] та балкових надземних переходів газонафтопроводів [214]. Ці об'єкти містять криволінійні елементи – відводи. Для досліджень НДС відводів було вибрано тензометричний метод, оскільки нерівномірний розподіл напружень у перерізі криволінійних елементів вимагає вимірювань не в одній окремо взятій площині поперечного перерізу відводу, а в декількох точках, кількість яких вибирається залежно від умов експлуатації та конкретної ситуації. [212]

Встановлено, що в умовах довготривалої експлуатації напружений стан трубопроводів газової обв'язки ГПА визначається не тільки зовнішніми та внутрішніми навантаженнями і впливами, але значною мірою й ерозійним зношенням стінки трубопроводів та їх конструктивних елементів, якими є криволінійні елементи, тобто відводи. [225] Також було виявлено, що ріст напружень у вузлах спряження призводить до зростання напруженого стану відводів, які самі є найнапруженішими елементами. Причиною цього були значні переміщення лінійної частини трубопроводів. На основі отриманих даних були побудовані епюри розподілу кільцевих напружень у центральному і двох суміжних перерізах відводів, а також епюри розподілу напружень по довжині відводу в вертикальній площині його деформації. Дослідження показали, що характер розподілу поздовжніх і кільцевих напружень по довжині відводу, який працює в складі компенсатора балкового переходу, залежить не тільки від центрального його кута і умов експлуатації газопроводу (тиск газу і температурного режиму труби), а й від конструктивних особливостей надземних схем прокладання газопроводів у

вигляді самокомпенсуючих балкових систем. [214]

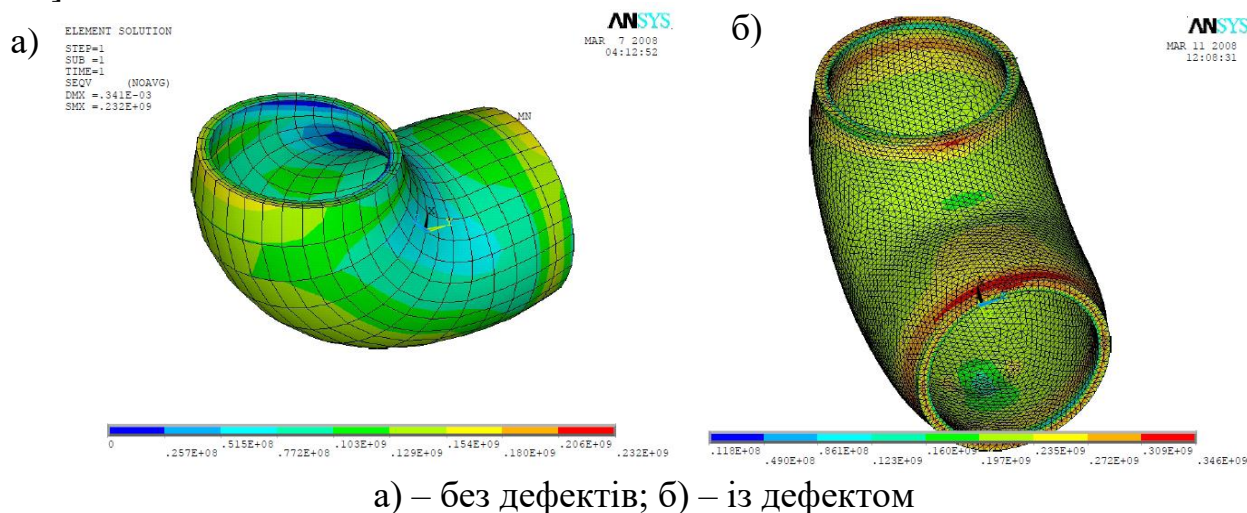
У [47] експериментально в лабораторних умовах досліджено напружено-деформований стан і низьку втомну міцність трійника зі штучно нанесеними об'ємними дефектами, які імітували корозійно-ерозійні пошкодження. НДС трійника досліджувався тензометрією. Тензорезистори з базою вимірювання 3 мм наклеювались на поверхню штучного дефекту. Герметизований трійник навантажували пульсуючим внутрішнім тиском води (від 0,2 МПа до 7,0 МПа) із частотою 4–5 циклів за хвилину. Концентрація напружень у дефектах, розташованих у зонах максимальних конструктивних напружень в трійнику (визначались чисельним моделюванням), у 2,5...3,7 рази перевищувала відповідні значення для дефектів із тими ж геометричними параметрами при їх розташуванні у прямій трубі. Після напрацювання 3060 циклів виникла розгерметизація натурального зразка через виникнення наскрізної тріщини втоми. Для дослідження механічних властивостей металу в місцях штучно нанесених дефектів були вирізані взірці. Виконувалось випробування взірців на розтяг та малоциклову втому на електрогідравлічній машині. Встановлені суттєві відмінності опору різних зон трійника статичному та циклічному навантаженню.

Експериментальні дослідження НДС фасонних елементів трубопровідних систем необхідні, але не повністю достатні. Експериментально неможливо виявити найбільш навантажені місця і визначити величини напружень у цих місцях. Причинами цього є значні труднощі доступу до внутрішньої поверхні фасонних елементів. Доповнення експериментальних досліджень відповідним методами розрахунку, моделювання напружено-деформованого стану дає змогу одержати максимально якісні результати.

Розрахунок НДС магістральних трубопровідних конструкцій, який базується на методах опору матеріалів та будівельної механіки, не дозволяє виконати адекватний аналіз міцності трубопроводів паливно-енергетичного комплексу з необхідною точністю, а в деяких випадках може дати невірну якісну картину НДС конструкції. На сьогодні, інтенсивний розвиток отримують чисельні методи, що дозволяють значно розширити постановку вирішуваних завдань за рахунок більш

повного врахування реальних умов навантаження та властивостей використовуваних матеріалів. Серед цих методів найбільшого поширення набув МСЕ. До переваг МСЕ слід віднести такі: мінімум вимог до вихідної інформації, оптимальна форма результатів, врахування температурного впливу. [228]

Чисельним моделюванням виконано дослідження НДС відводів трубопроводів без дефектів (рисунок 1.18, а) [42, 229, 230] і з корозійними, ерозійними дефектами круглої чи прямокутної форми різних розмірів із ввігнутого й опуклого боку відводів (рисунок 1.18, б) [42–44], тріщинами [231, 232]. Вплив дефектів із ввігнутого боку відводів на їх НДС був значно більший, ніж з опуклого. [233]



**Рисунок 1.18** – Розподіл напружень у відводі трубопроводу

У [234] чисельним моделюванням визначено значення максимально допустимого тиску в відводі. При цьому моделювання виконувалось для відводів із внутрішніми та зовнішніми дефектами з опуклого боку і для відводів без дефектів. Результати показали, що максимально допустимий тиск залежить не тільки від розмірів дефекту, але і його місцезнаходження. Для розриву відводів, які мають внутрішні дефекти, потрібний менший тиск, ніж для відводів, які мають зовнішні дефекти таких же геометричних параметрів.

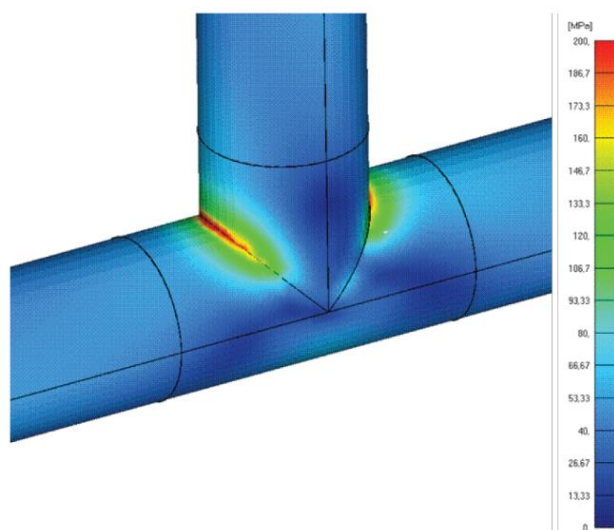
У [230, 235] досліджено НДС відводу трубопроводу з зовнішнім тривимірним дефектом з опуклого боку, геометричні розміри якого змінювалися в часі. Було встановлено, що за тривалої експлуатації (понад 40 років) відвід із дефектом



втратить міцність і може зруйнуватись навіть при номінальних навантаженнях. Також визначено зони відводу при можливому навантаженні, в яких він втратить свою міцність.

Порівняння експериментальних результатів, отриманих тензометрією, та результатів моделювання показало, що чисельна модель достовірно розраховує НДС дефектних відводів при різних умовах навантаження. [235]

Також чисельним моделюванням виконано дослідження НДС трійників трубопроводних систем без дефектів (рисунок 1.19) [236–240] і з дефектами у різних місцях трійника [45, 46, 241]. Результати чисельного моделювання показують, що максимальні напруження зі складним просторовим розподілом виникають у місці з'єднання відгалуження та магістралі трійника. Величина цих напружень залежить від характеру навантаження [45, 241], співвідношення діаметрів, товщин стінок і довжин магістралі та відгалуження трійника [237], конструктивного виконання їх з'єднання (під прямим кутом (зварні трійники) [239, 242], заокругленого (штамповані трійники) [236]) кута між магістралюю і відгалуженням трійника [243, 244], наявності або відсутності підсилюючих накладок [45, 238]. Конструктивна концентрація напружень досягає досить високих значень і становить, залежно від типу трійника,  $\alpha_\sigma = 3,6 \dots 4,5$ . [45]



**Рисунок 1.19** – Розподіл напружень у трійнику

У [245] чисельним моделюванням досліджено НДС відводів і трійників трубопроводів з корозійними дефектами. Такі дослідження було виконано з метою

оцінки здатності композитних бандажів відновити працездатність дефектних відводів і трійників. Тому моделювання було виконано для невідсилених та відсилених композитними бандажами фасонних елементів. Також моделюванням визначався тиск, при якому відбудеться розрив відремонтованого композитним бандажом фасонного елемента. Корозійний дефект відводу був виконаний із вгнутого боку відводу. В трійнику дефект був у стінці магістралі трійника навпроти відгалуження трійника. Достовірність моделювання НДС і визначення тиску розриву була підтверджена експериментальними випробуваннями. Розбіжність результатів не перевищувала 1,6 %. Результати чисельного моделювання й експериментальні випробування показали, що композитні бандажі можна застосовувати для відновлення працездатності відводів і трійників трубопроводів із корозійними втратами металу до 60 % від номінальної товщини.

Недоліком розглянутих аналітичних досліджень, чисельного моделювання, експериментальних досліджень в лабораторних умовах є сильне спрощення геометричної форми корозійних, ерозійних дефектів фасонних елементів, яка ідеалізована до сферичної чи прямокутної і не відповідає реальній геометричній формі дефектів таких елементів.

Хоча існує значна кількість даних, отриманих аналітично, експериментально, чисельним моделюванням, про НДС дефектних фасонних елементів трубопровідних систем різноманітного призначення, все ще дуже важко розробити методику оцінки міцності, залишкового ресурсу таких елементів через велику кількість параметрів, які впливають на досліджуваний процес. Найважливішими з них є геометрична форма та геометричні параметри фасонних елементів, місця дефектів, їх орієнтації, положення (внутрішні чи зовнішні) та діючі навантаження. Переважна більшість досліджень була зосереджена на розмірі дефекту спрощеної геометричної форми, а місце дефекту не змінювалось.

## **1.5 Постановка задач і конкретизація мети досліджень**

Дослідження структури однофазних, багатofазних потоків, втрат

гідравлічної енергії в фасонних елементах трубопровідних систем, ерозійного зношування цих елементів 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 фасонних елементах, емпіричні залежності, значення емпіричних коефіцієнтів, які уточнювали теоретично виведені залежності. Більших із отриманих залежностей, коефіцієнтів визначені для конкретних досліджуваних режимів роботи трубопроводу, геометричних параметрів фасонних елементів. Тому вони не є універсальними, і існує значна недостатність інформації щодо досліджуваних процесів у фасонних елементах трубопровідних систем різноманітного призначення, особливо газонафтопроводів.

Фізична картина потоків у фасонних елементах трубопровідних систем є складною, тривимірною, залежить від багатьох чинників і її надзвичайно важко, а в багатьох аспектах неможливо розрахувати теоретично, дослідити експериментально. До того ж експериментальні дослідження мають ряд недоліків:

- невідповідність режимних, геометричних параметрів реальним (невеликі робочі тиски та діаметри досліджуваних елементів трубопровідних систем);
- неможливість визначити всі потрібні параметри в будь-якій точці складного 3D потоку;
- складність зміни, обмеженість геометричних параметрів фасонних елементів;
- отримані експериментально кореляційні залежності не охоплюють усі режими транспортування, геометричні параметри;
- надзвичайно важко, а в багатьох аспектах неможливо вивчити фізичну картину руху багатофазних потоків елементами складної геометричної форми.

В реальних умовах газонафтопроводів, особливо магістральних, такі експерименти виконати взагалі неможливо, оскільки:

- неможливо візуалізувати потік газу, нафти в магістральному трубопроводі;
- труби магістральних трубопроводів сталеві, що унеможлиблює візуальне спостереження за потоком;

– неможливо визначити точне значення швидкості, тиску, інших параметрів у будь-якій точці 3D потоку в фасонних елементах;

– магістральні трубопроводи перебувають під високим тиском, а газопроводи до того ж є вибухонебезпечними.

Тому залишається багато невирішених питань газогідродинамічних процесів, втрат гідравлічної енергії потоку в фасонних елементах газонафтопровідних системах, їх ерозійного зношування.

Передбачення ерозійного зношування фасонних елементів складних трубопровідних систем є надзвичайно непростою і на сьогодні мало вивченою задачею через широкий спектр параметрів, які впливають на місцезнаходження та швидкість ерозійного зношування. Це зокрема, швидкість турбулентного потоку та рідких і твердих частинок у фасонному елементі, концентрація, розміри, густина частинок, кут атаки, геометрія фасонного елемента, матеріал стінки тощо. Шляхом до розуміння процесів ерозійного зношування фасонних елементів трубопроводів є дослідження руху ними багатофазних потоків. Тому треба моделювати складні процеси з великою кількістю різноманітних параметрів, які також надзвичайно важко визначити.

Ерозійне зношування є одним із чинників, які впливають на напружено-деформований стан фасонних елементів, зменшують їх залишковий ресурс. Також на напружено-деформований стан фасонних елементів трубопроводів чинить вплив складний нерівномірний розподіл тиску в їх внутрішній порожнині. Всі ці обставини накладаються одна на одну і на складну геометричну форму фасонних елементів. З цієї причини фасонні елементи містять зони з підвищеним рівнем напружено-деформованого стану, що суттєво впливає на їх міцність, працездатність.

Тому для оцінювання міцності фасонних елементів трубопровідних систем потрібна синергія гідрогазодинамічних процесів у їх внутрішній порожнині, процесів ерозійного зношування і НДС у тривимірній постановці, тобто потрібно виконувати мультидисциплінарне моделювання.

Проаналізувавши літературні джерела, можна зробити висновок, що

практично всі аналітичні, чисельні або експериментальні дослідження стосуються окремих процесів, які відбуваються в фасонних елементах трубопроводів – чи то газодинамічних, чи ерозійного зношування, чи НДС. Синергію цих процесів, поєднання їх в єдину цілісну фізичну картину на сьогодні не здійснено. Відсутня методика оцінювання міцності ерозійно зношених фасонних елементів трубопровідних систем, яка б одночасно враховувала всі ці процеси.

В багатьох випадках немає достатньо виразних фізичних уявлень про закономірності процесів, які відбуваються в елементах трубопровідних систем, їх вплив на стінку й основні рівняння, які б описали ці процеси, отримати неможливо. Оскільки аналітичне рішення отримати неможливо, то для встановлення кількісних зв'язків можна застосувати чисельні методи.

Ефективним інструментом для вирішення таких задач, як у комплексі (мультидисциплінарне моделювання), так і частково, є чисельне моделювання в сучасних програмних комплексах. Таке моделювання сьогодні набуває все більшого поширення, що обумовлено значним збільшенням останніми роками потужності комп'ютерної техніки, що дає змогу значно зменшити час моделювання, вирішувати складніші задачі. Таке моделювання найбільш наближене до реальності і дає можливість досліджувати процеси розглядати в тривимірній постановці, дає розуміння динаміки руху потоків фасонними елементами. Воно дозволяє в деталях бачити складний тривимірний однофазний чи багатofазний потік всередині елемента і вивчати розподіл тиску, швидкості потоку, кінетичної енергії турбулентності, об'ємної частки суцільної і дисперсної фази; виявляти місця утворення турбулентних вихорів, визначати траєкторії руху дисперсних фаз у суцільній фазі, місця і швидкість ерозійного зношування стінки тощо. Результати гідрогазодинамічного моделювання дають можливість побудувати тривимірні моделі фасонних елементів з ерозійними дефектами складної геометричної форми, які з'являються через певні проміжки часу експлуатації трубопроводу. Також результати гідрогазодинамічного 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 НДС дефектних фасонних елементів трубопроводів. Отже, чисельне моделювання дає змогу дослідити НДС фасонних елементів трубопровідних систем із урахуванням результатів моделюванням газодинамічних процесів у їхній внутрішній порожнині (нерівномірного розподілу тиску), дослідити НДС фасонних елементів із побудованими за результатами газодинамічного моделювання ерозійними дефектами їх стінки складної геометричної форми.

Чисельне моделювання в сучасних програмних комплексах дає змогу перейти на якісно новий рівень дослідження умов роботи фасонних елементів трубопровідних систем, зрозуміти явища, процеси які відбуваються у їхній внутрішній порожнині, дослідити розподіл напружень у стінці.

На сьогодні в літературних джерелах чисельних досліджень однофазних, багатофазних потоків у фасонних елементах трубопровідних систем, їх ерозійного зношування, НДС мало і, в основному, вони стосуються водопроводів та пневмопроводів малих діаметрів. Геометрична форма корозійних, ерозійних дефектів у дослідженнях НДС фасонних елементів надзвичайно спрощена (ідеалізована до сферичної чи прямокутної) і не відповідає реальній геометричній формі таких дефектів. Переважна більшість досліджень була зосереджена на розмірі дефекту спрощеної геометричної форми, а місце дефекту не змінювалось. Місце розміщення дефекту має важливе значення, оскільки геометрична форма фасонних елементів трубопровідних систем має значний вплив на розподіл напружень у їх стінці.

Що ж до трійників трубопровідних систем, то переважна більшість виконаних досліджень різними методами, в основному, стосуються розподілу та злиття потоків у трійниках. Такі результати не є повними, оскільки не охоплюють усі можливі комбінації напрямків потоку в трійниках, які зустрічаються в різноманітних трубопровідних системах, зокрема газонафтопровідних. Для неохоплених комбінацій напрямків потоку в трійниках не встановлено вплив геометрії трійників на гідрогазодинамічні процеси, їх гідравлічну енерговитратність, ерозійне зношування та НДС. Отже, доцільним є дослідження

перелічених процесів для всіх можливих комбінацій напрямків потоку в трійниках.

Дослідження руху однофазних, багатofазних потоків фасонними елементами трубопроводних систем, втрат у них гідравлічної енергії, ерозійного зношування, НДС є багатосторонньою та надзвичайно складною задачею. Більшість із цих процесів важко розрахувати теоретично, а в умовах реальних трубопроводів, особливо магістральних, багато параметрів процесів визначити експериментально неможливо. Порівняно з однофазними потоками рівняння руху двофазних потоків фасонними елементами трубопроводів в літературних джерелах надзвичайно складні, є наближеними через прийнятий ряд припущень, не враховують структури двофазних потоків, нерівномірний розподіл фаз тощо. Місця обстежень фасонних елементів магістральних трубопроводів із ґрунтовним аналізом впливу газодинамічних процесів у їх внутрішній порожнині на ерозійне зношування не передбачені жодним українським НД і фахівці, які виконують обстеження, визначають їх на основі нічим не обґрунтованих логічних міркувань, набутого досвіду. На місцезнаходження та величину ерозійного зношування впливає значна кількість параметрів, багато з яких важко визначити. Тому проблема ерозійного зношування фасонних елементів трубопроводів є практично не вивченою, оскільки немає повного розуміння цього процесу і залишається багато питань, вирішення яких дало б можливість більш ґрунтовно виконувати їх обстеження. Між тим, ерозійне зношування стінки елементів складної геометричної форми є особливо небезпечним для трубопроводів, термін експлуатації яких перевищує 40–50 років, яких є багато у газонафтотранспортній системі України.

До першочергових завдань досліджень треба віднести: комплексне дослідження закономірностей руху однофазних і багатofазних потоків фасонними елементами трубопроводів, закономірностей втрат в них гідравлічної енергії потоку; визначення та вивчення траєкторії руху дисперсних фаз; виявлення місць інтенсивного ударяння дисперсних фаз, які переносяться потоком, до стінки трубопроводу; визначення кутів атаки, діаметрів, швидкості частинок у фасонних елементах; виявлення місць ерозійного зношування фасонних

елементів і розрахунок швидкості ерозійного зношування; визначення НДС фасонних елементів, НДС фасонних елементів із дефектами зі складною геометричною формою.

Тому мета дисертаційної роботи полягає в розробленні наукових основ оцінювання енерговитратності та забезпечення працездатності складних трубопровідних систем шляхом досліджень особливостей руху однофазних і багатофазних потоків фасонними елементами, їх напружено-деформованого стану, процесів ерозійного зношування та ремонту.

#### **Завдання дисертаційної роботи:**

– проаналізувати сучасні підходи та результати досліджень щодо забезпечення ефективності функціонування та безаварійності складних трубопровідних систем;

– визначити закономірності газодинамічних процесів, втрат гідравлічної енергій трубопровідних потоків у фасонних елементах;

– визначити та дослідити траєкторії руху дисперсних фаз фасонними елементами трубопроводів;

– визначити закономірності впливу геометричних параметрів фасонних елементів трубопроводів, режимних параметрів транспортування та характеристик дисперсних фаз на місцезнаходження та інтенсивність ерозійного зношування таких елементів;

– дослідити вплив ерозійного зношення фасонних елементів трубопровідних систем на їх напружено-деформований стан;

– розробити технологію безтраншейного ремонту складних трубопровідних систем, які містять декілька дефектних відводів.



## РОЗДІЛ 2

### ДОСЛІДЖЕННЯ ГАЗОДИНАМІКИ ОДНОФАЗНИХ ПОТОКІВ У ФАСОННИХ ЕЛЕМЕНТАХ ТРУБОПРОВІДНИХ СИСТЕМ

Наведено конструкції, сферу застосування, здійснено 3D моделювання елементів трубопровідних систем складної геометричної форми.

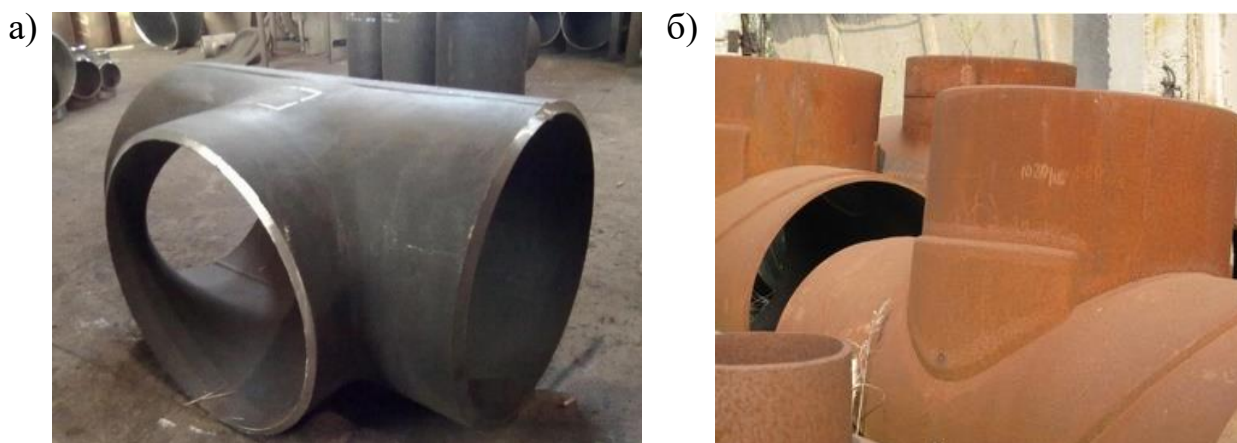
CFD моделюванням визначено закономірності руху однофазних потоків у внутрішній порожнині фасонних елементів трубопровідних систем. Математична модель базується на розв'язанні рівнянь Нав'є-Стокса, неперервності потоку та перенесенні енергії, замкнених двопараметричною  $k-\varepsilon$  або SST моделлю турбулентності з застосуванням пристінної функції та відповідними початковими і граничними умовами. Результати моделювання візуалізовано побудовою ліній течії, полів модуля швидкостей та тиску на контурах, у повздовжніх і поперечних перерізах, заливки модуля швидкостей та тиску в внутрішній порожнині фасонних елементів. Виявлено місця виникнення конфузорних і дифузорних ефектів, вихорів, рециркуляцій, відривання потоку від стінки досліджуваних фасонних елементів. Визначено закономірності між отриманими результатами.

Визначено закономірності впливу напрямків руху потоку трійниками, радіуса відборткування трійників, діаметра відгалуження трійників на газодинамічні процеси у їх внутрішній порожнині, втрати гідравлічної енергії в трійниках. За визначеними втратами тиску розраховано коефіцієнти місцевого опору (втрат енергії) кожного досліджуваного трійника та втрати в ньому гідродинамічного напору (енергії). Отримано рівняння для розрахунку коефіцієнтів місцевого опору рівнопрохідних трійників газопроводів, у яких газовий потік із магістралі повністю перетікає у відгалуження. Дано рекомендації з оптимальної геометричної форми трійників, за якої втрати енергії в них будуть мінімальними. Визначено закономірності впливу радіуса відборткування трійника та тиску в місці його розміщення на втрати в ньому гідравлічної енергії.

## 2.1 Найпоширеніші фасонні елементи складних трубопровідних систем

Сучасні трубопровідні системи містять значну кількість різноманітних елементів складної геометричної форми. Найпоширенішими з них є відводи, трійники. Їх ще називають фасонними елементами або фітингами.

Трійниками є фасонні елементи трубопроводів з трьома приєднувальними кінцями, як правило, для розділення або злиття потоків. За способом виготовлення розрізняють трійники гарячого штампування (штамповані), штамповарні (зі штампованими відводами гарячого штампування) (рисунок 2.1, а), трійники зварні без спеціальних підсилюючих елементів та трійники зварні, підсилені накладками (рисунок 2.1, б). Трійники складаються з основної труби (магістралі) та розміщеного перпендикулярно до неї або під кутом відгалуження (патрубка).



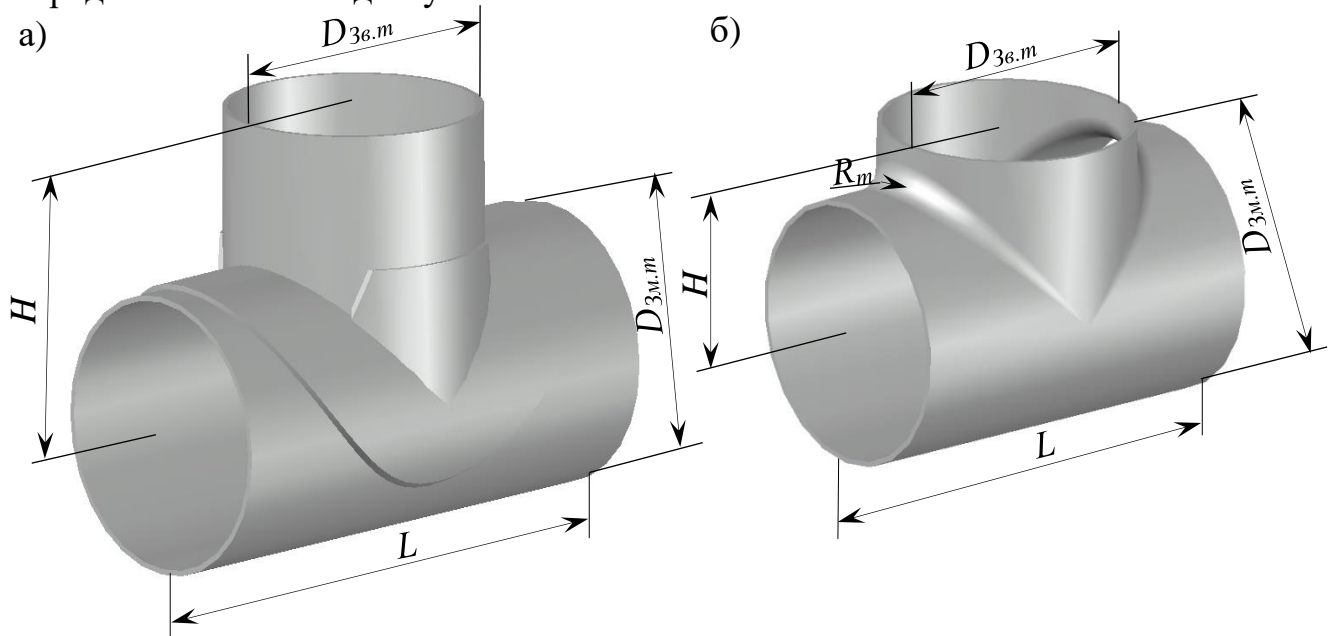
а) – штамповарний; б) – зварний із підсилюючими накладками

**Рисунок 2.1** – Трійники

У зварних трійниках з'єднання магістралі та відгалуження виконується під прямим кутом (рисунок 2.2, а). У трійниках гарячого штампування, штамповарних трійниках перехід від відгалуження до магістралі виконується заокругленням шляхом влаштування відбортування (рисунок 2.2, б). Згідно з вимогами СНиП 2.05.06 [246] радіус відбортування  $R_m$  повинен бути меншим ніж  $0,1 \cdot D_{зв.т}$ , де  $D_{зв.т}$  – зовнішній діаметр відгалуження трійника.

Для зменшення напружень у місці приєднання відгалуження до магістралі зварних трійників їх підсилюють накладками. Накладки розміщують на магістралі

у вигляді кільця (комір) і на відгалуженні (рисунок 2.2, а). Для трійників із відношенням діаметра відгалуження  $D_{зв.т}$  до зовнішнього діаметра магістралі  $D_{зм.т}$  менше 0,2 накладки не передбачаються, а з відношенням менше 0,5 накладки не передбачаються на відгалуженні.



а) – зварний трійник; б) – штампований трійник

**Рисунок 2.2** – Геометричні параметри трійників

Трійники бувають рівнопрохідними та нерівнопрохідними. Рівнопрохідний трійник має однакові діаметри магістралі та відгалуження. Нерівнопрохідний трійник має відгалуження меншого діаметра, ніж магістраль.

Геометричні розміри трійників, товщину стінки магістралі та відгалуження трійників розраховують згідно з вимогами СНиП 2.05.06 [246].

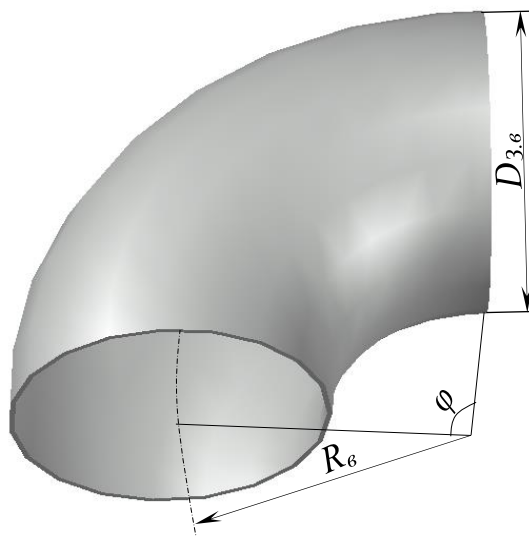
Відводами називають криві фасонні елементи, призначені для зміни напрямку трубопроводу (рисунок 2.3). За способом виготовлення розрізняють відводи гнуті гладкі, виготовлені з труб протягуванням через рогоподібне осердя в гарячому стані, гнуті при індукційному нагріванні, штамповані з двох половин. [247]

Геометричними параметрами відводів є зовнішній діаметр відводу  $D_{з.в}$ , кут вигину  $\varphi_в$  і радіус вигину відводу  $R_в$  (рисунок 2.4). Відводи виготовляють з кутами вигину  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$  і  $90^\circ$  та радіусами вигину DN, 1,5 DN, 2 DN, 2,5 DN, 3,5 DN, 5 DN і 10 DN, де DN – умовний діаметр відводу. Товщина стінки відводів

розраховується згідно з вимогами СНиП 2.05.06 [246].



**Рисунок 2.3 – Відводи**

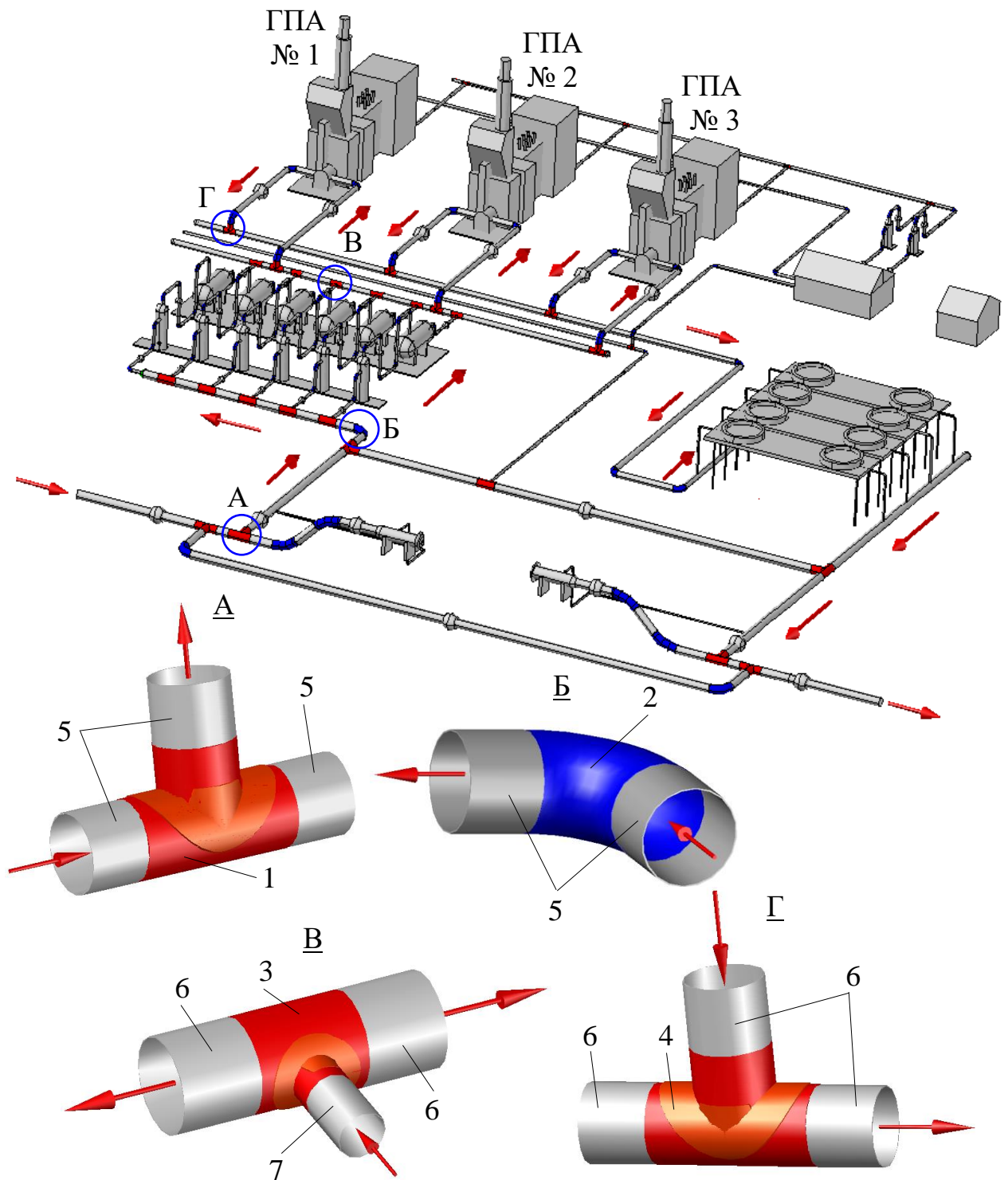


**Рисунок 2.4 – Геометричні параметри відводів**

Особливо багато відводів і трійників є в об'язках різних технологічних об'єктів – компресорних станцій (рисунок 2.5), насосних станцій, газопереробних заводів, підземних сховищ газу, газорозподільних станцій тощо.

У відводах об'язки компресорної станції (рисунок 2.5) відбувається зміна напрямку потоку продукту на кут  $90^\circ$  (за винятком відводів на вході та виході камер запускання та приймання внутрішньотрубних засобів). У трійниках об'язки компресорної станції можливі різні схеми руху газового потоку:

– газовий потік рухається магістраллю трійника 1 (рисунок 2.5) і з магістралі направляється у відгалуження трійника;



1 – трійник зварний рівнопрохідний із підсилюючими накладками 1420×28 – 1420×28; 2 – відвід 90° 1420×24; 3 – трійник зварний із підсилюючими накладками 1020×18 – 529×10; 4 – трійник зварний із підсилюючими накладками 1020×20 – 1020×20; 5 – труба 1420×18,7; 6 – труба 1020×12,3; 7 – труба 529×7

**Рисунок 2.5** – Схема компресорної станції магістрального газопроводу

– газовий потік рухається відгалуженням трійника 3 (рисунок 2.5) і з відгалуження направляється у магістраль трійника, де частина газового потоку перетікає в одну сторону магістралі, а друга частина – в іншу сторону магістралі;

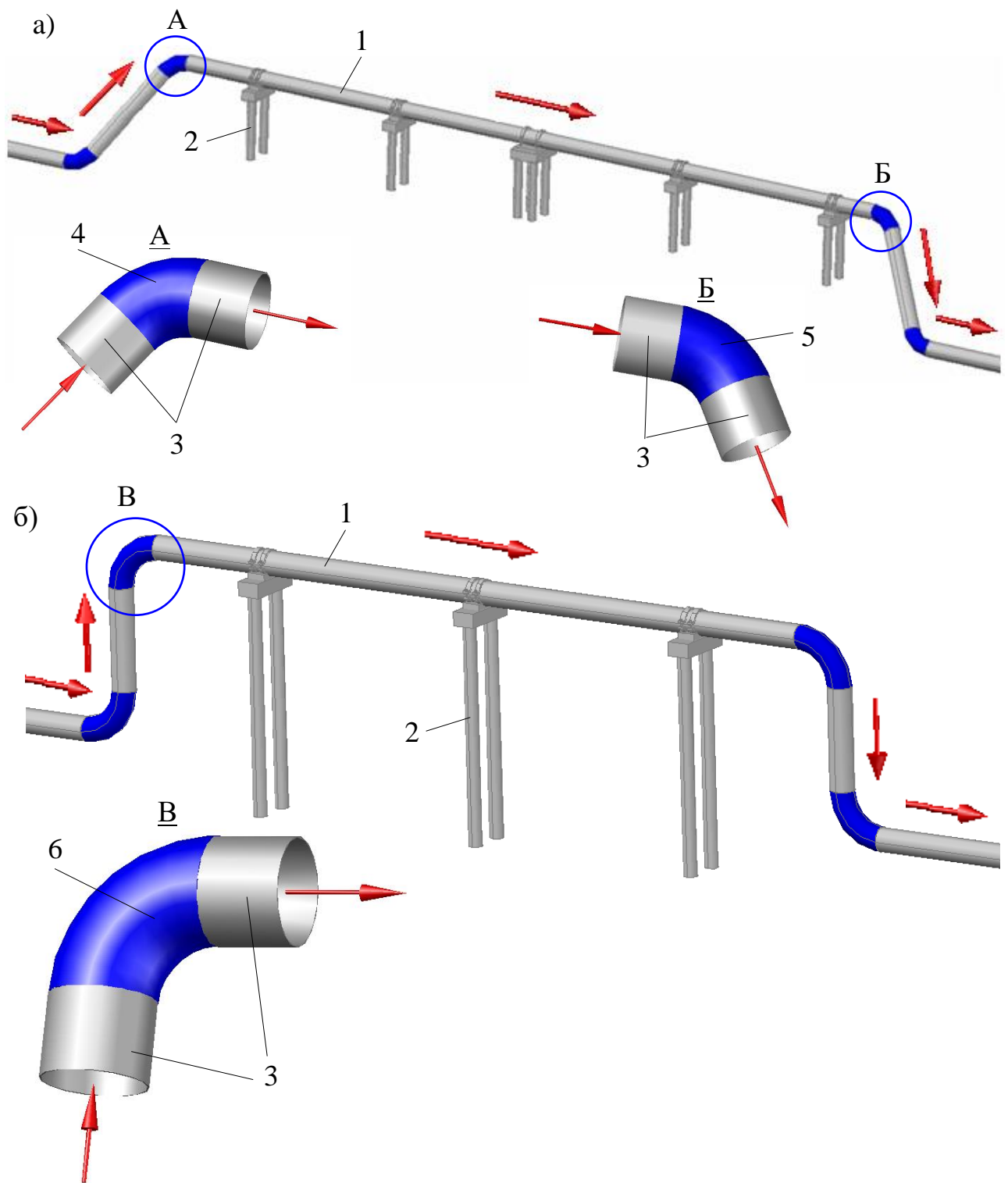
– газовий потік рухається відгалуженням трійника 4 (рисунок 2.5) і з відгалуження направляється в одну зі сторін магістралі.

Відводи містять Г-, Z- і П-подібні компенсатори надземних переходів трубопроводів; також вони є в місцях різких зломів рельєфу місцевості, поворотів траси трубопроводу. У відводах Z-подібних компенсаторів потік змінює напрям на кут  $60^\circ$  (рисунок 2.6, а), а у відводах Г- і П-подібних компенсаторів відбувається зміна напрямку потоку продукту на кут  $90^\circ$  (рисунок 2.6, б). Відводи та трійники містяться в місцях під'єднання до магістралі лупінгів, резервних ниток підводних переходів. Також трійники розташовані на початку кожного відводу від магістралі, в місцях перемичок трубопроводів. У трійниках на початку кожного відводу від магістралі газ рухається магістраллю трійника, і з магістралі частина потоку направляється у відгалуження трійника (рисунок 2.7). [54]

## **2.2 Дослідження газогідродинамічних процесів у фасонних елементах трубопроводів**

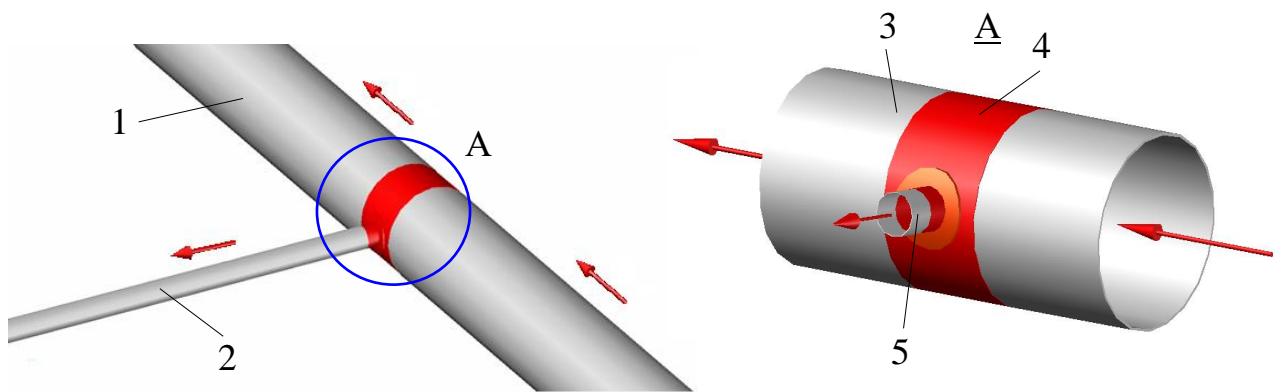
### **2.2.1 Вибір методики дослідження**

У фасонних елементах трубопроводів відбувається зміна напрямку руху продукту, що зумовлює складну фізичну картину руху потоку. Наявні турбулентний рух потоку, нерівномірний розподіл швидкості його руху та тиску, що впливає на втрати гідравлічної енергії потоку, ерозійне зношування, напружено-деформований стан фасонних елементів і зменшує їх залишковий ресурс. Тому необхідне всебічне вивчення структури однофазних потоків у внутрішній порожнині фасонних елементів трубопроводів.



а) – надземний перехід з Z-подібними компенсаторами; б) – надземний перехід з Г-подібними компенсаторами; 1 – трубопровід; 2 – опора; 3 – труба 1420×21,5; 4, 5 – відвід 60° 1420×28; 6 – відвід 90° 1420×28

**Рисунок 2.6** – Схеми надземних переходів трубопроводів



1 – трубопровід; 2 – відвід; 3 – труба 1420×21,5; 4 – трійник зварний з підсилюючою накладкою 1420×20 – 325×9; 5 – труба 325×8

**Рисунок 2.7** – Схема відводу від магістралі

Одним із перспективних методів дослідження закономірностей руху трубопровідних потоків у фасонних елементах є CFD моделювання, яке дає змогу виконати як окремий розрахунок, так і вирішити завдання в комплексі. До програмних комплексів CFD моделювання тривимірних потоків рідин і газів відносяться ANSYS Fluent, ANSYS CFX, Flow Vision, Flow3D, SolidWorks. Наведеними програмними комплексами виконують чисельне моделювання тривимірних потоків рідин і газів методом скінченних об'ємів. [55, 83]

У таких програмних комплексах можна моделювати стаціонарні та нестаціонарні, одно- та багатофазні потоки рідин і газів, ерозійне зношення стінки елементів трубопровідних систем складної геометричної форми. Застосування різних моделей турбулентності й адаптивної розрахункової сітки дає змогу моделювати складні потоки, потоки з сильним завихренням. За результатами досліджень можна виявляти місця вихроутворення та відривання потоку від стінки, де відбуваються значні втрати гідравлічної енергії.

CFD моделювання найбільш наближене до реальності і демонструє динаміку руху потоків фасонними елементами, дозволяє краще бачити тривимірний потік всередині елемента і вивчати його структуру, визначати втрати тиску, виявляти турбулентності тощо. CFD моделювання дає можливість оптимізувати геометрію фасонних елементів таким чином, щоб втрати гідравлічної енергії потоку в них були мінімальними, що, своєю чергою, дає змогу проектувати трубопровідні



системи найменш енерговитратними. В даному дослідженні тривимірне CFD моделювання будемо виконувати в програмному комплексі ANSYS Fluent Academic методом скінченних об'ємів. Завдяки сучасному програмному забезпеченню, яке є одним з найкращих варіантів для важких і точних розрахунків, можна зекономити багато часу і не робити велику кількість експериментів для різних діаметрів, різної геометрії фасонних елементів, різних тисків у трубопроводі тощо. CFD моделювання дає розуміння динаміки руху потоків фасонними елементами, можна краще бачити потік всередині елемента і вивчати втрати тиску, турбулентність, кінетичну енергію тощо. Результати CFD моделювання можна імпортувати в модулі розрахунків напружено-деформованого стану та досліджувати міцність модельованого елемента.

### 2.2.2 Математичні моделі однофазних трубопровідних потоків у фасонних елементах

Тривимірне CFD моделювання потоків у фасонних елементах трубопроводів будемо виконувати шляхом чисельного розв'язування систем рівнянь, які описують найзагальніший випадок руху трубопровідних потоків. Такими є рівняння Нав'є – Стокса (2.1), яке виражає собою закон збереження імпульсу, (або Рейнольдса (2.2), якщо потік турбулентний), і неперервності потоку (2.3), яке виражає собою закон збереження маси,

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right) + f_i, \quad (2.1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \bar{u}_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \bar{u}_i \bar{u}_j) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \bar{u}_i' \bar{u}_j') = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \mu \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \right) + f_i, \quad (2.2)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j) = 0, \quad (2.3)$$

де  $x_i, x_j$  – координати;

$t$  – час;

$u_i, u_j$  – компоненти швидкості;

$\rho$  – густина газу;

$\mu$  – молекулярна динамічна в'язкість газу;

$f_i$  – доданок, який враховує дію масових сил;

$p$  – тиск;

$\bar{u}_i$  – усереднені за часом значення швидкостей;

$\bar{u}'_i$  – складові пульсації швидкості. [248–250]

Для опису турбулентності в CFD-моделюванні використовувались стандартна, одна з найпоширеніших  $k - \varepsilon$  ( $k$  – турбулентна кінетична енергія,  $\varepsilon$  – швидкість дисипації турбулентної кінетичної енергії) модель турбулентності, яка передбачає розв'язання наступних рівнянь:

– рівняння кінетичної енергії турбулентності  $k$

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla(\rho u k) = \nabla \left( \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right) + \mu_t G - \rho \varepsilon; \quad (2.4)$$

– рівняння дисипації турбулентної кінетичної енергії  $\varepsilon$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \nabla(\rho u \varepsilon) = \nabla \left( \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right) + C_1 \frac{\varepsilon}{k} \mu_t G - C_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k}, \quad (2.5)$$

де  $u$  – швидкість потоку газу;

$\mu_t$  – турбулентна динамічна в'язкість газу;

$\sigma_k$  – коефіцієнт, рівний одиниці;

$G$  – розрахунковий параметр;

$\sigma_\varepsilon$  – коефіцієнт, рівний  $\sigma_\varepsilon=1,3$ ;

$C_1$  – коефіцієнт, рівний  $C_1=1,44$ ;

$C_2$  – коефіцієнт, рівний  $C_2=1,92$ . [251–254]

Генерація турбулентної кінетичної енергії

$$G = -\rho u_i u_j \frac{\partial u_j}{\partial x_i}. \quad (2.6)$$

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

Для розрахунку відривних течій в трійниках було вибрано SST (shear stress transport) модель турбулентності. У SST моделі виконується вибір між  $k-\omega$  (поблизу стінки) і  $k-\varepsilon$  (далеко від стінки) моделями. Рівняння  $k-\omega$  моделі застосовуються в пристінному шарі аж до поверхні стінки.

$k-\omega$  модель розроблена Wilcox D. C. [255] і є основою комбінованої моделі створеної пізніше Menter F. R. [256], яка об'єднує  $k-\omega$  і  $k-\varepsilon$  моделі. Рівняння  $k-\omega$  моделі має вигляд

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial \rho k u_j}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{k1}} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + \rho P_k - \rho C_\mu k \omega, \quad (2.7)$$

$$\frac{\partial \rho \omega}{\partial t} + \frac{\partial \rho \omega u_j}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{\omega 1}} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + \alpha_1 \frac{\omega}{k} \rho P_k - \rho \beta_1 \omega^2, \quad (2.8)$$

де  $\sigma_{k1}$ ,  $C_\mu$ ,  $\sigma_{\omega 1}$ ,  $\beta_1$  – константи;

$P_k$  – швидкість генерації кінетичної енергії турбулентності;

$\omega$  – час розпаду вихорів.

Рівняння (2.4) і (2.5)  $k-\varepsilon$  моделі записуються так, щоб використовувати  $\omega$  замість  $\varepsilon$

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial \rho k u_j}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{k2}} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + \rho P_k - \rho C_\mu k \omega, \quad (2.9)$$

$$\frac{\partial \rho \omega}{\partial t} + \frac{\partial \rho \omega u_j}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{\omega 1}} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + 2\rho \frac{1}{\sigma_{\omega 2} \omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} + \alpha_2 \frac{\omega}{k} \rho P_k - \rho \beta_2 \omega^2, \quad (2.10)$$

де  $\sigma_{\omega 2}$ ,  $\alpha_2$ ,  $\beta_2$  – константи.

Турбулентна в'язкість

$$\mu_t = \rho \frac{k}{\omega}. \quad (2.11)$$

Щоб активувати кожен з перерахованих моделей в своїй зоні потоку, на основі рівнянь (2.7), (2.8) та (2.9), (2.10) формулюється комбінована  $k$ - $\omega$  модель

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial \rho k u_j}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{k3}} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + \rho P_k - \rho C_\mu k \omega, \quad (2.12)$$

$$\frac{\partial \rho \omega}{\partial t} + \frac{\partial \rho \omega u_j}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{\omega 3}} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + (1 - F_1) 2\rho \frac{1}{\sigma_{\omega 2} \omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} + \alpha_3 \frac{\omega}{k} \rho P_k - \rho \beta_3 \omega^2, \quad (2.13)$$

де  $\sigma_{k3}$ ,  $\sigma_{\omega 3}$ ,  $\alpha_3$ ,  $\beta_3$  – константи;

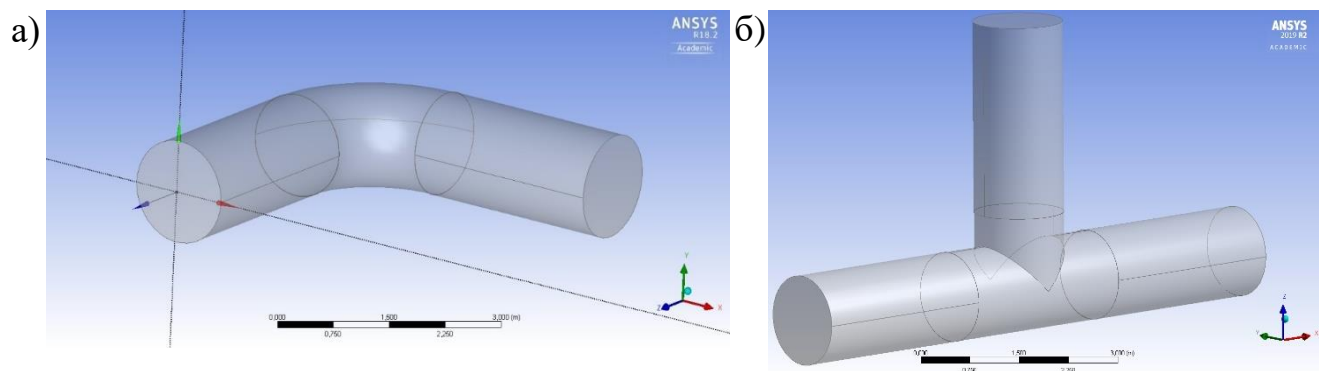
$F_1$  – функція перемикач, яка формується в такий спосіб, щоб визначити, чи знаходиться дана точка поблизу поверхні, чи далеко від неї. [256]

### 2.2.3 Геометричне 3D моделювання внутрішньої порожнини фасонних елементів трубопроводів

Для дослідження газодинамічних процесів у фасонних елементах трубопроводів треба враховувати значний вплив їх геометричної форми на

формування потоку. Оскільки трубопровідні потоки в елементах трубопровідних систем складної геометричної форми є надзвичайно складними, а їх фізична картина руху – тривимірна, то дослідження треба виконувати із застосуванням 3D геометричного моделювання. Тривимірні моделі фасонних елементів, конструкція та геометричні розміри яких ідентичні промисловим зразкам, були накреслені в системі автоматизованого проектування та креслення AutoCAD. Геометрія фасонних елементів відповідає широко використовуваним у газовій і нафтовій промисловості стандартам, зокрема ТУ У 27.2-05747991-001 [257], ГазТУ 102-488/1-05 [258], ОСТ 102-61 [259]. Причому було накреслено фасонні елементи з прилеглими ділянками труб геометричні, розміри яких відповідають технічним умовам. Товщина стінки труб розраховувалась залежно від тиску в місці розміщення фасонного елемента і з урахуванням категорії ділянки трубопроводу.

Накреслені в AutoCAD тривимірні моделі фасонних елементів (рисунок 2.5, рисунок 2.6, рисунок 2.7) зберігались із розширенням AutoCAD (.iges) й імпортувались у програмний комплекс ANSYS Fluent (рисунок 2.8).



а) – відвід; б) – зварний трійник

**Рисунок 2.8** – Імпортовані в програмний комплекс ANSYS Fluent геометричні моделі фасонних елементів

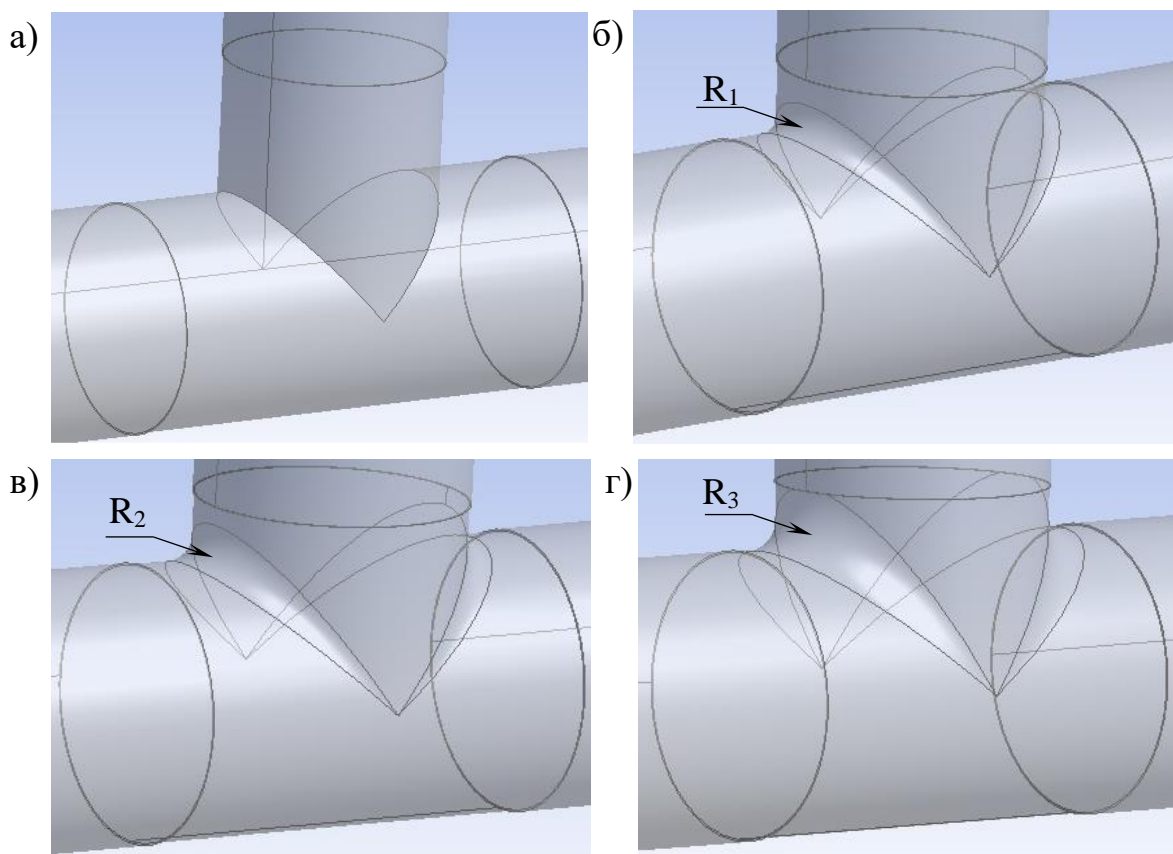
Геометричними параметрами відводів трубопроводів, від яких залежать гідрогазодинамічні процеси у їх внутрішній порожнині, є внутрішній діаметр відводу  $D_{в.в}$ , кут вигину відводу  $\varphi_v$  і радіус вигину відводу  $R_v$  (рисунок 2.2). Щоб дослідити вплив цих параметрів на гідрогазодинамічні процеси у відводах, було вибрано п'ять різних зовнішніх діаметрів відводів – 89 мм, 219 мм, 530 мм, 1020 мм

та 1420 мм. Для діаметру 530 мм було накреслено відводи з радіусом вигину, рівним DN (DN – умовний діаметр відводу), та кутами вигину 30°, 45°, 60° та 90°, а також з кутом вигину 90° та радіусами вигину DN, 1,5 DN, 2 DN, 2,5 DN і 3,5 DN. Відводи були накреслені з прилеглими ділянками труб.

Щоб дослідити вплив геометричної форми трійників на параметри потоку, гідравлічну енерговитратність трубопроводних систем, було вибрано п'ять різних зовнішніх діаметрів рівнопрохідних трійників – 219 мм, 530 мм, 1020 мм і 1420 мм. Товщина стінки кожного трійника розраховувалась залежно від тиску в місці його розміщення, і визначався його внутрішній діаметр. Для кожного з вибраних діаметрів трійників було накреслено геометричну модель його внутрішньої порожнини. Була накреслена внутрішня порожнина зварних трійників, у яких з'єднання магістралі та відгалуження виконується під прямим кутом (рисунок 2.9, а), та внутрішня порожнина штампованих трійників, в яких влаштовується відбортування. Оскільки радіус відбортування штампованого трійника  $R_T$  повинен бути не меншим  $0,1 \cdot D_{зв.т}$ , то для кожного з п'яти різних діаметрів таких трійників було накреслено п'ять моделей внутрішньої порожнини з радіусом відбортування, який змінювався від  $0,1 \cdot D_{зв.т}$  до максимально можливого. Приклади геометричних моделей таких штампованих трійників наведені на рисунку 2.9, б–г.

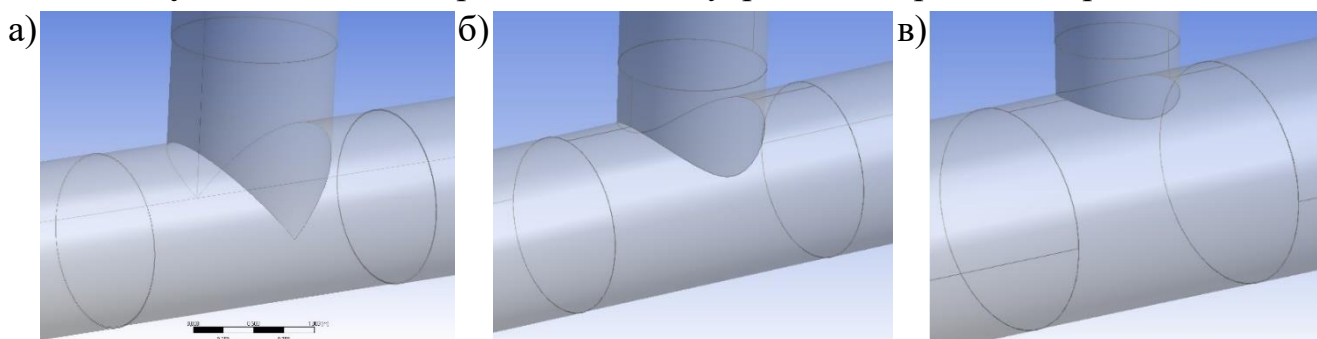
Щоб дослідити вплив діаметра відгалуження трійників на параметри потоку, гідравлічну енерговитратність трубопроводних систем, для кожного з п'яти відібраних різних зовнішніх діаметрів магістралі трійників обиралось п'ять різних діаметри відгалуження і моделювалась внутрішня порожнина таких трійників. Приклади цих моделей наведені на рисунку 2.10.

Для моделювання трубопроводних потоків у препроцесорі Fluent – Meshing генерувалась об'ємна розрахункова сітка Automatic – усі досліджувані геометричні моделі заповнювались тригранними призмами, а там, де їх застосування неможливе – паралелепіпедами (рисунок 2.11). Для кращого опису приграничного шару був створений пристінковий шар ґраток Inflation (рисунок 2.11).



а) – зварний; б), в), г) – штапований

**Рисунок 2.9** – Геометричні моделі внутрішньої порожнини трійників



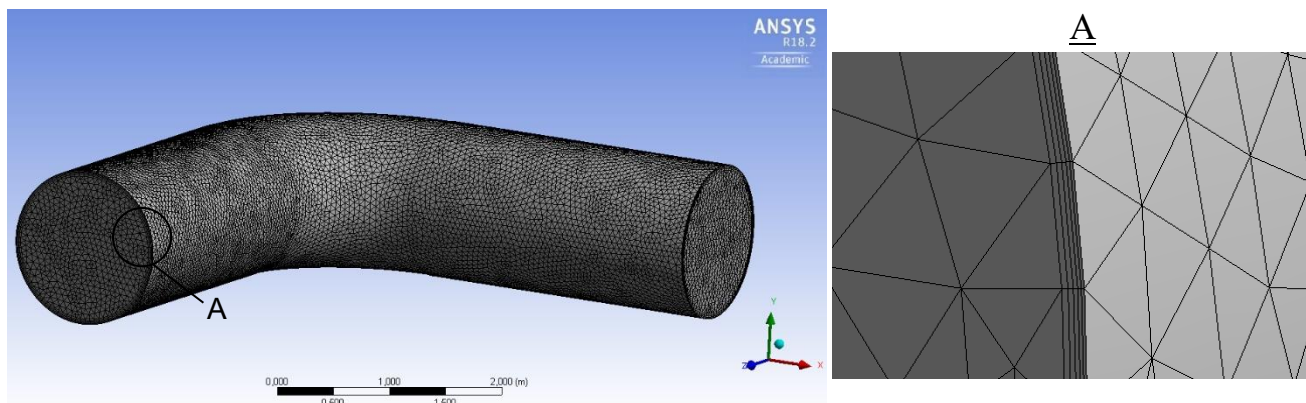
а) –1420 – 1420 мм; б) –1420 – 1020 мм; в) –1420 – 720 мм

**Рисунок 2.10** – Геометричні моделі внутрішньої порожнини зварних трійників

### 2.2.4 Граничні умови

У препроцесорі програмного комплексу ANSYS Fluent для відводів було вибрано стандартну двопараметричну  $k - \varepsilon$  модель турбулентності, а для трійників – SST модель турбулентності. Дані моделі мають три модифікації (стандартна, RNG і Realizable). В полі опцій моделей турбулентності було вибрано модифікацію

Realizable.



**Рисунок 2.11** – Розрахункова об’ємна сітка

Вибрані моделі турбулентності не дають змогу повною мірою змодельовати ефекти, які відбуваються поблизу стінок. Тому для якісного моделювання течій поблизу стінки в ANSYS Fluent застосовуються пристінні функції. Вибиралась пристінна функція Enhanced Wall treatment – розширене пристінне моделювання.

Із бази даних матеріалів ANSYS Fluent вибирався транспортований продукт і присвоювався розрахунковій сітці. Для розв’язання задач газодинаміки враховувалась стисливість газу. Тому задавалась залежність густини газу від параметрів потоку. Для цього в меню Materials в списку Density вибирався пункт Real-gas. Пори цьому до розв’язуваних рівнянь автоматично додавалось рівняння енергії (Energy) і під час задавання граничних умов задавалась температура газу. Як матеріал стінки, з бази даних матеріалів ANSYS Fluent вибиралась сталь.

Для дослідження динаміки руху потоку фасонними елементами трубопроводів задавались наступні граничні умови. На вході в фасонний елемент задавалась масова витрата Mass flow inlet, а на виході – тиск Pressure outlet. При такому заданні граничних умов турбулентності на вході в фасонний елемент на вході приймається рівномірний в перерізі розподіл потоку з типовою турбулентною епюрою швидкостей потоку. Крім задавання масової витрати на вході, в вікні Mass flow inlet задавалась інтенсивність турбулентності (Intensity) 5 %, гідравлічний діаметр (Hydraulic Diameter) і температура продукту на вході. Під час задавання тиску на виході в вікні Pressure outlet також задавалась інтенсивність



турбулентності (Intensity) 5 %, гідравлічний діаметр (Hydraulic Diameter) і температура газу на виході. Як правило, інтенсивність турбулентності не перевищує 20 %, але в більшості випадків знаходиться в інтервалі від 1 до 10 %. Для інтенсивності турбулентності 5 % потік вважається повністю турбулентним.

Також задавалась гранична умова стінка (Wall) з задаванням коефіцієнта еквівалентної шорсткості труб  $h_S=0,03$  мм.

Після задання граничних умов налаштовувались параметри вирішувача. В дереві проекту вибиралась вкладка Solution methods, де в зоні Pressure-Velocity Coupling вибирався алгоритм зв'язку рівняння руху газу та неперервності. 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 всіх 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.

Рівняння Нав'є-Стокса вирішуються чисельним методом. При цьому диференційні рівняння в довільному вузлі сітки замінюються алгебраїчними рівняннями-аналогами, які описують зміну змінної між декількома сусідніми точками. Рівняннями-аналоги розв'язувались ітераційним методом. Після кожної ітерації розраховуються деякі значення змінних. Вони підставляються в вихідні рівняння, записані в вигляді  $f(p, T, \rho, x, y, z, v, w, \dots) = 0$ . Оскільки розв'язок є приблизним (одже розв'язується алгебраїчний аналог, а не диференційне рівняння), то під час підстановки результатів розрахунків отримується, що  $f(p, T, \rho, x, y, z, v, w, \dots) = R$ . Величина  $R$  називається неув'язкою і є критерієм, за яким роблять висновок про процес розв'язання. Очевидно те, що, чим ближче значення  $R$  до нуля, тим ближчий розв'язок дискретного аналога до розв'язку вихідного диференційного рівняння.

Розв'язок задачі можна рахувати закінченим при виконанні наступних умов:  
– різниця витрат робочого тіла між вхідною і вихідною границею

наближається до нуля і мало змінюється від ітерації до ітерації;

– неув'язки всіх рівнянь під час розрахунку досягають значень, менших за рекомендовану границю;

– неув'язки всіх рівнянь під час розрахунку суттєво не змінюються.

Для дослідження динаміку руху потоків фасонними елементами трубопроводів неув'язка за всіма рівняннями, крім рівнянь енергії задавалась  $R = 0,0001$ . Для рівняння енергії неув'язка задавалась  $R = 1 \cdot 10^{-6}$ .

Після налаштування параметрів вирішувача здійснювалась гібридна ініціалізація.

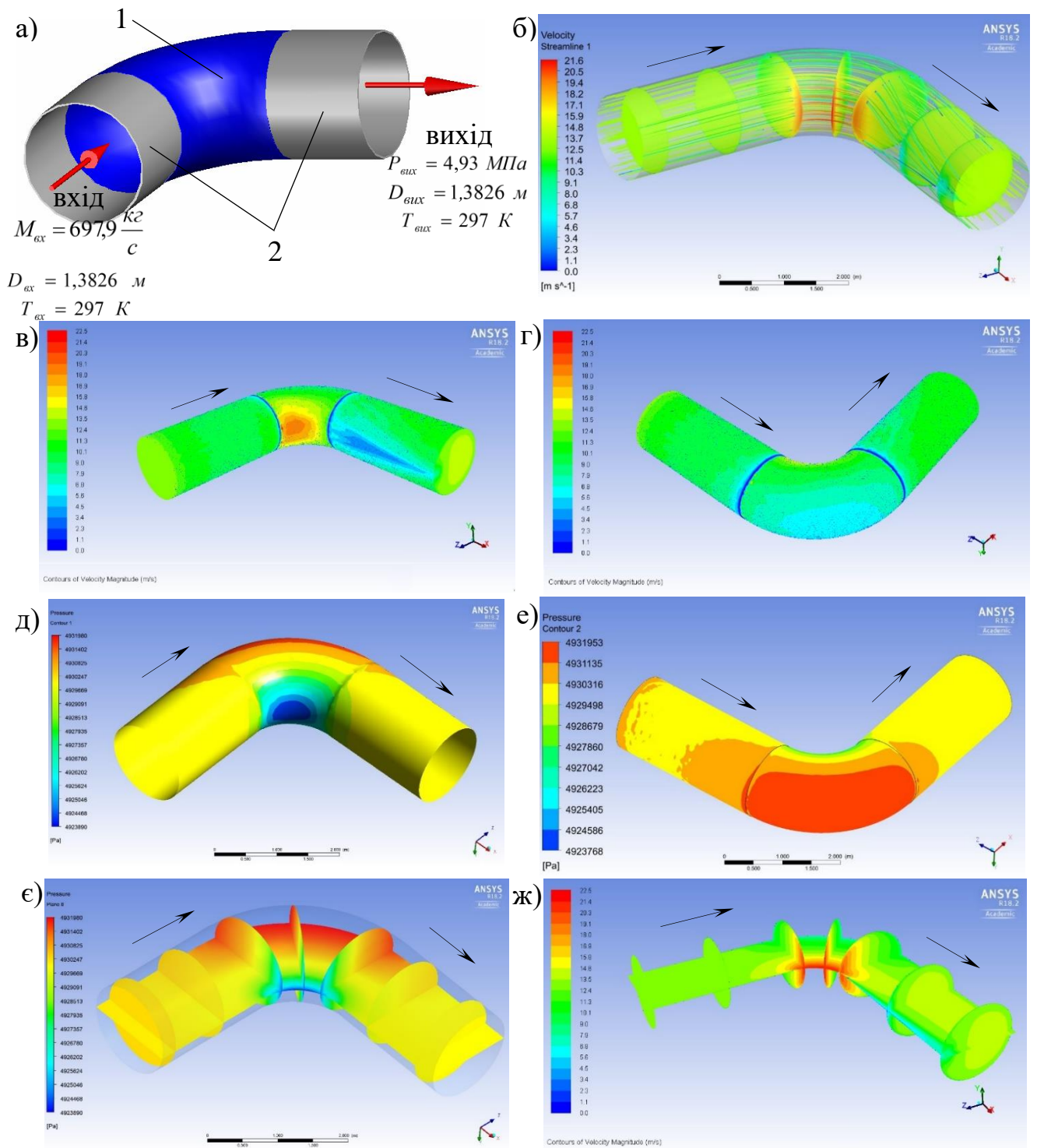
Повна збіжність ітераційного процесу досягалась приблизно за однакову кількість ітерацій – 200. Така кількість ітерацій виконувалась близько години процесором intel core i3 (частота 2,2 ГГц, оперативної пам'яті 4 ГБ).

### **2.2.5 Дослідження структури однофазних потоків у фасонних елементах трубопровідних систем**

Розглянемо відвід 2 із кутом вигину  $90^\circ$  (рисунок 2.5). Для дослідження газодинамічних процесів у відводі задавались граничні умови, наведені на рисунку 2.12, а.

Результати розрахунків були візуалізовані в постпроцесорах програмних комплексів ANSYS Fluent, ANSYS CFX, що дало змогу побачити структуру потоку в відводі та зібрати вичерпні дані про нього. Було побудовано лінії течії і поля швидкостей в поперечних перерізах відводу (рисунок 2.12, б), поля модуля швидкості (рисунок 2.12, в, г) і тиску (рисунок 2.12, д, е) на контурах, поля тиску (рисунок 2.12, є) і модуля швидкості (рисунок 2.12, ж) у площинах горизонтального повздожнього та поперечних перерізів відводу.

Як видно на рисунку 2.12, під час руху газового потоку відводом із кутом вигину  $90^\circ$  утворюється складна картина руху. За результатами розрахунку в програмному комплексі ANSYS Fluent було визначено, що на вході у відвід



1 – відвід 90° 1420×24; 2 – труба 1420×18,7; а) – розрахункова схема; б) – лінії течії та поля швидкостей у поперечних перерізах; в, г) – поля модуля швидкості в внутрішній порожнині; д, е) – поля тиску на контурах; є) – поля тиску в площинах горизонтального повздожнього та поперечних перерізів; ж) – поля модуля швидкості в площинах горизонтального повздожнього та поперечних перерізів

**Рисунок 2.12** – Результати моделювань динаміки руху газу відводом

швидкість потоку газу вздовж осі складає  $v_{\text{ос}} = 13,1$  м/с. Від осі потоку в напрямі стінки відбувається незначне зниження швидкості потоку, а біля стінки швидкість потоку газу різко знижується.

У відводі відбувається перебудова профілю швидкостей як в повздовжньому, так і в поперечних перерізах (рисунок 2.12, б, ж). Уздовж ввігнутого боку потік пришвидшується до 21 м/с (рисунок 2.12, б, в, ж), а вздовж опуклого – уповільнюється до 8 м/с (рисунок 2.12, г). Протилежна картина спостерігається на виході з відводу – вздовж ввігнутого боку потік уповільнюється до 6 м/с (рисунок 2.12, в, ж), а вздовж опуклого пришвидшується до 14 м/с (рисунок 2.12, ж). Таким чином, поблизу опуклого боку відводу виникає дифузорний ефект, а поблизу ввігнутого – конфузорний. У місці виходу потоку із відводу на внутрішній стінці виникає дифузорний ефект, а на зовнішній – конфузорний. Перехід до рівномірного профілю швидкості за відводом захоплює прямолінійну ділянку трубопроводу значної довжини до 5 м. За лініями течії було помічено, що на виході відводу потік із бічних (верхніх і нижніх) ділянок відводу перетікає в сторону дифузорної ділянки біля внутрішньої стінки (рисунок 2.12, б).

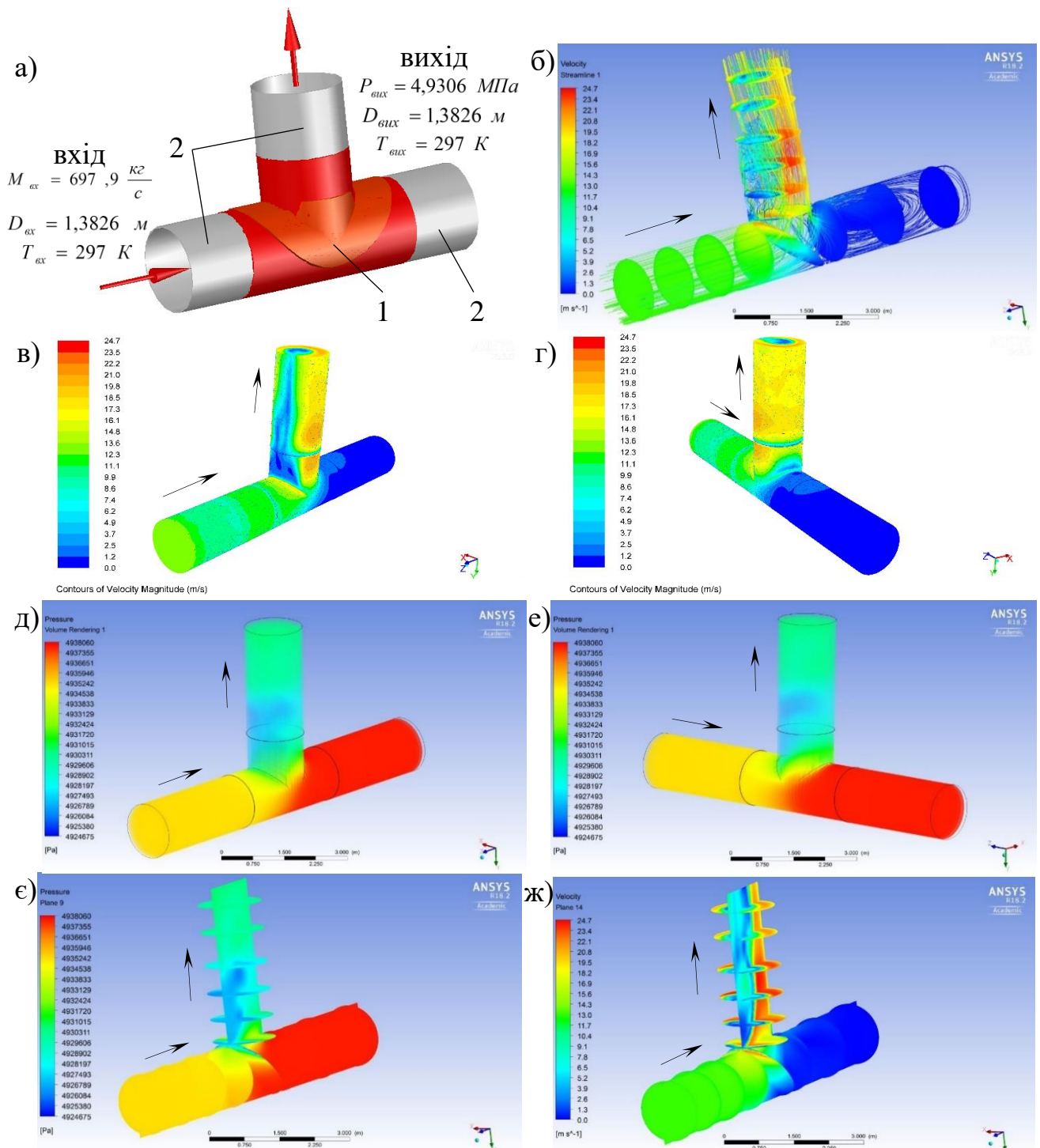
Як видно з полів тиску (рисунок 2.12, д, е, є), тиск у відводі розподілений нерівномірно. Структура потоку в відводі визначається збільшенням тиску в напрямі від ввігнутого до опуклого боку відводу. Відбувається зниження тиску біля ввігнутого боку відводу до 4923768 Па і підвищення тиску біля опуклого боку до 4931953 Па (рисунок 2.12, д, е, є). Такий нерівномірний розподіл тиску впливає на напружений стан відводу. Тиск на виході з відводу задавався  $P_{\text{вих}} = 4930000$  Па, а за результатами розрахунку було встановлено, що на вході він складає  $P_{\text{вх}} = 4930317$  Па. Отже, перепад тиску на відводі 1420×24 мм обв'язки компресорної станції складає  $\Delta P = 317$  Па. Тоді за цим перепадом тиску та швидкістю газу на вході у відвід було розраховано коефіцієнт місцевого опору відводу, який склав  $\xi = 0,09$ . [50]

Розглянемо зварний рівнопрохідний трійник 1 із підсилюючими накладками (рисунок 2.5), в якому газ із магістралі трійника повністю перетікає у відгалуження

трійника. Для дослідження газодинамічних процесів у цьому рівнопрохідному трійнику задавались граничні умови, наведені на рисунку 2.13, а.

Було побудовано лінії течії і поля швидкостей у поперечних перерізах (рисунок 2.13, б), поля модуля швидкості на контурах (рисунок 2.13, в, г), заливка тиску в внутрішній порожнині (рисунок 2.13, д, е), поля тиску (рисунок 2.13, є) і модуля швидкості (рисунок 2.13, ж) у площинах горизонтального повздожнього та поперечних перерізів рівнопрохідного трійника.

За результатами розрахунку в програмному комплексі ANSYS Fluent було визначено, що на вході у магістраль трійника швидкість потоку газу вздовж осі складає  $v_{\text{вх}} = 13,1$  м/с. Від осі потоку в напрямі стінки відбувається незначне зниження швидкості потоку, а біля стінки швидкість потоку газу різко знижується. Під час проходження рівнопрохідним трійником газовий потік змінює свій напрям і перетікає з основної магістралі в відгалуження трійника, в результаті чого утворюється складна картина руху. Відбувається перебудова профілю швидкостей як в повздожньому, так і в поперечних перерізах (рисунок 2.13, б, в, г, ж). При цьому незначна частина газового потоку продовжує рухатись далі, за інерцією, магістраллю трійника і привареною до неї трубою біля стінки зі сторони відгалуження, закручується і повертається назад в основний потік, рухаючись біля стінки навпроти відгалуження (рисунок 2.13, б). Потік газу, який перетікає у відгалуження рівнопрохідного трійника, і у відгалуженні, і в привареній до нього трубі рухається, в основному, вздовж правої стінки (рисунок 2.13, б, в, г, ж). Найбільша швидкість газового потоку спостерігається вздовж правої стінки, привареної до відгалуження трійника труби на віддалі 0,6 м від відгалуження і складає 24 м/с. У пристінному шарі в цьому місці швидкість потоку складає 18 м/с. Біля протилежної стінки відбувається значне завихрення газового потоку з утворенням рециркуляції, що зумовлюється відриванням потоку від стінки в місці приварювання відгалуження до магістралі трійника. Швидкість газу в місці завихрення складає 2–7 м/с. Перехід до рівномірного профілю швидкості захоплює прямолінійну ділянку трубопроводу значної довжини до 8 м. Таким чином, у відгалуженні трійника з правого боку виникає конфузорний ефект, а з лівого –



1 – трійник зварний 1420×28 – 1420×28; 2 – труба 1420×18,7; а) – розрахункова схема; б) – лінії течії та поля швидкостей у перерізах; в, г) – поля модуля швидкості на контурах; д), е) – заливка тиску в внутрішній порожнині; є) – поля тиску в повздовжньому та поперечних перерізах; ж) – поля модуля швидкості в повздовжньому та поперечних перерізах

**Рисунок 2.13** – Результати розрахунків динаміки руху газу рівнопрохідним трійником, в якому газ із магістралі спрямовується у відгалуження трійника

дифузійний.

Як видно з заливок тиску в внутрішній порожнині рівнопрохідного трійника (рисунок 2.13, д, е) та полів тиску ((рисунок 2.13, ж), при русі газового потоку тільки відгалуженням трійника тиск у трійнику розподілений не рівномірно. На вході у магістраль трійника тиск складає біля 4935224 Па. У магістралі трійника навпроти відгалуження тиск поступово збільшується до 4937760 Па і далі, за відгалуженням, є практично сталим (поступово збільшується на декілька Паскаль). На початку відгалуження трійника відбувається суттєве падіння тиску. Причому в місці рециркуляції відбувається найсуттєвіше падіння тиску до 4926180 Па. Після падіння тиску в відгалуженні трійника відбувається незначне його підвищення в привареній до відгалуження трійника трубі, що зумовлено стабілізацією потоку.

Тиск на виході з відгалуження трійника задавався  $P_{\text{вих}}=4930600$  Па, а за результатами розрахунку було встановлено, що на вході в магістраль трійника він складає  $P_{\text{вх}}=4935244$  Па. Отже, перепад тиску на рівнопрохідному трійнику об'язки компресорної станції, де газ рухається магістраллю трійника і з магістралі весь потік направляється у відгалуження трійника, складає  $\Delta P=4644$  Па. Тоді за цим перепадом тиску та швидкістю газу на вході в магістраль трійника було розраховано коефіцієнт місцевого опору такого трійника, який склав  $\xi = 1,55$ . [53]

Розглянемо зварний трійник 3 із підсилюючими накладками (рисунок 2.5), у якому потік рухається відгалуженням трійника і з відгалуження розгалужується у дві сторони магістралі трійника (в сторону ГПА № 1 і ГПА № 2). Для дослідження газодинамічних процесів у цьому рівнопрохідному трійнику задавались граничні умови, наведені на рисунку 2.14, а.

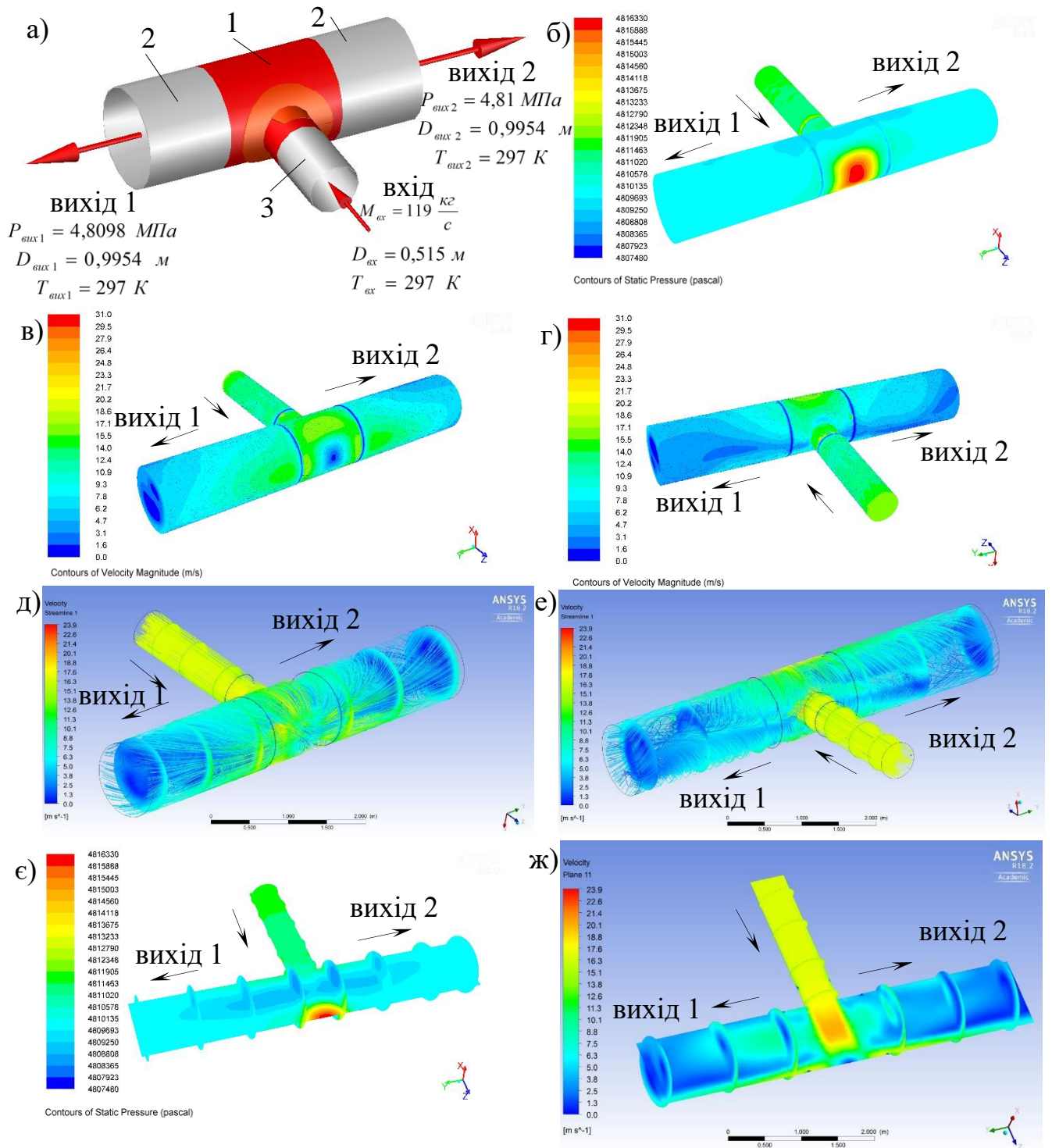
Для визначення тиску на виходах магістралі трійника (рисунок 2.14, а) попередньо розраховували, яка частина потоку (масова витрата) з трійника 3 спрямовується в сторону ГПА № 1, а яка в сторону ГПА № 2 (рисунок 2.5). Знаючи масову витрату на виходах магістралі трійника (рисунок 2.14, а), у програмному комплексі ANSYS Fluent розраховувався трійник для різних тисків на виході 1 і виході 2 магістралі трійника доти, поки не було визначено, при яких тисках на виході магістралі трійника масові витрати будуть рівними попередньо

розрахованим. Такі тиски були рівними  $P_{\text{вих1}}=4809800$  Па,  $P_{\text{вих2}}=4810000$  Па. Відповідні їм масові витрати складали  $M_{\text{вих1}} = 70,4 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$ ,  $M_{\text{вих2}} = 48,6 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$ .

Візуалізовані результати розрахунків дали змогу побачити структуру та зібрати вичерпні дані про потік газу в трійнику 3 обв'язки компресорної станції (рисунок 2.5), де газ рухається відгалуженням трійника і з відгалуження спрямовується в дві сторони магістралі трійника. Було побудовано поля тиску (рисунок 2.14, б) і модуля швидкості (рисунок 2.14, в, г) на контурах, лінії течії та поля швидкостей у поперечних перерізах трійника (рисунок 2.14, д, е), поля тиску (рисунок 2.14, є) і модуля швидкості (рисунок 2.14, ж) у площинах горизонтального повздожнього та поперечних перерізів трійника обв'язки компресорної станції.

За результатами розрахунку в програмному комплексі ANSYS Fluent було визначено, що на вході у відгалуження трійника швидкість потоку газу вздовж осі складає  $v_{\text{вх}}=16,6$  м/с. Від осі потоку в напрямі стінки відбувається незначне зниження швидкості потоку, а біля стінки швидкість потоку газу різко знижується. Із відгалуження трійника газовий потік перетікає у магістраль трійника, причому після входу з відгалуження у магістралі трійника газовий потік починає прискорюватись. Таке прискорення газового потоку продовжується до повздожньої осі магістралі трійника, де швидкість потоку досягає 20,2 м/с (рисунок 2.14, г, ж). Отже, від входу в відгалуження трійника до осі магістралі трійника має місце конфузорний ефект. Починаючи з осі магістралі трійника газовий потік, який перетік із відгалуження трійника, починає сповільнюватись (відбувається дифузорний ефект) і на віддалі 0,2–0,3 м від стінки магістралі трійника навпроти відгалуження газовий потік в магістралі трійника розходить в різні сторони на кут  $360^\circ$ , у результаті чого його швидкість знижується до 10 м/с (рисунок 2.14, д, ж). За місцем розгалуження газового потоку біля стінки магістралі трійника навпроти відгалуження швидкість потоку знижується до 1 м/с (виникає своєрідний “застійне склепіння”) (рисунок 2.14, ж). Газовий потік, який розійшовся в різні сторони в магістралі трійника поверхнею “застійного склепіння”, направляється до стінок магістралі трійника, де прискорюється до 16,5 м/с (рисунок





1 – трійник зварний 1020×18 – 529×10; 2 – труба 1020×12,3; 3 – труба 529×7;

а) – розрахункова схема; б) – поля тиску на контурах; в, г) – поля модуля швидкості на контурах; д, е) – лінії течії та поля швидкостей; е) – поля тиску в повздожньому та поперечних перерізах; ж) – поля модуля швидкості в площинах повздожньому та поперечних перерізах

**Рисунок 2.14** – Результати розрахунків динаміки руху газу трійником, в якому потік із відгалуження розгалужується в дві сторони магістралі трійника

2.14, д, ж). За лініями течії було помічено, що газовий потік від основи “застійного склепіння” рухається в усіх напрямках уздовж стінок магістралі трійника (на кут  $360^\circ$ ) (рисунок 2.14, д, е).

Таким чином, фактично весь газовий потік у магістралі трійника вздовж стінки по обидві сторони від відгалуження трійника (площиною симетрії є площина повздовжнього перерізу трійника) рухається в бік відгалуження під різними кутами (за винятком незначної частинки потоку, яка рухається в різні сторони від відгалуження трійника вздовж твірної магістралі трійника, розміщеної навпроти відгалуження) (рисунок 2.14, д, е). Наблизившись до твірної магістралі трійника, розміщеної з сторони відгалуження, газовий потік, який рухався в сторону відгалуження з однієї сторони відгалуження (площиною симетрії є площина повздовжнього перерізу магістралі та відгалуження трійника), зустрічається з газовим потоком, який рухався з другої сторони відгалуження. В результаті цього відбувається закручування газового потоку, і він розділяється на два закручені потоки (рисунок 2.14, е), які рухаються в сторону ГПА № 1. Аналогічне розділення та закручування потоку газу відбувається і в напрямі ГПА № 2 (рисунок 2.14, е). Фактично в одному поперечному перерізі магістралі трійника чи труби, привареної до нього, є два закручені потоки, які займають по половині площі поперечного перерізу. Швидкість закрученого потоку газу значно знижується до 1–5 м/с.

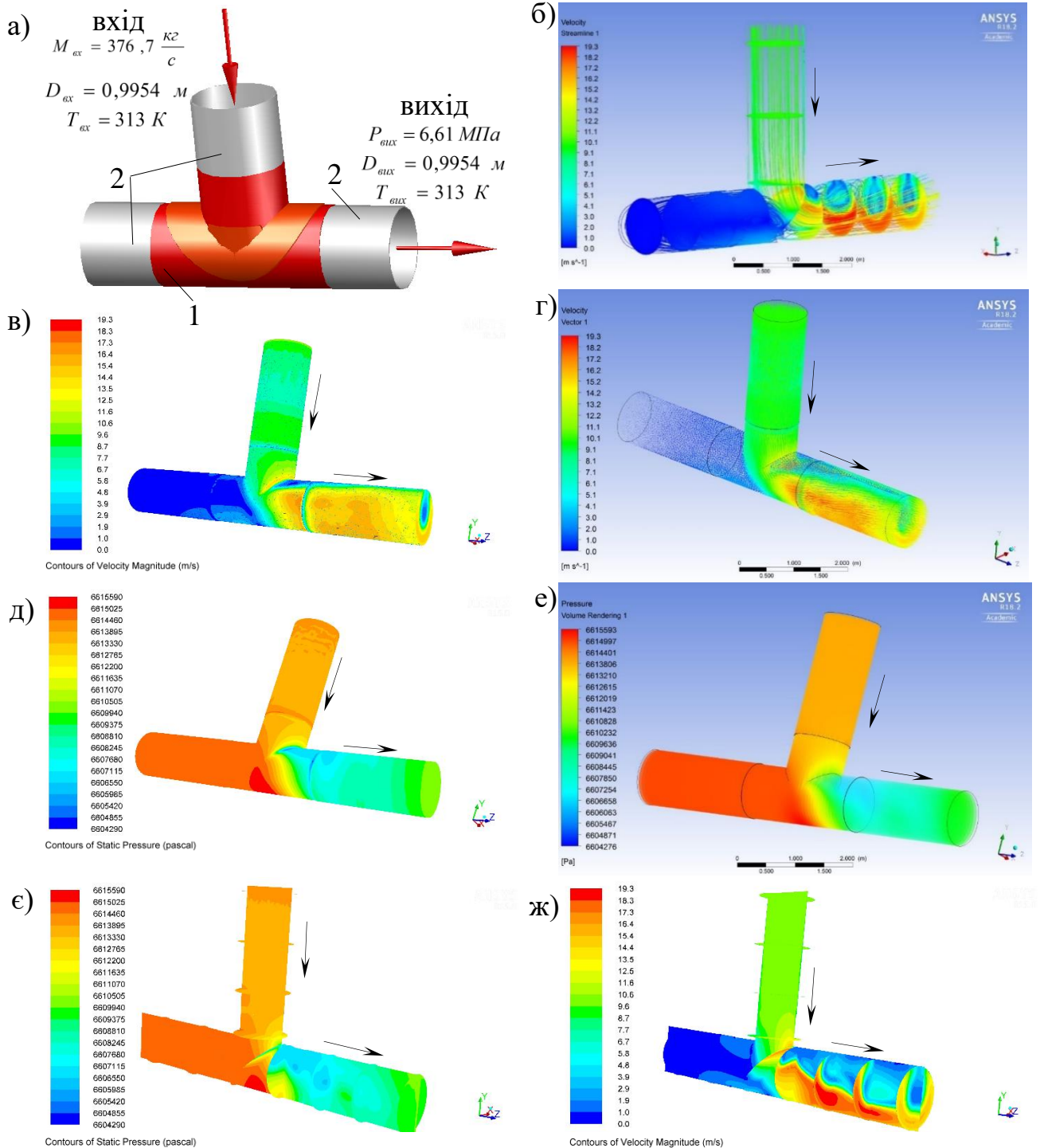
Як видно з полів тиску (рисунок 2.14, б, є), якщо газ рухається відгалуженням трійника і з відгалуження спрямовується у дві сторони магістралі трійника, то тиск у трійнику розподілений нерівномірно. На вході у відгалуження трійника тиск складає 4811530 Па (рисунок 2.14, є). Уздовж відгалуження він зменшується до 4810810 Па в місці приварювання відгалуження до магістралі трійника. В магістралі трійника відбувається падіння тиску, особливо вздовж осі, яка проходить центром закручених потоків газу, до 4808390 Па (рисунок 2.14, є). Із полів тиску було помічено, що в “застійному склепінні”, розміщеному в магістралі трійника біля стінки навпроти відгалуження, відбувається суттєве збільшення тиску до 4816330 Па (рисунок 2.14, б, є).

Розглянемо зварний трійник 4 із підсилюючими накладками, в якому потік

рухається відгалуження трійника і з відгалуження повністю перетікає в одну сторону магістралі трійника (рисунок 2.5). Для дослідження газодинамічних процесів у цьому рівнопрохідному трійнику задавались граничні умови, наведені на рисунку 2.15, а.

Було побудовано лінії течії та поля швидкостей в поперечних перерізах (рисунок 2.15, б), поля модуля швидкості на контурах (рисунок 2.15, в), вектори швидкості (рисунок 2.15, г), поля тиску на контурах (рисунок 2.15, д), заливка тиску в внутрішній порожнині (рисунок 2.15, е), поля тиску (рисунок 2.15, є) і модуля швидкості (рисунок 2.15, ж) у площинах горизонтального повздовжнього та поперечних перерізів рівнопрохідного трійника.

За результатами розрахунку в програмному комплексі ANSYS Fluent було визначено, що на вході в відгалуження трійника швидкість потоку газу вздовж осі складає  $v_{вх} = 10$  м/с. Від осі потоку в напрямі стінки відбувається незначне зниження швидкості потоку, а біля стінки швидкість потоку газу різко знижується. Під час проходження трійником газовий потік змінює свій напрям і перетікає з відгалуження в праву сторону магістралі трійника, в результаті чого утворюється складна картина руху. Відбувається перебудова профілю швидкостей як в повздовжньому, так і в поперечних перерізах (рисунок 2.15, б, в, г, ж). При цьому незначна частина газового потоку в нижній частині магістралі трійника навпроти відгалуження перетікає в ліву сторону магістралі трійника, де закручується і повертається в основний потік верхньою частиною магістралі трійника (рисунок 2.15, б). Потік газу, який перетікає у праву сторону магістралі трійника, у магістралі і у привареній до неї трубі рухається, в основному, вздовж стінки навпроти відгалуження (рисунок 2.15, б, в, г, ж). При цьому найбільша швидкість газового потоку, яка складає 18,5 м/с, спостерігається вздовж нижньої стінки магістралі трійника в місці виходу з магістралі потоку та вздовж нижньої стінки, привареної до магістралі труби на віддаль 1,8 м (рисунок 2.15, ж). У пристінному шарі в цьому місці швидкість потоку складає 16,8 м/с. Біля протилежної стінки відбувається значне завихрення газового потоку з рециркуляцією, що зумовлене відриванням потоку від стінки в місці приварювання відгалуження до магістралі трійника



1 – трийник зварний 1020×20 – 1020×20; 2 – труба 1020×12,3; а) – розрахункова схема; б) – лінії течії та поля швидкостей; в) – поля модуля швидкості на контурах; г) – вектори швидкості; д) – поля тиску на контурах; е) – заливка тиску; є) – поля тиску в повздовжніх і поперечних перерізах; ж) – поля модуля швидкості в повздовжніх і поперечних перерізах

**Рисунок 2.15** – Результати розрахунків динаміки руху потоку рівнопрохідним трийником, у якому потік із відгалуження перетікає в одну сторону магістралі

(рисунок 2.15, б). Швидкість газу в місці завихрення складає 0,5–6 м/с (рисунок 2.15, ж). Перехід до рівномірного профілю швидкості захоплює прямолінійну ділянку трубопроводу значної довжини – до 10 м. Таким чином, у магістралі трійника з правого боку від відгалуження у верхній частині виникає дифузорний ефект, а в нижній – конфузорний.

Як видно з полів тиску (рисунок 2.15, д, е) та заливки тиску в внутрішній порожнині (рисунок 2.15, д, е), тиск у трійнику розподілений нерівномірно. На вході в відгалуження трійника тиск складає 6613906 Па. Вздовж відгалуження трійника відбувається незначне падіння тиску – до 6613660 Па. В лівій стороні магістралі трійника, куди перетікає незначна частина газового потоку, яка закручується і повертається назад в основний потік, тиск є практично сталим і складає 6614900 Па (поступово збільшується на декілька Паскаль). Із полів та заливки тиску було помічено, що в місці, де відбувається розходження газового потоку (незначна частина газового потоку перетікає в ліву сторону магістралі трійника, а основний потік – в праву сторону), утворюється “застійне склепіння” (так, як в трійнику, наведеному на рисунку 2.14), де відбувається суттєве збільшення тиску – до 6615560 Па (рисунок 2.15, д, е, е). Із полів модуля швидкості видно, що в “застійному склепінні” відбувається зниження швидкості газового потоку – до 0,5 м/с (рисунок 2.15, в, ж).

У правій стороні магістралі трійника і привареній до нього трубі відбувається суттєве падіння тиску. Причому в місці дифузорного ефекту тиск зменшується більше – до 6606080 Па, а в місці конфузорного ефекту менше – до 6608460 Па. Після падіння тиску в відгалуженні трійника відбувається незначне його підвищення в привареній до відгалуження трійника трубі, що зумовлено стабілізацією потоку.

Тиск на виході з магістралі трійника задавався  $P_{\text{вих}}=6610000$  Па, а за результатами розрахунку було встановлено, що на вході в відгалуження трійника він складає  $P_{\text{вх}}=6613906$  Па. Отже, перепад тиску на рівнопрохідному трійнику на виході ГПА № 1 компресорної станції, де газ рухається відгалуженням трійника і з відгалуження увесь потік спрямовується в одну сторону магістралі трійника,

складає  $\Delta P=3906$  Па. Тоді за цим перепадом тиску та швидкістю газу на вході в магістраль трійника було розраховано коефіцієнт місцевого опору трійника, який склав  $\xi = 1,95$ . [51]

### **2.3 Дослідження впливу геометричних параметрів трійників трубопроводів на газогідродинамічні процеси в їхній внутрішній порожнині, втрати гідравлічної енергії потоку**

Результати викладених у підрозділі 2.2 досліджень показали, що на газодинамічні процеси у фасонних елементах трубопроводів (а отже, величину втрат у них гідравлічної енергії) значний вплив чинить їх геометрія. В трійниках на ці процеси також суттєво впливає напрямок руху потоку трійником. Щоб встановити ці впливи, потрібні глибокі знання взаємозв'язку між геометрією потоку в трійнику, полем тиску та кінематикою потоку. Ця інформація допоможе зрозуміти механізми втрати тиску.

Існує багато складних трубопровідних систем, які містять велику кількість трійників, відводів, перехідників, і втрати енергії в фасонних елементах таких систем є досить суттєвими та визначальними в загальному гідравлічному опорі системи.

Масштаби втрат енергії в трійниках, відводах ще недостатньо вивчені та задокументовані, оскільки залежать від багатьох чинників. Крім того, газові потоки в трійниках є дуже складними і тривимірними і не доступні для будь-якого спрощеного теоретичного аналізу, а тому їх вивчають експериментально, що неможливо виконати в умовах газопроводів (особливо магістральних) або чисельним моделюванням.

Сьогоднішні вимоги енергоефективності вимагають звернути увагу на багато аспектів і питань щодо проектування та реконструкції різноманітних трубопровідних систем. Тому дослідження втрати енергії газових потоків у фасонних елементах трубопроводів, вдосконалення їх конструкції з метою зменшення гідравлічного опору є важливою задачею.

Щоб дослідити вплив геометрії трійників на втрати в них гідравлічної енергії, було вибрано чотири рівнопрохідні трійники зовнішнім діаметром 219 мм, 530 мм, 1020 мм та 1420 мм. Для кожного з чотирьох різних діаметрів трійників досліджувались зварні та штамповані трійники, радіус відборткування яких змінювався від  $0,1 \cdot D_{зв.т}$  до максимально можливого. Приклади геометричних моделей таких зварних і штампованих трійників наведено на рисунку 2.9.

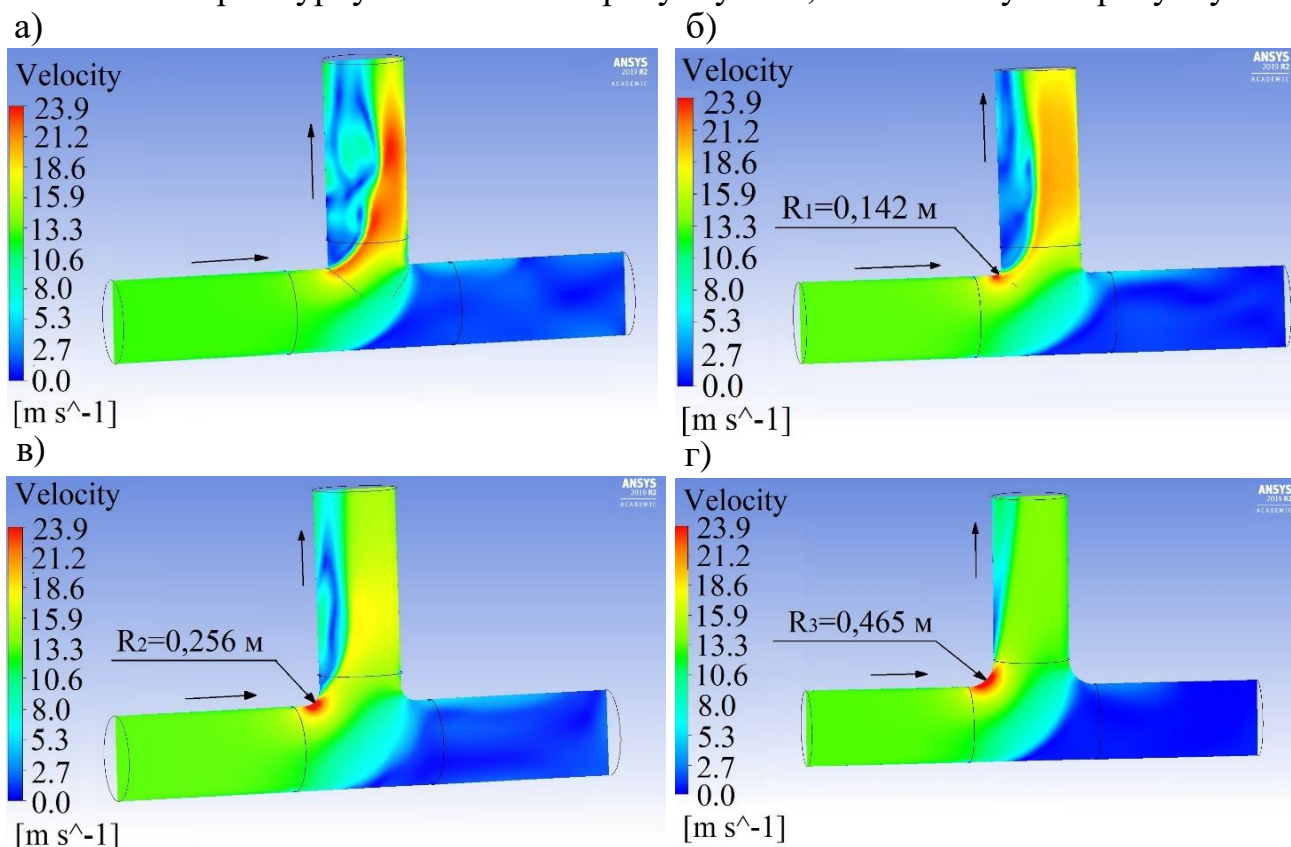
Для зовнішнього діаметра трійника 219 мм масова витрата задавалась 17 кг/с, для 530 мм – 102 кг/с, для 1020 мм – 373 кг/с та для 1420 мм – 698 кг/с. Оскільки тиск вздовж трубопроводу зменшується, а трійник може бути встановлений у будь-якому місці вздовж траси, то тиск на виході відгалуження трійників змінювався від 3 МПа до 7 МПа з кроком 1 МПа. Для кожного значення тиску виконувалось окреме моделювання.

Також на вході в магістраль трійників задавалась температура природного газу, яка приймалась рівною 297 К. На вході в магістраль трійників і на виході відгалуження задавалась інтенсивність турбулентності 5 % (для такого значення потік рахується повністю турбулентний) і гідравлічний діаметр. Гідравлічний діаметр приймався рівним внутрішньому діаметру трубопроводу.

Найбільші втрати тиску з усіх розглянутих у підрозділі 2.2 трійників були у трійнику, в якому газовий потік із магістралі повністю перетікає у відгалуження трійника. Такі трійники доволі часто зустрічаються в трубопровідних системах. Вони містяться у об'язках компресорних і насосних станцій магістральних газопроводів і нафтопроводів, підземних сховищ газу, нафтобаз, газорозподільних станцій тощо. Крім того, вони наявні в місці технологічних переминок між трубопроводами, де весь потік з однієї нитки трубопроводу перетікає в іншу, в місцях багатониткових підводних трубопроводів, де весь потік транспортується резервними нитками, тощо. Для такої схеми руху потоку трійниками на сьогодні мало інформації про втрати в них енергії.

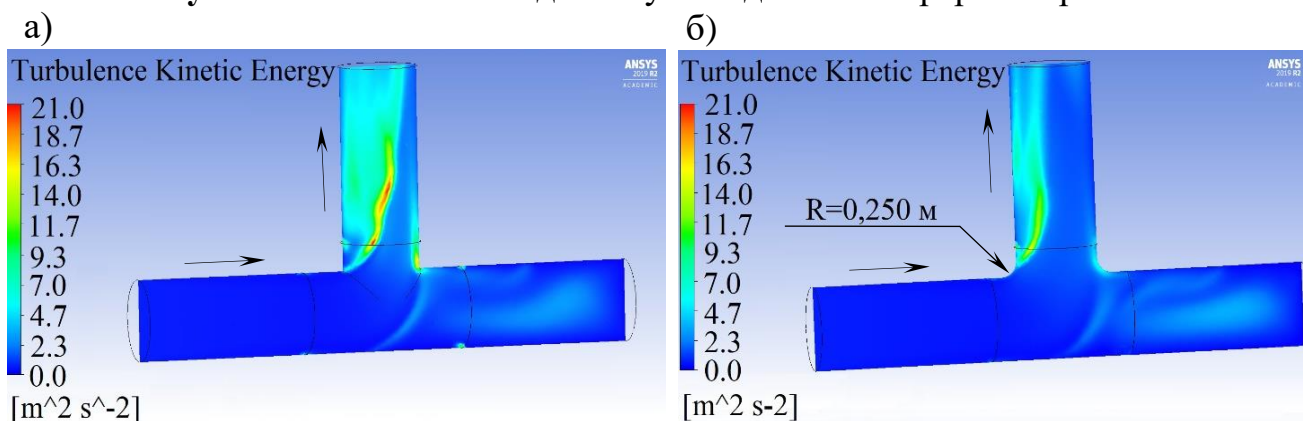
Розглянемо зварний та штамповані рівнопрохідні трійники, зовнішній діаметр яких складає 1420 мм, тиск на виході трійників – 5 МПа, радіус відборткування штампованих трійників становив 0,142 м, 0,250 м і 0,465 м. Поля

швидкостей у повздовжніх перерізах цих трійників наведено на рисунку 2.16, поля кінетичної енергії турбулентності – на рисунку 2.17, а поля тиску – на рисунку 2.18.



а) – зварного; б), в), г) – штампованого

**Рисунок 2.16** – Поля швидкості у повздовжніх перерізах трійників



а) – зварного; б) – штампованого

**Рисунок 2.17** – Поля кінетичної енергії турбулентності в повздовжніх перерізах трійників

Зміна напрямку руху газового потоку у трійнику, зумовлена його перегітанням із магістралі в відгалуження трійника, призводить до складного перерозподілу швидкості потоку. Відбувається формування досить інтенсивного

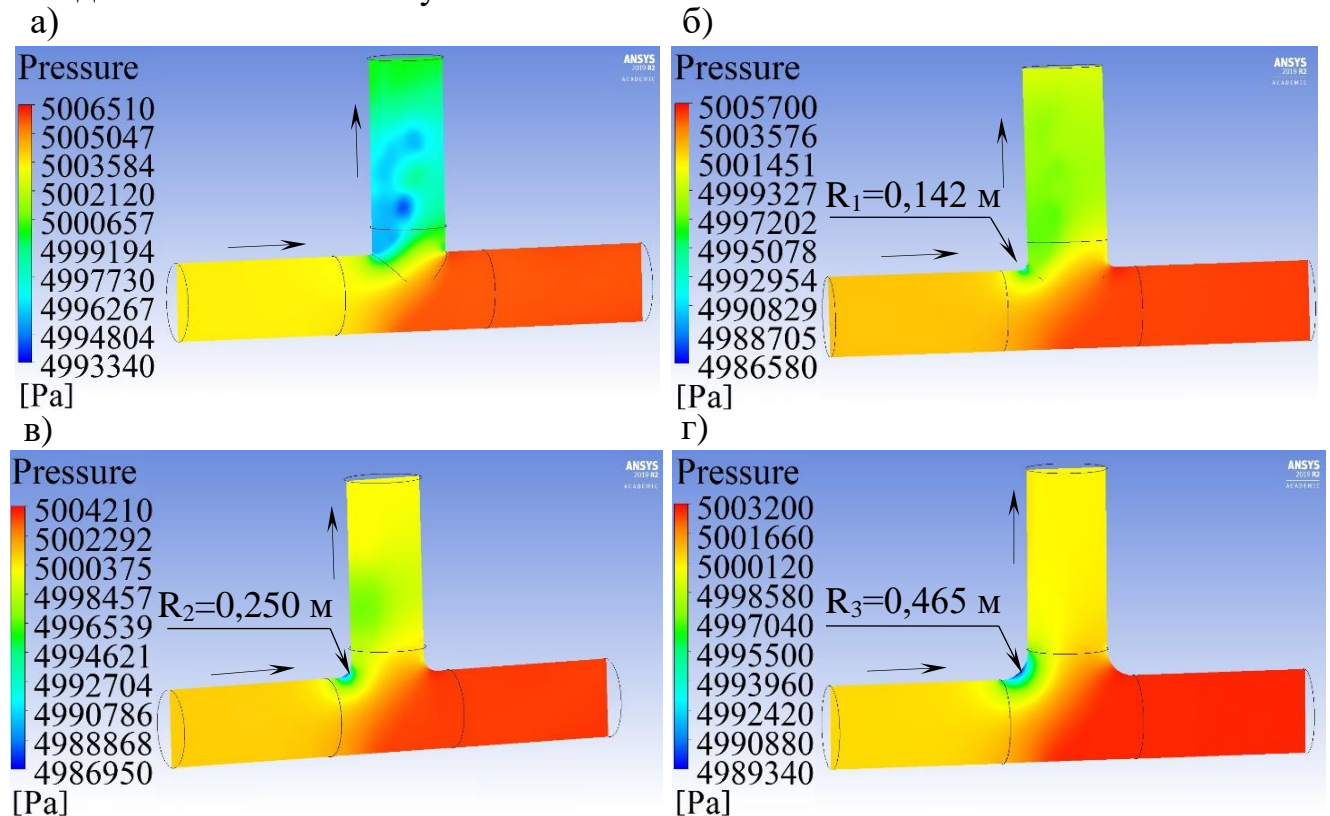


рециркуляційного руху в відгалуженні трійника, зумовленого відриванням потоку від стінки в місці з'єднання магістралі та відгалуження трійника (рисунок 2.16). Така поведінка зумовлена складним характером процесу перерозподілу імпульсу в трійнику. В місці рециркуляції утворюються турбулентні вихори з великою кінетичною енергією (рисунок 2.17). Детальний аналіз полів швидкості потоку (рисунок 2.16) і полів кінетичної енергії турбулентності (рисунок 2.17) показує істотну залежність газодинамічних процесів у відгалуженні трійника від геометрії трійника – тобто, від того, як виконане з'єднання магістралі та відгалуження трійника (під прямим кутом чи заокруглене), від радіуса відбортування. Відбортування трійника, збільшення радіуса відбортування призводить до зменшення швидкості потоку в відгалуженні трійника, послаблення інтенсивності відривання потоку в місці заокруглення, зменшення зони й інтенсивності рециркуляції (рисунок 2.16) і зменшення інтенсивності утворення вихорів і кінетичної енергії турбулентності в зоні рециркуляції (рисунок 2.17).

У результаті зміни напрямку потоку в трійниках, його перетікання в відгалуження відбувається утворення складного поля тиску, падіння тиску (рисунок 2.18). Причинами цього є зміна імпульсу потоку, зумовлена тертям і геометрією трійників. Відбувається втрата енергії потоку, зумовлена нагріванням через тертя та інтенсивною турбулентністю потоку в зоні рециркуляції. [52]

Заокруглення з'єднання магістралі та відгалуження трійника, збільшення радіуса відгалуження є ключовим чинником, який впливає на величину падіння тиску в трійнику і зменшує його гідравлічний опір, а отже, зменшує втрати гідравлічної енергії потоку в трійнику. Оскільки зі збільшенням відгалуження послаблюється інтенсивність відривання потоку в місці заокруглення, зменшується величина зони і інтенсивність рециркуляції, зменшується кінетична енергія турбулентності в зоні рециркуляції, то все це в сукупності призводить до зменшення величини падіння тиску в трійниках. Найбільше падіння тиску в зварному трійнику відбувається в місці інтенсивної рециркуляції, де турбулентність газового потоку найінтенсивніша (рисунок 2.18). Рециркуляція в відгалуженні зварного трійника є основною причиною, яка спричиняє розсіювання

енергії. Зменшення її розмірів й інтенсивності зі збільшенням радіусу відбортування трійника позитивно впливає на втрати енергії в трійнику. Тому в штампованих трійниках у місці інтенсивності рециркуляції падіння тиску вже не є таким значним, а його максимум можна спостерігати в місці відбортування, де швидкість газового потоку є максимальною.



а) – зварного; б), в), г) – штампованого

**Рисунок 2.18** – Поля тиску в повздовжніх перерізах трійників

Падіння тиску в трійнику можна визначити відніманням від тиску на вході в магістраль трійника тиску на виході відгалуження трійника. Найбільше падіння тиску відбувається у зварному трійнику (рисунок 2.18, а) і складає 4100 Па. Причиною цього є те, що з'єднання магістралі та відгалуження трійника виконано під прямим кутом і відбувається значне відривання потоку, а це зумовлює найінтенсивнішу рециркуляцію (рисунок 2.18, а). У штампованих трійниках падіння тиску менше, ніж у зварному, і зменшується зі збільшенням радіуса відбортування трійника. Так, якщо радіус відбортування 0,142 м (рисунок 2.15, б), падіння тиску складає 2212 Па, якщо 0,250 м (рисунок 2.18, в) – 950 Па і якщо

0,465 м (рисунок 2.18, г) – 449 Па. Отже, як бачимо, мінімальне падіння тиску спостерігається, коли радіус відбортуння є максимально можливим і в 10 разів меншим ніж падіння тиску в зварному трійнику.

За визначеними значеннями падіння тиску в трійниках можна знайти втрати в них енергії. Для цього, зазвичай, розраховують безрозмірні коефіцієнти місцевого опору  $\xi$  – також їх ще називають коефіцієнтами втрати енергії (К-факторами). Коефіцієнтом втрати енергії є відношення втраченої в даній ділянці трубопроводу повної енергії до кінетичної енергії в прийнятому перерізі. Загальний коефіцієнт місцевого опору (втрат енергії) рівний

$$\xi = \frac{\Delta P_{заг}}{\frac{\rho V^2}{2}}, \quad (2.14)$$

де  $\Delta P_{заг}$  – втрачений на даній ділянці трубопроводу повний тиск (падіння тиску в трійнику);

$V$  – швидкість газового потоку. [4]

За точним значенням коефіцієнта місцевого опору можна розрахувати втрати напору (енергії) в будь-якому трійнику за формулою

$$h_{м.о} = \xi \frac{V^2}{2g}, \quad (2.15)$$

де  $g$  – прискорення вільного падіння. [4]

Для трійників, у яких потік із магістралі повністю перетікає у відгалуження, на сьогодні мало інформації про втрати енергії, немає чітко встановлених коефіцієнтів місцевих опорів.

За падінням тиску в кожному трійнику розраховано коефіцієнти місцевого опору  $\xi$  для різних зовнішніх діаметрів трійників  $D_{з.м}$ , різних тисків на виході трійника  $P$  та різних радіусів відгалуження трійника  $R_m$ . Для зварних трійників

радіус заокруглення приймався  $R_m=0$ . У результаті цього було отримано 100 значень коефіцієнтів місцевого опору (таблиця 2.1). Підставивши значення коефіцієнтів місцевих опорів в (2.15), розраховано величину втрати напору (енергії)  $h_{m.o}$  у кожному трійнику (таблиця 2.1). Також у таблиці 2.1 занесено визначене CFD моделюванням значення середньої швидкості на виході трійника  $V$ , яке є складовою (2.14) і (2.15).

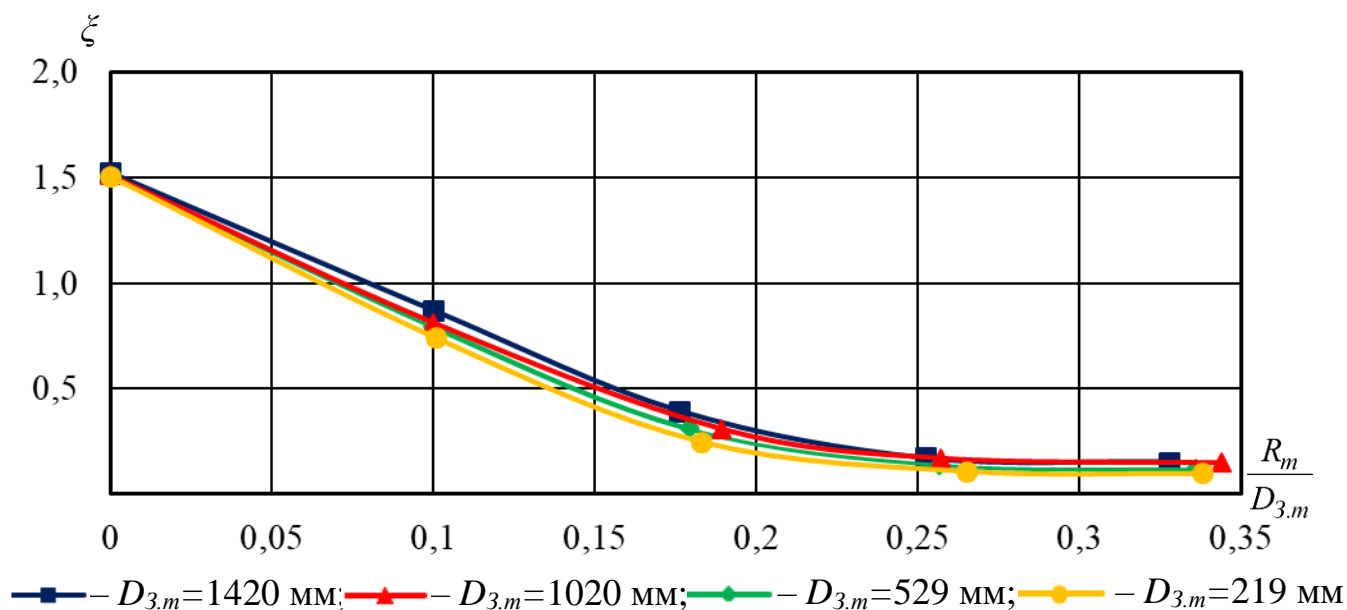
Якщо відомі втрати енергії в трійниках, тоді можна визначити, який відбувається їх вплив на енерговитратність усієї трубопровідної системи. Також можна встановити вплив геометрії трійників на її енерговитратність.

Коефіцієнт місцевого опору трійника значною мірою не залежать від тиску в місці розміщення трійника (таблиця 2.1), тому для кожного діаметра трійника знайдено середнє значення коефіцієнта місцевого опору для різних радіусів заокруглення з'єднання магістралі та відгалуження. За результатами розрахунків, наведеними в таблиці 2.1, для кожного діаметра трійника  $D_{3.m}$  побудовано графічну залежність середнього значення коефіцієнта місцевого опору трійника  $\zeta$  від відношення радіуса відбортування  $R_m$  до зовнішнього діаметра трійника  $D_{3.m}$  (рисунок 2.19). Радіус відбортування має вагомий вплив на коефіцієнт місцевого опору трійника. Зі збільшенням радіуса відбортування коефіцієнт місцевого опору трійника значно зменшується. Причому зі збільшенням відношення радіуса відбортування  $R_m$  до зовнішнього діаметра трійника  $D_{3.m}$  (від 0 до 0,25) спостерігається суттєве зменшення коефіцієнта місцевого опору трійника, а отже, і втрат енергії в ньому (рисунок 2.19). Подальше збільшення радіуса відбортування на коефіцієнт місцевого опору трійника практично не впливає.

Аналізуючи рисунок 2.19, можна побачити, що між коефіцієнтом місцевого опору рівнопрохідного трійника та відношенням радіуса відбортування  $R_m$  до зовнішнього діаметра трійника  $D_{3.m}$  є функціональна залежність. Методом найменших квадратів визначено рівняння для розрахунку коефіцієнтів місцевого опору рівнопрохідних трійників газопроводів, у яких із магістралі газовий потік повністю перетікає у відгалуження

**Таблиця 2.1** – Коефіцієнти місцевого опору  $\xi$  і втрати напору  $h_{м.о}$  у рівнопрохідних трійниках із радіусом відбортування  $R_m$

№	$P$ , МПа	$V$ , м/с	$\xi$	$h_{м.о}$ М	$\xi$	$h_{м.о}$ М	$\xi$	$h_{м.о}$ М	$\xi$	$h_{м.о}$ М	$\xi$	$h_{м.о}$ М
$D_{3,m}=1420$ мм												
			$R_m=0$		$R_m=142$ мм		$R_m=250$ мм		$R_m=358$ мм		$R_m=465$ мм	
1	7	8,8	1,55	6,12	0,91	3,59	0,43	1,70	0,17	0,67	0,15	0,59
2	6	10,5	1,54	8,65	1,00	5,62	0,44	2,47	0,18	1,01	0,15	0,84
3	5	12,8	1,37	11,44	0,74	6,18	0,32	2,67	0,17	1,42	0,15	1,25
4	4	16,4	1,72	23,58	0,92	12,61	0,41	5,62	0,18	2,47	0,16	2,19
5	3	23,3	1,41	39,02	0,77	21,31	0,37	10,24	0,17	4,70	0,15	4,15
Середнє			1,52		0,87		0,39		0,17		0,15	
$D_{3,m}=1020$ мм												
			$R_m=0$		$R_m=102$ мм		$R_m=193$ мм		$R_m=262$ мм		$R_m=351$ мм	
6	7	8,6	1,49	5,62	0,78	2,94	0,29	1,09	0,16	0,60	0,15	0,57
7	6	10,3	1,50	8,11	0,79	4,27	0,29	1,57	0,16	0,87	0,15	0,81
8	5	12,6	1,53	12,38	0,85	6,88	0,34	2,75	0,19	1,54	0,16	1,30
9	4	16,1	1,52	20,08	0,80	10,57	0,32	4,23	0,18	2,38	0,16	2,11
10	3	21,9	1,51	36,91	0,81	19,80	0,30	7,33	0,17	4,16	0,15	3,67
Середнє			1,51		0,81		0,31		0,17		0,15	
$D_{3,m}=529$ мм												
			$R_m=0$		$R_m=53$ мм		$R_m=95$ мм		$R_m=136$ мм		$R_m=178$ мм	
11	7	8,8	1,59	6,28	0,84	3,32	0,34	1,34	0,15	0,59	0,13	0,51
12	6	10,4	1,43	7,88	0,74	4,08	0,28	1,54	0,12	0,66	0,11	0,61
13	5	12,8	1,50	12,53	0,79	6,60	0,30	2,51	0,15	1,25	0,12	1,00
14	4	16,3	1,48	20,04	0,77	10,43	0,29	3,93	0,14	1,90	0,12	1,63
15	3	22,3	1,54	39,03	0,82	20,78	0,32	8,11	0,15	3,80	0,13	3,30
Середнє			1,51		0,79		0,31		0,14		0,12	
$D_{3,m}=219$ мм												
			$R_m=0$		$R_m=22$ мм		$R_m=40$ мм		$R_m=58$ мм		$R_m=74$ мм	
16	7	8,5	1,41	5,19	0,70	2,58	0,25	0,92	0,11	0,41	0,10	0,37
17	6	10,2	1,62	8,59	0,81	4,30	0,27	1,43	0,13	0,69	0,12	0,64
18	5	12,5	1,71	13,62	0,87	6,93	0,28	2,23	0,14	1,12	0,12	0,96
19	4	15,9	1,49	19,20	0,74	9,54	0,26	3,35	0,11	1,42	0,10	1,29
20	3	21,6	1,29	30,68	0,60	14,27	0,22	5,23	0,08	1,90	0,08	1,90
Середнє			1,50		0,74		0,25		0,11		0,10	



**Рисунок 2.19** – Залежність коефіцієнтів місцевого опору рівнопрохідних трійників  $\xi$  від відношення радіуса відборткування  $R_m$  до зовнішнього діаметра трійника  $D_{3,m}$

$$\xi = 1,58e^{-7,7 \frac{R_m}{D_{3,m}}} \quad (2.16)$$

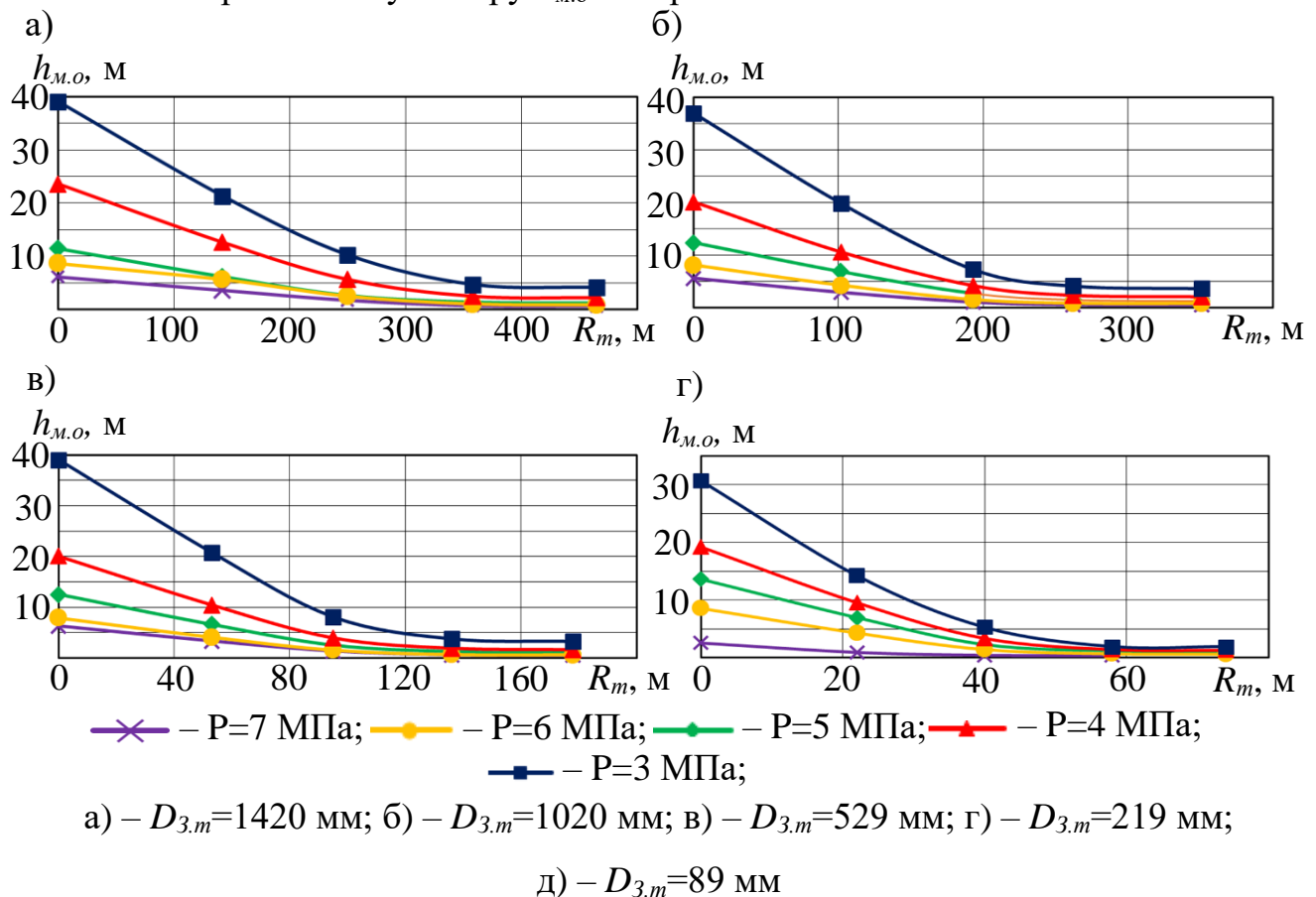
За (2.16) можна визначити коефіцієнт місцевого опору рівнопрохідного трійника будь-якого діаметра.

Також за даними, наведеними в таблиці 2.1, для різних діаметрів трійників побудовано графічні залежності втрат напору (енергії) в трійниках від радіуса відборткування при різних значеннях тиску в місці розміщення трійника (рисунок 2.20).

Втрати енергії в трійниках мають аналогічну до коефіцієнтів їх місцевих опорів залежність від радіуса відборткування (рисунок 2.20). Також втрати енергії в трійниках суттєво залежать і від тиску в місці розміщення трійника. При сталій масовій витраті зі збільшенням тиску втрати енергії зменшуються, що спричинено зменшенням швидкості потоку. Чим менший тиск, тим більше його зміни впливають на втрати енергії в трійниках. [48]

Чим менший діаметр трійника, тим більший вплив збільшення радіуса

відбортування  $R_m$  трійника чинить на втрати в ньому гідравлічної енергії. Так, відбортування рівнопрохідних трійників діаметром 1420 мм, збільшення радіуса відбортування до максимально можливого призводить до зменшення втрат у ньому гідравлічного напору  $h_{м.о}$  у 10 разів. Для трійників діаметром 219 мм збільшення радіуса відбортування від нуля до максимально можливого призводить до зменшення втрат в ньому напору  $h_{м.о}$  в 15 раз.



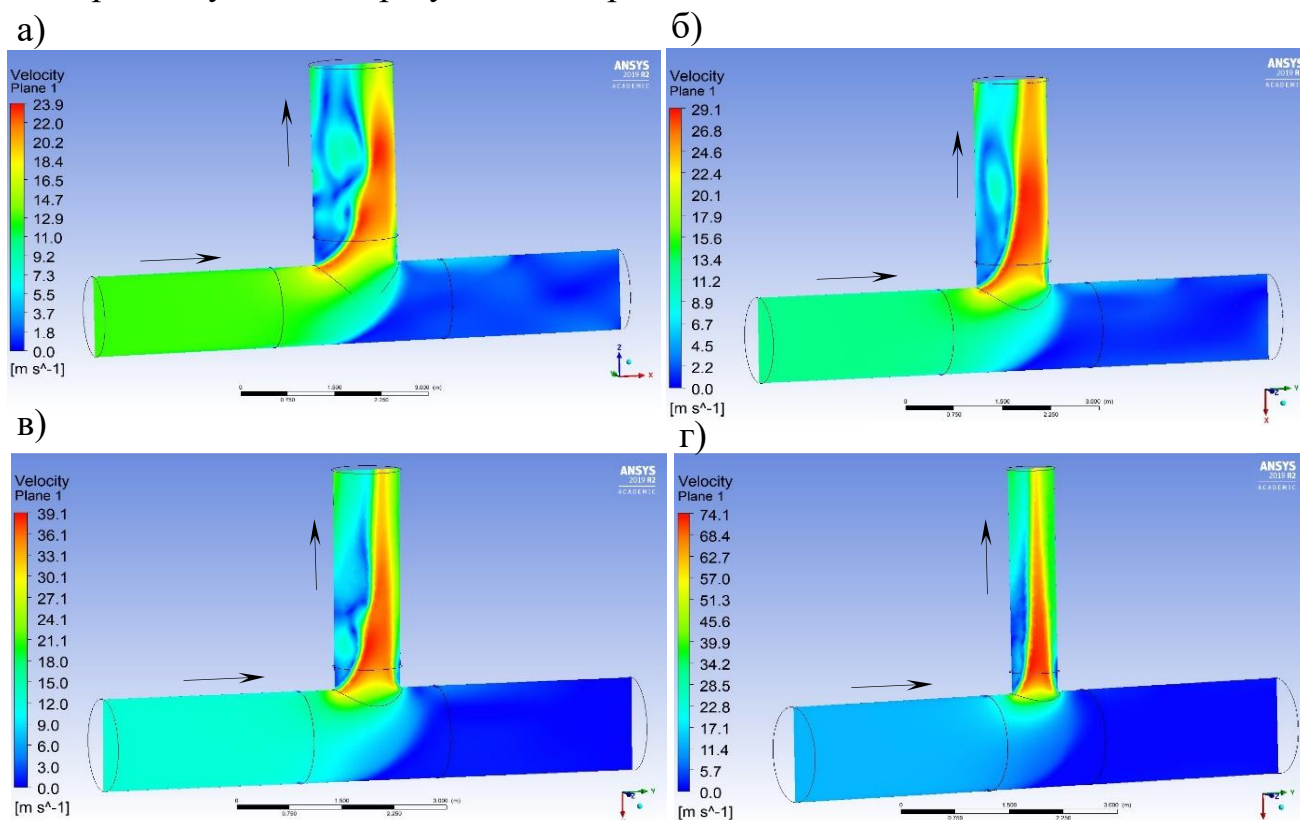
**Рисунок 2.20** – Залежність втрат напору (енергії) у трійниках  $h_{м.о}$  від радіуса відбортування  $R_m$

Щоб дослідити вплив діаметра відгалуження трійників на структуру потоку, гідравлічну енерговитратність трубопровідних систем, для кожного з чотирьох вибраних різних зовнішніх діаметрів магістралі зварних трійників (219 мм, 530 мм, 1020 мм та 1420 мм) вибралось п'ять різних діаметрів відгалуження. Виконувалось 16 тривимірних CFD моделювань.

Досліджувались трійники, в яких потік із магістралі повністю перетікає у відгалуження. Масова витрата на вході в магістраль трійників залежала від

діаметра магістралі трійника. Для зовнішнього діаметра трійника 219 мм масова витрата задавалась 17 кг/с, для 530 мм – 102 кг/с, для 1020 мм – 373 кг/с і для 1420 мм – 698 кг/с. Оскільки, як було визначено в підрозділі 2.3.1, коефіцієнт місцевого опору значною мірою не залежить від тиску, то для усіх моделювань тиск на виході відгалуження трійника задавався рівним 5 МПа.

Результати моделювань були візуалізовані в постпроцесорі програмного комплексу ANSYS Fluent. Для прикладу розглянемо зварні трійники, зовнішній діаметр магістралі яких складає 1420 мм, а зовнішній діаметр відгалуження змінювався і складав 1420 мм, 1220 мм, 1020 мм і 720 мм. Поля швидкостей у повздовжніх перерізах цих трійників наведені на рисунку 2.21, лінії течії – на рисунку 2.22, поля кінетичної енергії турбулентності – на рисунку 2.23, а поля тиску – на рисунку 2.24. Для трійників із іншими діаметрами магістралі та наближено однаковим співвідношенням діаметра відгалуження до діаметра магістралі візуалізовані результати є практично однакові.

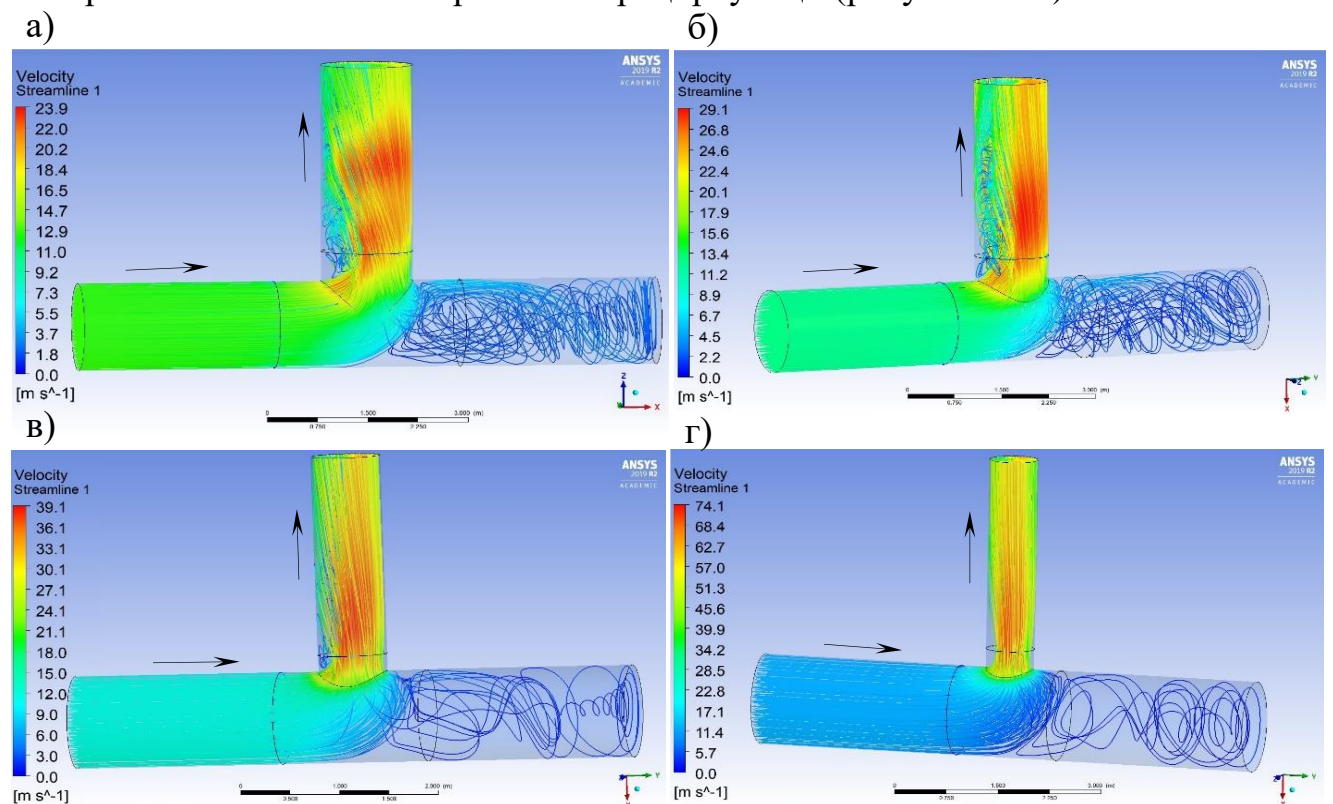


а) – 1420 – 1420 мм; б) – 1420 – 1220 мм; в) – 1420 – 1020 мм; г) – 1420 – 720 мм

**Рисунок 2.22** – Поля швидкості у повздовжніх перерізах зварних трійників

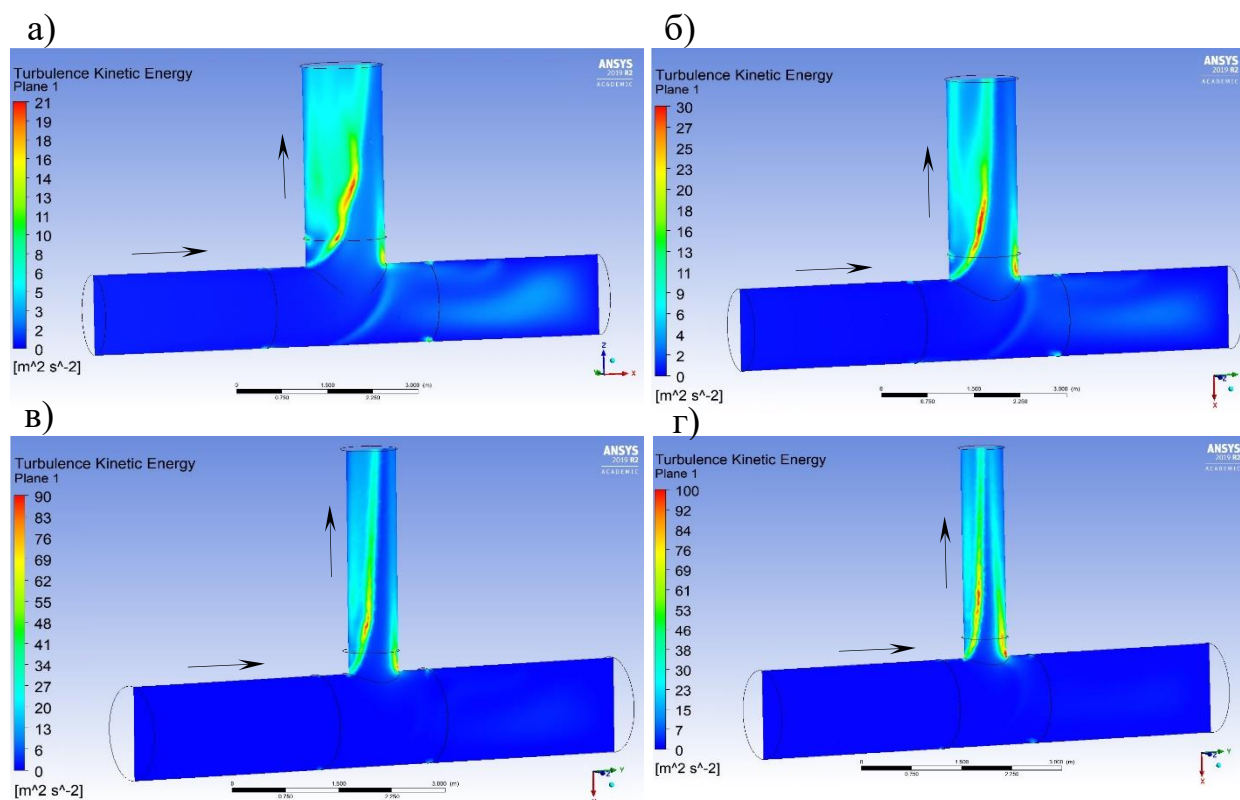


Перетікання всього газового потоку з магістралі в відгалуження трійника спричинює зміну напрямку руху газового потоку в трійнику, що призводить до складного перерозподілу швидкості потоку з формуванням досить інтенсивних рециркуляційних рухів у відгалуженнях трійників із лівого їх боку (рисунок 2.22, рисунок 2.23). Такі рециркуляційні рухи зумовлені відриванням потоку від стінки в місці з'єднання магістралі та відгалуження трійника, в результаті чого відбувається складний процес перерозподілу імпульсу в трійнику. В місці рециркуляції утворюються турбулентні вихори з великою кінетичною енергією (рисунок 2.24). Детальний аналіз полів швидкості потоку (рисунок 2.22), ліній течії (рисунок 2.23) і полів кінетичної енергії турбулентності (рисунок 2.24) показує істотну залежність газодинамічних процесів у відгалуженні трійників від діаметра відгалуження. Зменшення діаметра відгалуження трійника спричиняє збільшення швидкості газового потоку в відгалуженні трійника (рисунок 2.22, рисунок 2.23), збільшення інтенсивності рециркуляції й інтенсивності утворення турбулентних вихорів та їх кінетичної енергії в зоні рециркуляції (рисунок 2.24).



а) – 1420 – 1420 мм; б) – 1420 – 1220 мм; в) – 1420 – 1020 мм; г) – 1420 – 720 мм

**Рисунок 2.23** – Лінії течії у внутрішній порожнині трійників



а) – 1420 – 1420 мм; б) – 1420 – 1220 мм; в) – 1420 – 1020 мм; г) – 1420 – 720 мм

**Рисунок 2.24** – Поля кінетичної енергії турбулентності в повздовжніх перерізах трійників

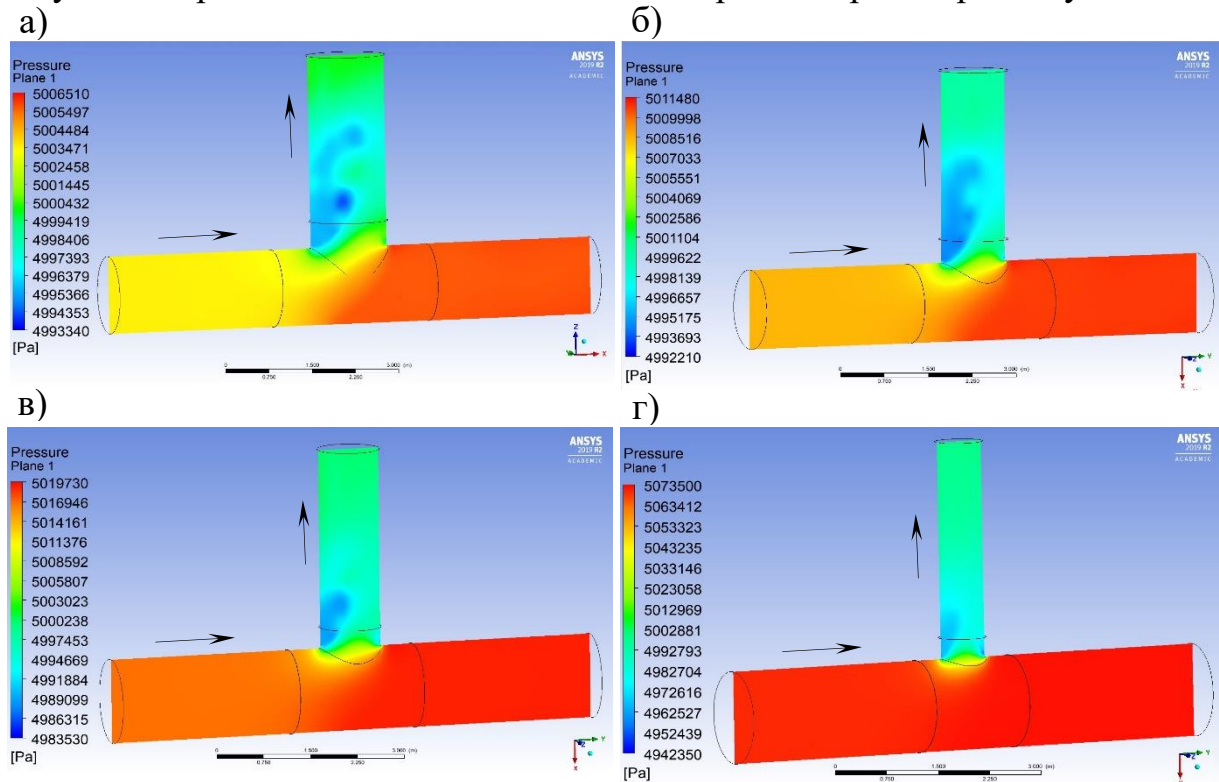
Зі зменшенням зовнішнього діаметра відгалуження трійника спостерігається зміщення поля максимальної швидкості газового потоку в трійнику в сторону вісі відгалуження (рисунок 2.22). Так, для трійника з зовнішнім діаметром відгалуження 1020 мм поле максимальної швидкості вже дещо віддалене від набігаючої стінки відгалуження (рисунок 2.22, в), а для трійника з зовнішнім діаметром відгалуження 720 мм воно знаходиться у середній частині відгалуження (рисунок 2.22, г). Причина зміщення поля максимальної швидкості газового потоку в трійнику в сторону вісі відгалуження при зменшенні зовнішнього діаметра відгалуження трійника (рисунок 2.22) і причина підвищеної кінетичної енергії турбулентних вихорів біля правої стінки відгалуження трійника (рисунок 2.24) були знайдені після детального аналізу ліній течії газового потоку в трійниках (рисунок 2.23). У магістралі трійника, в місці зміни напрямку руху газового потоку, дугоподібні лінії течії, які простягаються вздовж нижньої твірної магістралі

трійника, виходять за межі проекції (уявного продовження) відгалуження трійника в внутрішню порожнину його магістралі, що зумовлено силами інерції (рисунок 2.23). У верхній частині магістралі трійника ці лінії течії різко заокруглюються в сторону відгалуження трійника (основного потоку). В результаті цього відбувається відривання потоку від стінки на початку відгалуження з правого його боку та витіснення основного потоку в ліву сторону в цьому ж місці. В результаті, в правому боці відгалуження трійника на його початку також виникає рециркуляційний рух газового потоку. Причому, чим менший діаметр відгалуження трійника, тим інтенсивніша рециркуляція виникає в цьому місці відгалуження (рисунок 2.23) і тим більша кінетична енергія утворених турбулентних вихорів (рисунок 2.24). Найбільший вплив відривання потоку з правого боку відгалуження має при найменшому модельованому діаметрі відгалуження трійника – 720 мм. Відбувається зміщення максимуму швидкості газового потоку на середину відгалуження (рисунок 2.22, г), на відміну від трійників із відводами більших діаметрів (рисунок 2.22, а, б), де максимум швидкості спостерігається біля набігаючої стінки відгалуження з правого його боку. Зона турбулентних вихорів з правого боку відгалуження в трійнику з діаметром відгалуження 720 мм також є набагато довшою, ніж у трійниках із меншим діаметром відгалуження (рисунок 2.24, г).

У результаті зміни напрямку потоку газу в трійниках, його повного перетікання у відгалуження відбувається утворення складного поля тиску, падіння тиску (рисунок 2.25). Причинами цього є зміна імпульсу потоку, зумовлена тертям і геометрією трійників.

Зменшення діаметра відгалуження трійника є ключовим чинником, який впливає на величину падіння тиску в трійнику і збільшує його гідравлічний опір. Найбільше падіння тиску в зварному трійнику відбувається в місці інтенсивної рециркуляції з лівого боку відгалуження, де спостерігається найінтенсивніша турбулентність газового потоку (рисунок 2.25). Також незначне за величиною поле найбільшого падіння тиску спостерігається і з правого боку відгалуження (на його початку), де спостерігається менша за величиною рециркуляція (найбільше

помітна в трійнику з діаметром відгалуження 720 мм). Фактично рециркуляції у відгалуженні зварного трійника є основною причиною, яка зумовлює розсіювання енергії в трійнику. Збільшення її інтенсивності зі зменшенням діаметра відгалуження трійника негативно впливає на втрати енергії в трійнику.



а) – 1420 – 1420 мм; б) – 1420 – 1220 мм; в) – 1420 – 1020 мм; г) – 1420 – 720 мм

**Рисунок 2.25** – Поля тиску в повздовжніх перерізах трійників

Відніманням від тиску на вході в магістраль трійника тиску на виході відгалуження трійника можна визначити падіння тиску в трійнику. Найбільше падіння тиску відбувається у зварному трійнику з діаметром відгалуження 720 мм і складає 70910 Па (рисунок 2.25, г). Це зумовлюється тим, що для такого діаметра відгалуження трійника спостерігається найінтенсивніша рециркуляція з обидвох боків відгалуження трійника (рисунок 2.22, г). Зі збільшенням діаметра відгалуження трійниках падіння тиску в ньому зменшується. Так, якщо діаметр відгалуження трійника 1020 мм, падіння тиску складає 16850 Па (рисунок 2.25, б), якщо 1220 м – 8580 Па (рисунок 2.25, в) і, якщо 1420 мм – 4560 Па (рисунок 2.25, г).

За падінням тиску в кожному трійнику за (2.14) розраховано коефіцієнти

місцевого опору для трійників із чотирма різними зовнішніми діаметрами магістралі (219 мм, 530 мм, 1020 мм та 1420 мм), кожен із яких мав п'ять різних діаметрів відгалуження. В результаті чого було отримано 20 значень коефіцієнтів місцевого опору. Отримані коефіцієнти місцевих опорів знаходились в межах від 1,5 до 1,6. Результати розрахунків показують, що для зварних трійників, у яких весь потік в магістралі повністю перетікає у відгалуження, коефіцієнти місцевих опорів значною мірою не залежать від діаметра магістралі та діаметра відгалуження. Це зумовлено тим, що при зменшенні діаметра відгалуження трійника (пропорційно збільшенню падіння тиску в трійнику) збільшується швидкість газового потоку на виході відгалуження трійника. Також, за (2.15) для кожного модельованого трійника були розраховані втрати напору, які зі зменшенням діаметра відгалуження трійника різко збільшувались, що зумовлене збільшенням швидкості на виході відгалуження трійника. [49]

## **Висновки до розділу 2**

1. Визначено закономірності впливу геометричної форми, геометричних параметрів фасонних елементів трубопровідних систем, напрямків руху ними потоків на газодинамічні процеси, структуру однофазного потоку в їх внутрішній порожнині. У відводах зміна напрямку руху потоку призводить до виникнення поперечного градієнту тиску та швидкості потоку. В трійниках найбільше локальне підвищення тиску спостерігалось тоді, коли потік рухається відгалуженням трійника і з відгалуження розходить у дві сторони магістралі трійника.

2. Дослідженнями фізичної картини руху газового потоку трійниками, закономірностей зміни коефіцієнтів місцевих опорів і втрат напору в трійниках визначено, що радіус відбортування трійника визначає величину втрати енергії в трійниках. Найбільші втрати енергії спостерігались у трійниках, розміщених у місцях найменших тисків у трубопровідній системі. При цьому найсуттєвішими вони є у штампованих трійниках із малим радіусом відбортування та зварних трійниках. Чим менший діаметр рівнопрохідного трійника, тим більший впливає на енерговитратність трійника збільшення радіуса його відбортування до

максимально можливого. Відборткування рівнопрохідних трійників діаметром 1420 мм, збільшення радіуса їх відборткування до максимально можливого зменшує втрати в них гідравлічного напору в 10 разів, а у трійниках діаметром 219 мм – в 15 разів.

3. Виявлено взаємозв'язок між коефіцієнтом місцевого опору рівнопрохідного трійника та його геометричними параметрами. Отримано рівняння для розрахунку коефіцієнтів місцевих опорів, складовими якого є радіус відборткування трійника, зовнішній діаметр трійника. Щоб мінімізувати втрати енергії потоку в трійниках, рекомендовано під час проектування нових і реконструкції старих газопровідних систем надавати перевагу штампованим трійникам, у яких відношення радіуса відборткування до зовнішнього діаметра відгалуження перевищує 0,25.

4. Газодинамічні процеси у зварних трійниках істотно залежать від діаметра відгалуження трійника. Встановлено, що з зменшенням діаметра відгалуження трійника інтенсивність турбулентних процесів, рециркуляція посилюються не лише з боку відгалуження трійника, де відбувається відривання потоку від стінки, але і з боку набігаючої стінки відгалуження, а максимум швидкості у відгалуженні трійника зі зменшенням його діаметра зміщується від набігаючої стінки до осі відгалуження трійника. Все це є причиною значного збільшення енерговитратності трійників при зменшенні діаметра їх відгалуження. Так, втрати тиску у зварному нерівнопрохідному трійнику з діаметром відгалуження 720 мм і діаметром магістралі 1420 мм у 15 разів більші, ніж у зварному рівнопрохідному трійнику діаметром 1420 мм. Визначено, що коефіцієнт місцевого опору трійників, у яких потік із магістралі повністю перетікає у відгалуження, значною мірою не залежить від діаметра відгалуження трійника і знаходиться у межах від 1,5 до 1,6.

Основні наукові результати розділу опубліковані в працях [48–55].

### РОЗДІЛ 3

## ДОСЛІДЖЕННЯ РУХУ БАГАТОФАЗНИХ ПОТОКІВ ФАСОННИМИ ЕЛЕМЕНТАМИ ТРУБОПРОВІДНИХ СИСТЕМ

Описано види та властивості характерних забруднень, які містяться у внутрішній порожнині магістральних, промислових і міжпромислових газонафтопроводів, визначено їх розміри, умови руху трубопроводом у потоці транспортованого продукту.

Ейлеровим підходом (модель Mixture) визначено закономірності газодинамічних двофазних процесів, гідравлічних втрат енергії двофазних потоків у елементах трубопроводних систем складної геометричної форми. Математична модель базується на розв'язанні системи рівнянь неперервності для суміші, збереження імпульсу й енергії суміші, рівняння об'ємної частки для дисперсних фаз. Результати моделювання візуалізовувались побудовою полів об'ємної частки суцільної та дисперсної фази, полів тиску в повздовжніх перерізах фасонних елементів. Визначено закономірності впливу геометричних параметрів, експлуатаційних параметрів транспортування та характеристик дисперсних фаз, їх об'ємної частки на втрати гідравлічної енергії в фасонних елементах трубопроводів. Отримано емпіричні формули для розрахунку втрат тиску двофазних потоків у фасонних елементах.

Лагранжевим підходом (модель Discrete Phase Model) виконано тривимірне моделювання руху багатофазних потоків елементах трубопроводних систем складної геометричної форми. Математична модель базується на розв'язанні системи рівнянь Нав'є-Стокса, неперервності, руху дисперсних фаз із відповідними початковими та граничними умовами. Отримано розраховані траєкторії руху крапель конденсату і твердих частинок фасонними елементами трубопроводів, які забарвлювались в кольори, що відповідають швидкості та діаметру дисперсних фаз відповідно до шкали значень. Визначено закономірності впливу напрямків руху потоку трійниками на траєкторії руху ними дисперсних фаз. Дослідивши траєкторії руху дисперсних фаз фасонними елементами, виявлено місця їх інтенсивного

вдаряння в стінку, місця їх завихрення, зміни напрямку руху. Визначено швидкість, кути атаки, діаметри дисперсних фаз у місці вдаряння в стінку.

### **3.1 Характеристика дисперсних фаз трубопровідних потоків**

#### **3.1.1 Магістральні газопроводи**

Транспортований магістральними газопроводами природний газ містить рідкі та тверді шкідливі домішки (дисперсні фази). Встановлено, що в порожнині магістральних газопроводів, які експлуатуються багато років, накопичуються винесені з свердловини частинки порід, окалина, яка відшарувалась від труб, продукти внутрішньотрубної корозії, конденсат, вода, метанол тощо [57, 59, 63, 260, 261].

Грудз В.Я. розділив накопичення у внутрішній порожнині магістральних газопроводів за зовнішнім виглядом на дві групи:

- рідкі малов'язкі накопичення – газовий конденсат і вода;
- високов'язкі застигаючі смолисті накопичення [262].

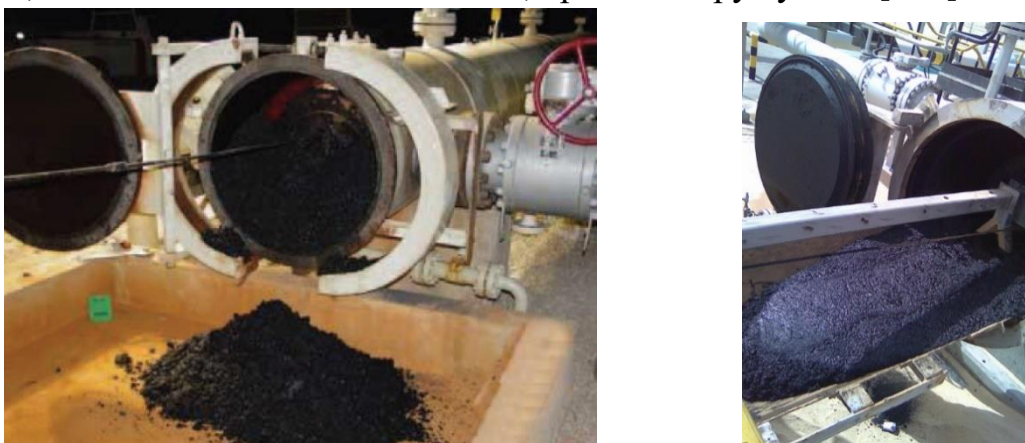
Накопичення першої групи спостерігаються в порожнині магістральних газопроводів на значній віддалі від компресорних станцій (більше 25 км). Ці накопичення випадають на позначці, де досягається точка роси перекачуваного газу по воді та вуглеводнях. Кисле середовище, яке створюється рідкими накопиченнями в порожнині магістрального газопроводу пришвидшує корозію внутрішньої стінки труби і, як наслідок, спричиняє збільшення вмісту металів у внутрішній порожнині газопроводів, які є твердими забрудненнями.

Високов'язким застигаючим накопиченням у внутрішній порожнині магістральних газопроводів є мастило, яке виноситься газом з нагнітачів.

У США та Західній Європі забруднення, які містяться у внутрішній порожнині газопроводів, називають чорним порошком (Black Powder (BP)). Чорний порошок (рисунок 3.1) став однією з найбільших проблем для багатьох газопроводів. Тверді речовини можуть бути піском, продуктами корозії, такі як



карбонат заліза, оксиди заліза та сульфід заліза, металеве залізо, шлаки зварних швів та огарки електродів, сіль, асфальтени та накип. Термін "чорний порошок" часто використовується для опису цієї комбінації твердих речовин у трубопроводах природного газу. Чорний порошок є гарною загальною назвою для цих твердих речовин, які не мають нічого спільного, крім кольору суміші [151].



**Рисунок 3.1** – Видалений з газопроводу чорний порошок

Різні оператори газопроводів наводять різні дані про склад вилученого з трубопроводів чорного порошку. Наприклад, деякі зазначають, що чорний порошок є, переважно, сульфідами заліза [263–265], інші повідомляють про повну відсутність сульфідів заліза, але відзначають наявність оксиду заліза –  $Fe_3O_4$  та  $FeO$  [266, 267]. Ще інші говорять про комбінацію всіх цих продуктів (сульфід заліза, карбонати заліза й оксиди заліза). Однак у всіх цих продуктів є одна загальна причина – внутрішньотрубна корозія, а точніше, реакція заліза (Fe) із конденсованою на стінках вологою, киснем ( $O_2$ ), сірководнем ( $H_2S$ ) і вуглекислим газом ( $CO_2$ ). В історії були випадки отримання досить великої кількості чорного порошку з газопроводів. Наприклад, 3628 кг порошку чорного кольору видалено з газопроводу діаметром 400 мм і довжиною 80 км в Х'юстоні і 500 кг з газопроводу діаметром 900 мм і довжиною 12 км грецького оператора газопровід [266]. Внутрішня корозія в «сухих» газопроводах часто ігнорується через недооцінку.

Іншими забрудненнями, які бувають у внутрішній порожнині газопроводів, є рідкі вуглеводні, солі, хлориди, сульфати, пісок, асфальтени та залишки зварювання. З точки зору ерозії, оксиди заліза, такі як магнетит, призводять до

значного ерозійного зношування оскільки мають велику твердість.

Згідно з дослідженням [268], діапазон розмірів частинок чорного порошку в одному трубопроводі може бути доволі широкий. Наприклад, досліджувались два зразки з двох газопроводів: зразок А з частинками розміру від 44 мкм до 210 мкм і зразок В із основною часиною частинок, розміром менше 37 мкм.

Дослідження проб, відібраних із внутрішньої порожнини магістральних газопроводів Союз, Уренгой-Помари-Ужгород під час виконання ремонтних робіт із заміною дефектних ділянок, дефектного технологічного обладнання, показало, що у внутрішній порожнині цих газопроводів є пісок розміром зерен до 120 мкм і невеликий вміст продуктів внутрішньотрубної корозії (до 20 % загального обсягу проби) розміром до 200 мкм.

### **3.1.2 Промислові та міжпромислові газопроводи**

Щодо промислових та міжпромислових газопроводів, то їх гідравлічний стан набагато гірший за магістральні. Це зумовлено тим, що більшість родовищ в Україні експлуатується на завершальній стадії розробки. Характерним для цього є істотне зниження пластового тиску, низький дебіт свердловин, високий вміст в газі пластової води та вуглеводневого конденсату [60–62, 269].

Братах М. І. [270], Стецюк С. М. [271] систематизували причини утворення твердих і рідинних накопичень у порожнині промислових і міжпромислових газопроводів, серед яких виділили такі аварійні відмови; неякісну роботу устаткування сепарації установок комплексної підготовки газу газодобувних підприємств України, зумовлену виснаженням родовищ (зменшується тиск, витрата); зношення внутрішніх відбійників сепараторів,

Також у промислових системах і газопроводах можуть утворюватися в'язкі та тверді накопичення. До в'язких накопичень відносять: мастило, парафін, етиленгліколі, різні смоли [272].

Враховуючи те, що природний газ не містить жодного мастила, то причиною появи останнього в газовому потоці є механічне винесення його з пиловловлювачів

і циліндричних поршневих агрегатів. Спостереження дослідників свідчать, що реальна кількість винесеного мастила з пиловловлювачів перевищує норму його витрати та є нерівномірною в часі. [273]

В деяких природних газах містяться парафінові з'єднання, які, не зважаючи на сепарацію, повністю не видаляються з газового потоку. Основну частину нафтового парафіну складають вуглеводні метанового ряду, які кристалізуються у вигляді великих пластинок і стрічок. Парафіни відкладаються на стінках трубопроводів. [274]

Ще одним видом в'язких накопичень у газопроводі можуть бути гігроскопічні рідини (етиленгліколь, диетиленгліколь тощо), які вприскують в газопровід для запобігання гідратоутворення або застосовують в установках осушування газу як рідинні поглиначі.

Внаслідок регенерації диетиленгліколю на УКПГ у процесі його деструкції утворюються органічні кислоти, які є слабкими електролітами і сприяють перебігу процесу активної корозії внутрішньої порожнини труби. Іншим джерелом появи цих кислот у газопроводі є притік безпосередньо з свердловини.

Як показують дослідження [273], метанол, як інгібітор гідратоутворення, не завжди виноситься з газовим потоком, а накопичується в понижених місцях траси газопроводу і утворює водно-метанольний нижній шар. Його поверхня вкривається шаром газоконденсату і мінерального мастила, що, відповідно, зменшує ефективність метанолу як інгібітору гідратоутворення.

Базуючись на виконаних за останні 40 років [272–274] дослідженнях, можна виділити два джерела надходження твердих забруднень у внутрішню порожнину газопроводів:

- неякісна очистка газопроводу перед його введенням в експлуатацію (бруд, пісок, доволі великі предмети, залишки будівельного шламу, огарки електродів тощо);
- винесення мінеральних утворень з свердловин (залишки бурового глинистого розчину, шлам порід-колекторів).

Газопровідний пил складається з дрібних і твердих частинок, що призводять

до ерозійного зношування стінки газопроводів, компресорів, контрольних вимірювальних приладів і апаратури на промислових газорозподільних станціях і компресорних станціях. Процесу ерозії сприяють інтенсивна корозія, спричинена наявністю агресивних речовин, і підвищення швидкості газу. Таким чином, третім джерелом наявності твердих частинок в газопроводі є ерозія стінки трубопроводу. Це припущення підтверджують дослідження [272] старих газопроводів, в яких окислів заліза більше практично вдвічі ніж, у нових.

Тип та якісний склад забруднень для кожного із родовищ є специфічними та притаманні лише досліджуваній газонасній площі:

– для Львівщини притаманна наявність пластової та конденсаційної води зі значним вмістом дрібнодисперсних механічних домішок як побічного продукту корозії;

– для Полтавських родовищ – локалізація конденсату різної густини;

– для групи свердловин Шебелинського ГКР в районі УКПГ-19 – глинисто-рідинна суспензія. [275]

Наявність сірководню ( $H_2S$ ) у газі, який транспортується промисловими газопроводами, призводить до внутрішньотрубної корозії й утворення сульфідів заліза, оксидів заліза та карбонату заліза. Так, наприклад, у промисловому газопроводі діаметром 920 мм довжиною 45 км на околиці м. Дохи (Катар) було виявлено 7 тон продуктів внутрішньотрубної корозії. Проблема була виявлена під час очищення поршнем газопроводу перед діагностуванням інтелектуальним поршнем. Під час очищення поршень застряг на віддалі 7 км від камери запускання. Щоб видалити поршень, газопровід розрізали і було виявлено забруднення. [276]

### **3.1.3 Нафтопроводи, нафтопродуктопроводи**

У транспортованій нафтопроводами нафті є вода, різні мінеральні солі, парафіни, тверді частинки, які ускладнюють її транспортування. Наявність води в нафті зумовлює подорожчання транспортування через збільшенням її об'ємів і підвищення в'язкості суміші нафти та води порівняно з чистою нафтою.

Присутність мінеральних солей, кристалізованих у нафті та розчинених у воді, посилює внутрішньотрубну корозію.

Твердими частинками в нафтопроводах є речовини, винесені зі свердловин на поверхню разом з нафтою, продукти внутрішньотрубної корозії.

У місцях пониження траси нафтопроводу відкладаються вода та механічні домішки, а в підвищених місцях траси спостерігаються скупчення газу і парів.

Якщо нафта, нафтопродукт охолоджені до температури, нижчої за температуру випадання парафінів, то на внутрішній поверхні магістральних і промислових нафтопроводів утворюються нерівномірні відкладання щільного шару із парафінів, церезинів, асфальтено-смолистих речовин і твердих частинок. Різні солі та парафіни створюють твердий осад в нафтопроводах, який важко руйнується та зменшує поперечний переріз трубопроводу, знижує його пропускну здатність і призводить до збільшення енерговитрат на перекачування нафти.

Парафін відкладається нерівномірно на стінці нафтопроводу. На початку нафтопроводу нафта ще тепла і кристали парафіну відкладаються в незначній кількості. Далі вздовж траси нафтопроводу температура нафти знижується і починає виділятися з нафти парафін. Відповідно, і відбуваються його відкладання на стінках в цьому місці. Далі температура потоку нафти не змінюється на великій віддалі, оскільки вона зрівнюється з температурою ґрунту, і кристалізація парафіну на стінках труби зменшується. В нижній частині парафіну відкладається менше, ніж у верхній. Це пояснюється тим, що верхня поверхня труби має нижчу температуру, а механічні домішки видаляють з нижньої стінки трубопроводу парафін. [59]

Чорний порошок у нафтопроводах – це суміш сполук сульфїду залїза, оксиду залїза, пїску, солї, шлакїв зварних швїв, глини й їнших сполук [151].

### **3.2 Дослїдження газодинамїки та втрат гїдравлїчної енергїї двофазних потокїв у фасонних елементах трубопроводїв**

Дослїдженню багатофазних потокїв у прямолїнійних дїлянках трубопроводїв

присвячено багато праць [277–280]. Дослідники виявили, що дисперсні шкідливі домішки в трубопровідних потоках є причиною збільшення гідравлічних втрат енергії.

Проблема прогнозування втрат енергії двофазних потоків в елементах газопровідних систем складної геометричної форми є набагато складнішою, ніж у прямих ділянках трубопроводів, оскільки фізична картина руху потоку в таких елементах є надзвичайно складною і чітко невизначеною. Особливо це стосується відводів і трійників, які є найпоширенішими елементами газопровідних систем. У таких елементах змінюється напрям руху двофазного потоку, в результаті чого діє відцентрова сила, що призводить до нерівномірного перерозподілу фаз і тертя між фазами (фаза більшої густини зазнає більшої дії відцентрової сили), втрачається імпульс, виникають вторинні потоки, сила яких залежить від кривизни геометрії. Все це спричинює складний перерозподіл швидкості та тиску потоку, призводить до значних втрат гідравлічної енергії.

У міру зростання концентрації дисперсної фази її вплив на рух транспортованого середовища, втрати енергії збільшується. При цьому газова фаза чинить суттєвий вплив на процеси розповсюдження дисперсної. Тому досліджуючи рух потоків трубопроводами, треба враховувати взаємну дію фаз одна на іншу.

Багатофазні газодинамічні процеси та величина втрат гідравлічної енергії суттєво залежать від геометрії елементів газопровідних систем. Втрати гідравлічної енергії в елементах газопровідних систем є досить суттєвими. Враховуючи великі масштаби багатьох трубопровідних систем навіть незначне зменшення втрат енергії в окремих її елементах може значно зменшити загальні

### **3.2.1 Вибір методики дослідження**

Величина втрат гідравлічної енергії залежить від режимних і геометричних параметрів, концентрації та характеристик дисперсної фази. Кількісне визначення гідравлічних втрат енергії двофазних потоків у відводах, трійниках є великою

проблемою при проектуванні та гідравлічному аналізі газопровідних систем. Експериментальних даних у літературних джерелах надзвичайно мало. Причиною цього є велика кількість та діапазон змінних параметрів багатофазних потоків і геометричних параметрів фасонних елементів трубопроводів. До того ж, в умовах газопроводів, особливо магістральних, вивчати експериментально багатофазні потоки надзвичайно складно, а в багатьох аспектах – неможливо. [169, 281, 282].

Ефективним інструментом кількісного визначення міри впливу параметрів багатофазних потоків і геометричних параметрів елементів газопровідних систем на гідравлічні втрати енергії є CFD моделювання, яке останніми роками набуло популярності [157, 167, 283]. CFD моделювання дозволяє зрозуміти складну динаміку руху багатофазних газових потоків елементами газопровідних систем, побачити в деталях тривимірний багатофазний потік і вивчати втрати тиску, розподіл фаз (об'ємні частки), швидкості потоку, турбулентність, кінетичну енергію тощо. Також можна змінювати вихідні режимні параметри, геометрію досліджуваного елемента та досліджувати їх вплив на фізичну картину руху багатофазних потоків, гідравлічні втрати енергії. У будь-якій точці 3D потоку можна легко визначати величину будь-якого параметра. Експериментально багато чого з переліченого визначити, дослідити неможливо.

Для правильного моделювання трубопроводних потоків у CFD закладено різні складні багатофазні моделі, які зарекомендували себе більш точні результати порівняно з іншими моделями, особливо коли є важливою складна геометрія потоку. [284, 285]

Для дослідження втрат гідравлічної енергії в елементах трубопроводних систем найкраще застосовувати Ейлеровий підхід. Для багатофазних потоків вводиться поняття об'ємної частки (volume fraction) фази – ще одного додаткового параметра течії. Ейлеровий підхід застосовується тоді, коли об'ємна частка дисперсної фази є значною. Ейлеровий підхід містить кілька моделей.

Модель VOF – відстежування поверхні. Ця модель призначена для моделювання двох або більше потоків незмішуваних речовин (стратифіковані потоки) із чітким протяжним (тобто можна порівняти за розміром із розмірами

розрахункової геометрії) інтерфейсом (межею поділу). Форма цього інтерфейсу є єдиним результатом моделювання. У моделі VOF закладено набір рівнянь збереження імпульсу та відстеження об'ємної частки кожної з рідин у кожній обчислювальній точці усієї геометрії 3D потоку. В цій моделі ковзання між фазами не передбачено, а для великих коефіцієнтів ковзання неможливо зафіксувати динаміку потоку. Результати моделювання добре узгоджуються з експериментальними даними до коефіцієнта ковзання 20.

Модель Mixture – модель багатофазової суміші. Модель Mixture розрахована на дві або більше фаз (рідина або тверді частинки). Фази є взаємопроникними континуумами.

Модель Mixture відрізняється від моделі VOF двома аспектами:

– модель Mixture дозволяє взаємно проникати фазам. Об'ємні частки суцільної фази  $q$  і дисперсної фази  $p$  можуть мати будь-яке значення від 0 до 1 залежно від того, скільки місця вони займають;

– модель Mixture дозволяє фазам рухатися з різною швидкістю. Для цього введено поняття швидкості ковзання. Вона добре працює при високих коефіцієнтах ковзання – понад 262. Також фази можуть рухатись із однаковою швидкістю, і тоді модель Mixture зводиться до однорідної багатофазної моделі.

В моделі Mixture тільки одна з фаз може бути стискуваною.

Модель Eulerian – модель взаємопроникних середовищ. У моделі Eulerian закладено набір  $n$  рівнянь імпульсу та неперервності для кожної фази. Рівняння замикаються через коефіцієнти тиску та міжфазного обміну. Фази є взаємопроникними континуумами. [286]

В цьому дослідженні будемо застосовувати модель Mixture, оскільки вона призначена для моделювання дисперсних багатофазних потоків, де фази можуть рухатись із різною швидкістю, здатна моделювати будь-яку кількість фаз (рідину або тверді частинки) і є порівняно простішою для розуміння, ніж модель Eulerian, та достатньо точною.

CFD моделювання будемо виконувати в програмному комплексі ANSYS Fluent R19.2 Academic.



### 3.2.2 Математична модель багатофазної суміші у фасонних елементах трубопроводів

У моделі Mixture закладено рівняння неперервності для суміші, збереження імпульсу й енергії суміші, рівняння об'ємної частки для дисперсних фаз і алгебраїчні вирази відносних швидкостей (якщо фази рухаються з різними швидкостями).

Рівняння неперервності суміші

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_c \bar{v}_c) = 0, \quad (3.1)$$

де  $\rho_c$  – густина суміші;

$\bar{v}_c$  – середня швидкість суміші.

Густина суміші

$$\rho_c = \sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k, \quad (3.2)$$

де  $\alpha_k$  – об'ємна частка фази  $k$  ;

$\rho_k$  – густина фази  $k$  ;

$n$  – кількість фаз.

Середня швидкість суміші

$$\bar{v}_c = \frac{\sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k \bar{v}_k}{\rho_c}, \quad (3.3)$$

де  $\bar{v}_k$  – середня масова швидкість фази  $k$ .

Додаванням окремих рівнянь збереження імпульсу кожної фази можна отримати рівняння збереження імпульсу для суміші

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho_c \bar{v}_c) + \nabla \cdot (\rho_c \bar{v}_c \bar{v}_c) = -\nabla p + \nabla \cdot \left( \mu_c \left( \nabla \bar{v}_c + \nabla \bar{v}_c^T \right) \right) + \\ + \rho_c \bar{g} + \bar{F} + \nabla \cdot \left( \sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k \bar{v}_{dr,k} \bar{v}_{dr,k} \right), \end{aligned} \quad (3.4)$$

де  $\bar{F}$  – сила, яка діє на потік;

$\mu_c$  – в'язкість суміші;

$\bar{g}$  – прискорення вільного падіння;

$\bar{v}_{dr,k}$  – швидкість дрейфу дисперсної фази  $k$ ;

В'язкість суміші

$$\mu_c = \sum_{k=1}^n \alpha_k \mu_k, \quad (3.5)$$

де  $\mu_k$  – в'язкість фази  $k$ .

Швидкість дрейфу дисперсної фази

$$\bar{v}_{dr,k} = \bar{v}_k - \bar{v}_c. \quad (3.6)$$

Відносна швидкість (також її називають швидкістю ковзання) є різницею між швидкістю дисперсної фази  $p$  і швидкістю суцільної фази  $q$

$$\bar{v}_{pq} = \bar{v}_p - \bar{v}_q, \quad (3.7)$$

де  $\bar{v}_p$  – швидкість дисперсної фази;

$\bar{v}_q$  – швидкість суцільної фази.

Масова частка дисперсної фази  $k$

$$c_k = \frac{\alpha_k \rho_k}{\rho_c}. \quad (3.8)$$

Швидкість дрейфу дисперсної фази – це різниця між швидкістю ковзання й алгебраїчною сумою добутків масових часток на швидкість дисперсної фази

$$\bar{v}_{dr,p} = \bar{v}_{pq} - \sum_{k=1}^n c_k \bar{v}_{pk}. \quad (3.9)$$

У моделі Mixture використовується формула алгебраїчна модель ковзання. Основним припущення алгебраїчної моделі ковзання суміші є те, що локальна рівновага між фазами повинна бути досягнута на короткій просторовій довжині. Тоді відносна швидкість рівна

$$\bar{v}_{pq} = \frac{\tau_p}{f_{drag}} \frac{(\rho_p - \rho_c)}{\rho_p} \bar{a}, \quad (3.10)$$

де  $\tau_p$  – час релаксації частинок дисперсної фази;

$f_{drag}$  – перемикач функції;

$\rho_p$  – густина дисперсної фази;

$\bar{a}$  – прискорення дисперсних частинок.

Час релаксації частинок дисперсної фази

$$\tau_p = \frac{\rho_p d_p^2}{18\mu_q}, \quad (3.11)$$

де  $d_p$  – діаметр дисперсних частинок;

$\mu_q$  – в'язкість суцільної фази.

Перемикач функції

$$f_{drag} = \begin{cases} 1+0,15 Re^{0,687} & Re \leq 1000 \\ 0,0183 Re & Re > 1000 \end{cases} . \quad (3.12)$$

Прискорення дисперсних частинок

$$\bar{a} = \bar{g} - (\bar{v}_c \cdot \nabla) \bar{v}_c - \frac{\partial \bar{v}_c}{\partial t} a . \quad (3.13)$$

У моделі дисперсного потоку прискорення частинки задається силою тяжіння та/або відцентровою силою. Щоб врахувати наявність інших частинок, час релаксації частинок змінюється. В турбулентних потоках відносна швидкість повинна містити складову дифузії, зумовлену дисперсією, яка повинна бути в рівнянні імпульсу для дисперсної фази. В моделі Mixture ця дисперсія додається до відносної швидкості

$$\bar{v}_{pq} = \frac{(\rho_p - \rho_c) d_p^2}{18 \mu_q f_{drag}} \bar{a} - \frac{\nu_c}{\alpha_p \sigma_D} \nabla \alpha_q , \quad (3.14)$$

де  $\alpha_p$  – об'ємна частка дисперсної фази;

$\alpha_q$  – об'ємна частка суцільної фази;

$\nu_c$  – турбулентна в'язкість суміші;

$\sigma_D$  – коефіцієнт дисперсії Прандтля.

Рівняння збереження енергії суміші

$$\frac{\partial}{\partial t} \sum_{k=1}^n (\alpha_k \rho_k h_k) + \nabla \cdot \sum_{k=1}^n (\alpha_k \bar{v}_k (\rho_k h_k + p)) = \nabla \cdot (k_{eff} \nabla T) + S_E, \quad (3.15)$$

де  $k_{eff}$  – ефективна провідність;

$h_k$  – ентальпія фази  $k$  ;

$S_E$  – передача енергії за рахунок провідності.  $S_E$  включає будь-яке інше об'ємне джерело тепла.

З рівняння неперервності дисперсної фази  $p$  можна отримати рівняння об'ємної частки для дисперсної фази  $p$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_p \rho_p) + \nabla \cdot (\alpha_p \rho_p \bar{v}_c) = -\nabla \cdot (\alpha_p \rho_p \bar{v}_{dr,p}). \quad [286] \quad (3.16)$$

### 3.2.3 Дослідження структури та гідравлічних втрат енергії двофазних потоків у відводах трубопроводів

Від геометричної форми та геометричних параметрів елементів газопровідних систем суттєво залежать багатофазні газодинамічні процеси, які відбуваються у цих елементах, величина втрат у них гідравлічної енергії. Оскільки багатофазні потоки в елементах газопровідних систем складної геометричної форми є надзвичайно складними, а їх фізична картина руху – тривимірною, дослідження було виконано із застосуванням 3D геометричного моделювання.

Геометричними параметрами відводів газопроводів, від яких залежить величина втрат гідравлічної енергії багатофазного потоку, є внутрішній діаметр відводу  $D_B$ , кут вигину  $\varphi$  і радіус вигину відводу  $R_B$  (рисунок 2.4). Вплив цих параметрів на втрати гідравлічної енергії у відводах газопроводів не достатньо досліджений. Для виконання таких досліджень було вибрано п'ять різних зовнішніх діаметри відводів – 89 мм, 219 мм, 530 мм, 1020 мм і 1420 мм. Для діаметру 530 мм були накреслені відводи з радіусом вигину рівним DN (DN – умовний діаметр відводу) і кутами вигину 30°, 45°, 60° і 90°, а також з кутом вигину

90° та радіусами вигину DN, 1,5 DN, 2 DN, 2,5 DN і 3,5 DN. Відводи були накреслені з прилеглими ділянками труб.

Геометричним параметром трійників газопроводів, від якого найбільшою мірою залежить величина втрат гідравлічної енергії багатофазного потоку, є радіус відбортування трійника. Вплив цього параметру на втрати гідравлічної енергії у трійниках газопроводів не достатньо досліджений. Щоб виконати такі дослідження, була накреслена внутрішня порожнина зварного трійника зовнішнім діаметром 530 мм, у якого з'єднання магістралі та відгалуження виконується під прямим кутом (рисунок 2.2, а). Також була накреслена внутрішня порожнина штампованих трійників зовнішнім діаметром 530 мм, в яких перехід від відводу до магістралі виконується відбортуванням (рисунок 2.2, б). Оскільки радіус відбортування штампованого трійника  $R_T$  повинен бути не меншим  $0,1 \cdot D_{з.в}$ , то було накреслено п'ять моделей внутрішньої порожнини з радіусом відбортування, який змінювався від  $0,1 \cdot D_{з.в}$  до максимально можливого (53 мм, 95 мм, 136 мм та 178 мм).

Крім геометричної форми та геометричних параметрів, на втрати гідравлічної енергії в елементах газопровідних систем суттєво впливають режимні параметри транспортування багатофазних потоків і характеристики дисперсних фаз, які задавались у препроцесорі ANSYS Fluent. Суцільною фазою був вибраний природний газ, який приймався як стискуване середовище. Матеріалом стінки трійників задавалась сталь. Коефіцієнт еквівалентної шорсткості трійників і прилеглими ділянок труб задавався рівним 0,03 мм.

Досвід експлуатації газопроводів показує, що основною причиною збільшення гідравлічного опору газопроводів є рідкі шкідливі домішки. Рідкими шкідливими домішками можуть бути конденсат або вода, які у великих обсягах виносяться з свердловин, випадають з газу при досягненні точки роси транспортованого газу. Наявність конденсату в газопроводі призводить до транспортування двофазної суміші, що спричиняє збільшення втрат гідравлічної енергії. Тому в якості дисперсної фази був заданий конденсат густиною 960 кг/м<sup>3</sup>. Це значення є близьким до густини води.

Основними режимними параметрами транспортування, які найбільше впливають на втрати енергії і вплив яких досліджувався, є швидкість багатофазного потоку та тиск. Швидкість суцільної і дисперсної фази, які приймалися рівними між собою, задавались на вході у кожнен відвід, а тиск задавався на виході з відводу. Швидкість на вході змінювалась від 7 м/с до 19 м/с з кроком 3 м/с, а тиск – від 3 МПа до 7 МПа з кроком 1 МПа. Для кожного значення швидкості та тиску виконувалось окреме моделювання.

Температура суцільної та дисперсної фази відповідає умовам експлуатації газопроводів і задавалась 273 К. Також на вході у відвід і на виході з відводу задавалась інтенсивність турбулентності 5 % (для такого значення потік вважається повністю турбулентний) і гідравлічний діаметр. Гідравлічний діаметр приймався рівним внутрішньому діаметру трубопроводу.

Основними характеристиками дисперсної фази, які найбільше впливають на втрати енергії, і вплив яких досліджувався, є концентрація частинок та їх розмір.

Максимальний діаметр крапель дисперсної рідкої фази згідно з [287, (14.13)] рівний

$$d_{pid}^{max} = 2D_{en}k_f^{\frac{3}{5}}We^{\frac{3}{5}}\left(\frac{\rho_{gaz}}{\rho_{pid}}\right)^{\frac{2}{5}}, \quad (3.17)$$

де  $D_{en}$  – внутрішній діаметр газопроводу;

$k_f$  – коефіцієнт аеродинамічного опору краплі,  $k_f = 0,4$ ;

$\rho_{gaz}$  – густина газу;

$\rho_{pid}$  – густина рідкої фази;

$We$  – безрозмірний параметр – число Вебера

$$We = \frac{\rho_{gaz}u^2D_{en}}{\Sigma}, \quad (3.18)$$

де  $\Sigma$  – сила поверхневого натягу рідкої фази на межі з газом.

Сила поверхневого натягу рідкої фази на межі з газом залежить від тиску та температури газу і визначалась за [288, таблиця VI.2].

Розрахований за (3.17) максимальний діаметр крапель дисперсної рідкої фази склав близько 100 мкм. Тому діаметри крапель приймались рівними 100 мкм, 50 мкм, 10 мкм, 5 мкм, та 1 мкм. Концентрація частинок в Ansys Fluent задається як об'ємна частка дисперсної фази, яка на вході відводу змінювалась від 0,1 до 0,3 з кроком 0,05. Об'ємною часткою визначається кількість дисперсної фази в суцільній. За об'ємну частку приймають безрозмірну величину, яка є відношенням об'єму, зайнятого дисперсною фазою, до загального об'єму багатofазної системи.

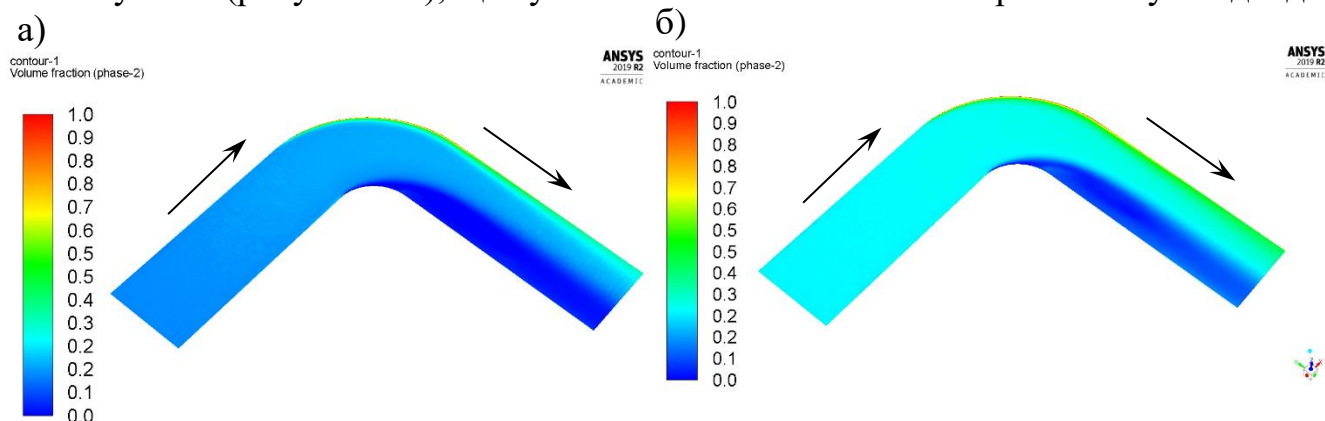
Втрати тиску багатofазного потоку в елементах газопровідних систем складної геометричної форми є основним показниками, за якими можна оцінити їх гідравлічну енерговитратність. Тому в постпроцесорі програмного комплексу ANSYS Fluent результати кожного моделювання були візуалізовані побудовою поля тиску в повздовжніх перерізах кожного відводу та трійника. Для прикладу розглянемо відвід зовнішнім діаметром 530 мм. Швидкість суцільної та дисперсної фази на вході – 13 м/с, тиск на виході відводу – 5 МПа, діаметр крапель дисперсної рідкої фази – 50 мкм, об'ємна частка дисперсної фази на вході відводу рівна 0,1 і 0,3.

У місці зміни напрямку потоку у відводі дисперсна фаза починає зміщуватись від ввігнутого боку відводу в сторону опуклого (рисунок 3.2). У місці виходу газового потоку з відводу і в прилеглий до нього трубі дисперсна фаза, в основному, концентрована в половині труби з опуклого боку відводу. Розподіл об'ємної частки суцільної фази є протилежним до дисперсної, і вона більше концентрована з вгнутого боку відводу (рисунок 3.3).

Зміна напрямку руху багатofазного газового потоку у відводі призводить до складного перерозподілу тиску (рисунок 3.4). У відводі спостерігається радіальний градієнт тиску, зумовлений відцентровою силою, що діє на багатofазний потік. Крім радіального градієнту тиску, причиною втрат тиску у відводі є турбулентні вихри з ввігнутого боку відводу за місцем вигину на внутрішній стінці. Зі

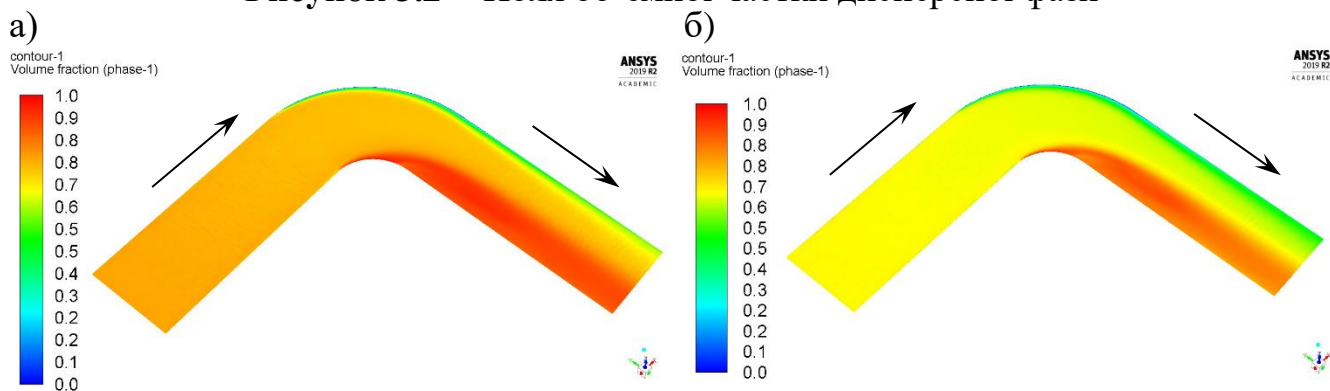


збільшенням об'ємної частки дисперсної фази падіння тиску в цьому місці збільшується (рисунок 3.4), що суттєво впливає на загальні втрати тиску в відводі.



а) – об'ємна частка дисперсної фази на вході відводу, рівна 0,1; б) – об'ємна частка дисперсної фази на вході відводу, рівна 0,3

**Рисунок 3.2 – Поля об'ємної частки дисперсної фази**

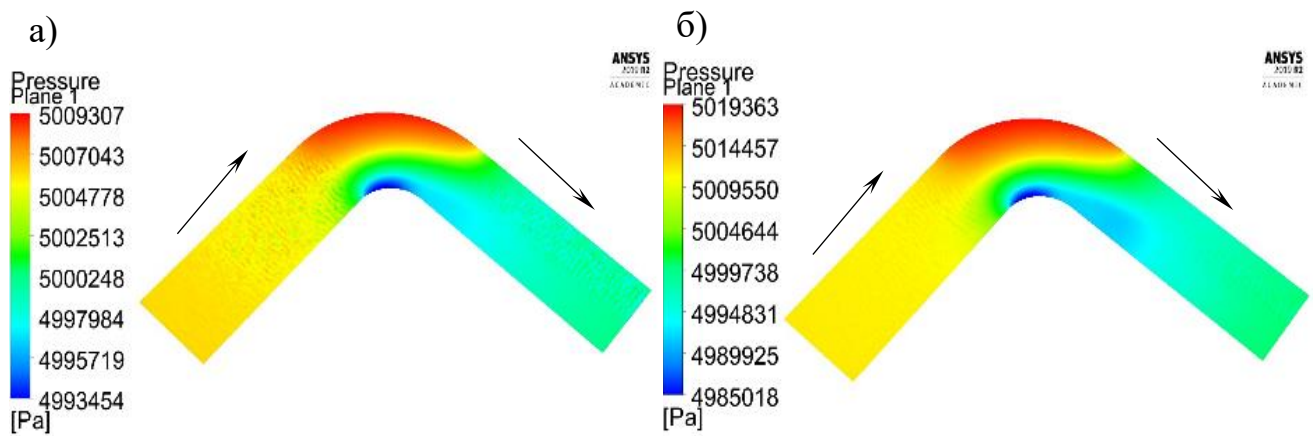


а) – об'ємна частка суцільної фази на вході відводу, рівна 0,9; б) – об'ємна частка дисперсної фази на вході відводу, рівна 0,7

**Рисунок 3.3 – Поля об'ємної частки суцільної фази**

Падіння тиску у відводі  $\Delta P$  визначались відніманням від тиску на вході в відвід тиску на виході відводу. Найбільші втрати тиску відбувається тоді коли об'ємна частка  $\alpha$  дисперсної фази на вході відводу рівна 0,3, і складають 17504 Па. Коли об'ємна частка дисперсної фази на вході відводу  $\alpha$  рівна 0,1, втрати тиску в відводі складають 9864 Па. У результаті збільшення об'ємної частки дисперсної фази на вході відводу від 0,1 до 0,3 втрати тиску у відводі збільшується майже вдвічі.

Залежність падіння тиску в відводах від геометричних параметрів (діаметра відводу, радіуса та кута вигину) досліджувалась при незмінних режимних



а) – об’ємна частка дисперсної фази на вході відводу, рівна 0,1; б) – об’ємна частка дисперсної фази на вході відводу, рівна 0,3

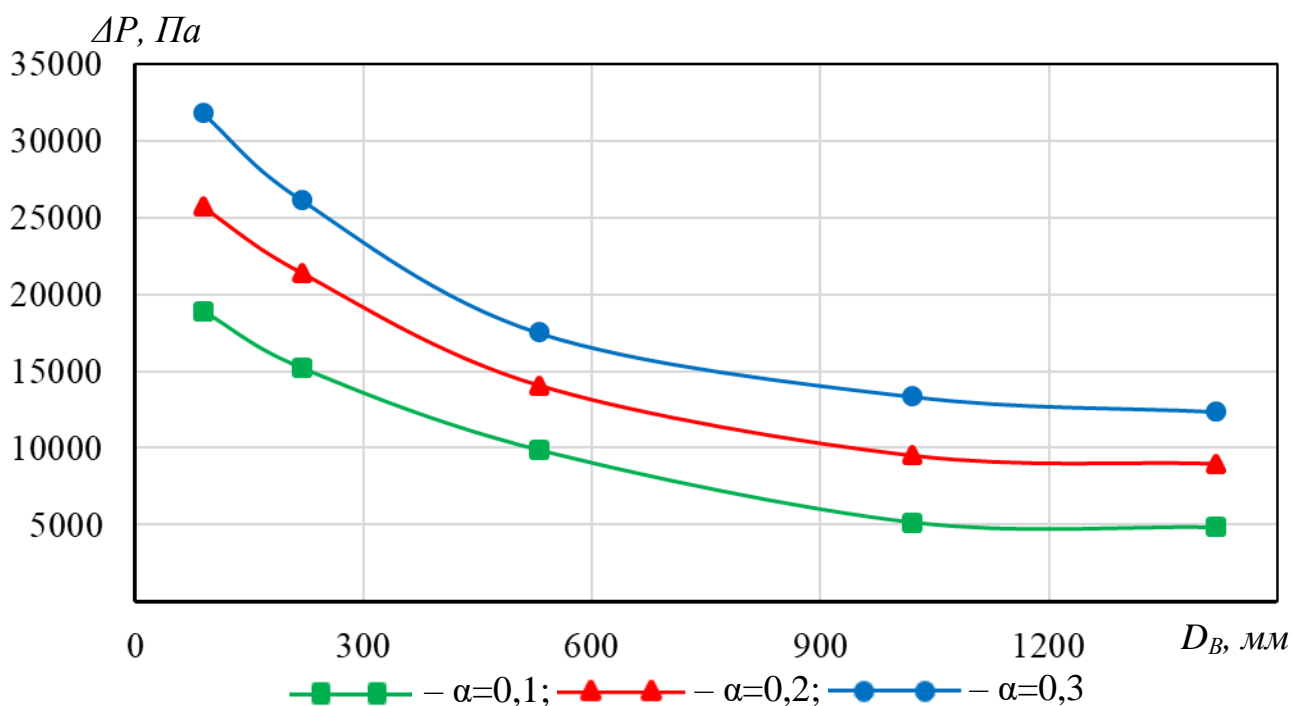
**Рисунок 3.4** – Поля тиску в повздовжніх перерізах відводів

параметрах двофазного потоку та незмінних характеристиках дисперсних фаз. Швидкість суцільної та дисперсної фази на вході задавалась рівною 13 м/с, тиск на виході відводу – 5 МПа, діаметр крапель дисперсної рідкої фази – 80 мкм. Змінювалась тільки об’ємна частка дисперсної фази.

Падіння тиску у відводах різного діаметру визначались для відводів із кутом вигину  $90^\circ$  і радіусом вигину рівним умовному діаметру відводу  $DN$ . На рисунку 3.5 наведено побудовану за результатами таких визначень графічну залежність падіння тиску в відводі  $\Delta P$  від діаметра відводу  $D_B$  для різних об’ємних часток дисперсної фази на вході відводу, а саме 0,1, 0,2 та 0,3.

Отримані результати показують, що за однакових інших параметрів падіння тиску у відводі збільшується зі зменшенням його діаметру для усіх об’ємних часток дисперсної фази (рисунок 3.5). Причому, чим більша об’ємна частка дисперсної фази, тим більше падіння тиску у відводі одного й того ж діаметра. Також можна помітити, що збільшення падіння тиску у відводах малого діаметра (менше 500 мм) відбувається набагато інтенсивніше, ніж у відводах великих діаметрів. Тому вплив діаметру відводу на втрати енергії треба враховувати, особливо це стосується відводів діаметром, меншим 500 мм.

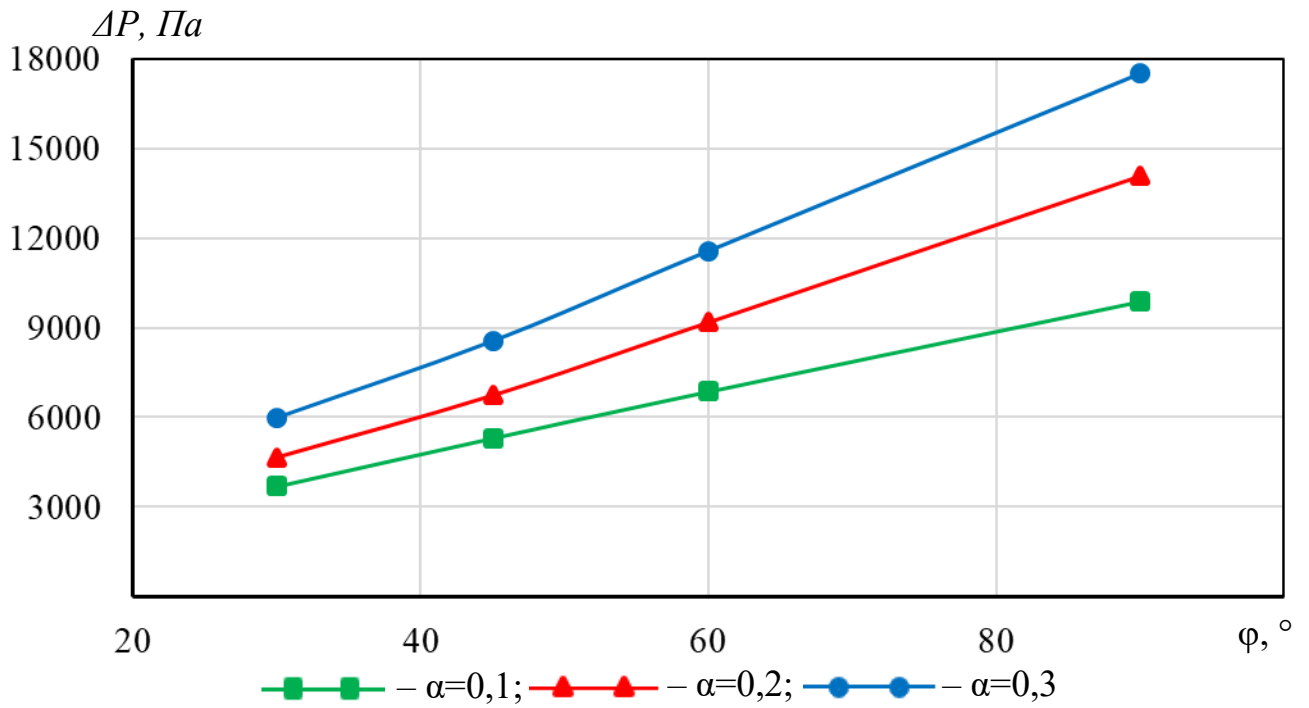
Падіння тиску в відводах із різним кутом вигину визначались для відводів зовнішнім діаметром 530 мм із радіусом вигину, рівним умовному діаметру



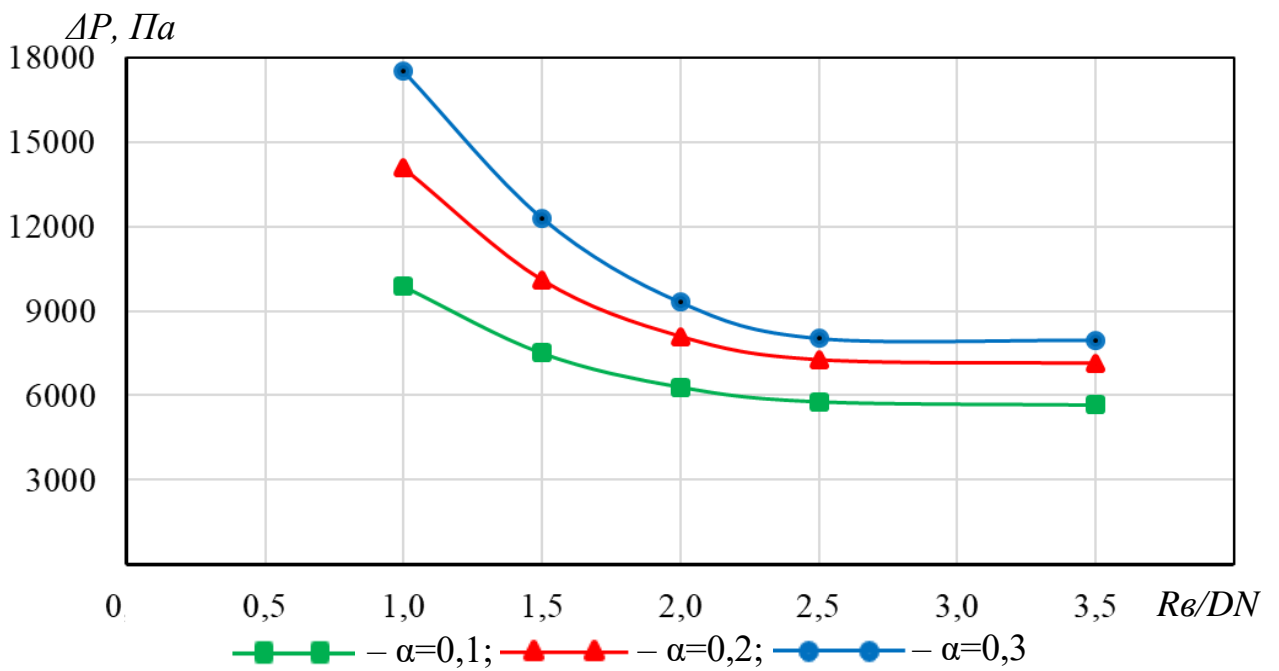
**Рисунок 3.5** – Залежність падіння тиску в відводі від діаметра відводу для різних об'ємних часток дисперсної фази

відводу DN. На рисунку 3.6 наведено графічну залежність падіння тиску в відводі  $\Delta P$  від кута вигину відводу  $\varphi$  для різних об'ємних часток дисперсної фази на вході відводу, а саме 0,1, 0,2 та 0,3. Як бачимо, у міру зростання кута вигину відводу падіння тиску збільшується за наближеною до лінійної залежністю для усіх об'ємних часток дисперсної фази. Причому, чим більша об'ємна частка дисперсної фази тим більший нахил прямої до осі абсцис і тим інтенсивніше відбувається збільшення втрат тиску в відводі.

Втрати тиску у відводах із різним відношенням радіуса вигину до номінального діаметра відводу визначались для відводів зовнішнім діаметром 530 мм з кутом вигину  $90^\circ$ . На рисунку 3.7 наведено графічну залежність падіння тиску в відводі  $\Delta P$  від відношення радіуса вигину до номінального діаметра відводу  $R_0/DN$  для різних об'ємних часток дисперсної фази на вході відводу, а саме 0,1, 0,2 та 0,3. Як бачимо, радіус вигину відводу суттєво впливає на падіння тиску в ньому саме тоді, коли він менший за  $2,5DN$ . Спостерігається різке збільшення втрат тиску в відводі при зменшенні радіуса відводу. Причому, чим більша об'ємна частка дисперсної фази, тим інтенсивніше збільшуються втрати зі



**Рисунок 3.6** – Залежність падіння тиску в відводі від кута вигину відводу для різних об’ємних часток дисперсної фази

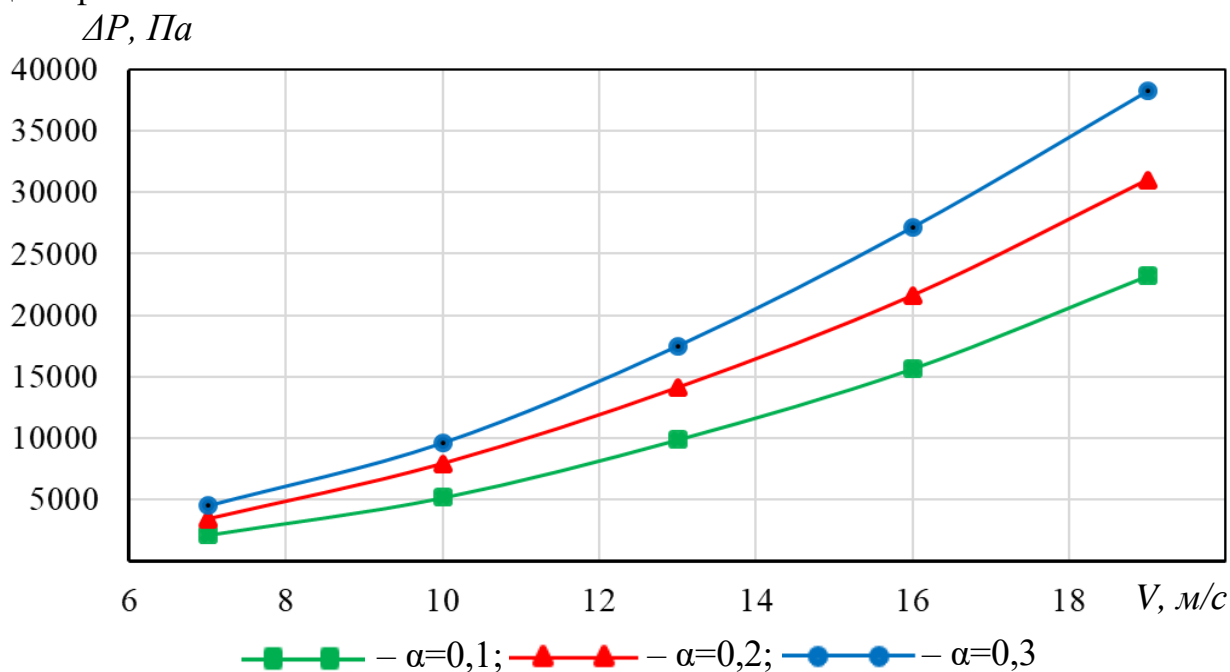


**Рисунок 3.7** – Залежність падіння тиску в відводі від відношення радіусу вигину відводу до його номінального діаметра для різних об’ємних часток дисперсної фази

зменшенням радіуса відводу. При великих радіусах вигину відводу, коли він перевищує  $2,5DN$ , падіння тиску є мінімальним і практично не змінюється.

Залежність падіння тиску в відводі від режимних параметрів двофазного потоку, характеристик дисперсних фаз досліджувалась при незмінних геометричних параметрах відводу. Діаметр відводу дорівнює 530 мм, кут вигину відводу –  $90^\circ$ , радіусу вигину відводу був рівним номінальному діаметру відводу. У відводах із кутом вигину  $90^\circ$  і радіусом вигину, рівним номінальному діаметру відводу, відбуваються найбільші втрати тиску (рисунок 3.6, рисунок 3.7).

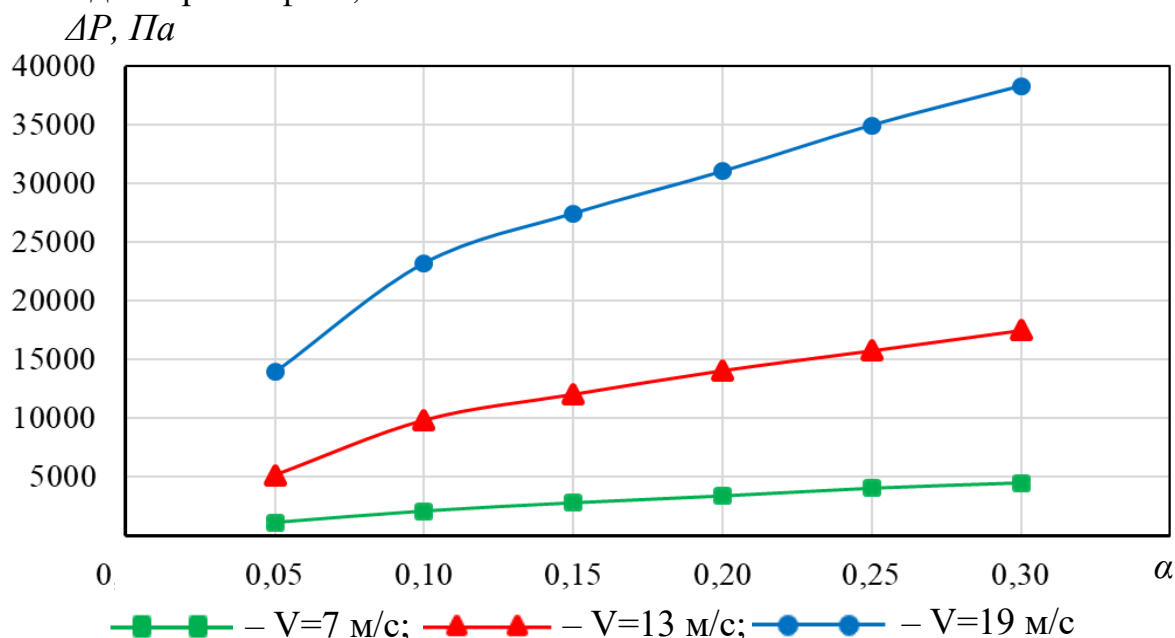
Залежність падіння тиску у відводі  $\Delta P$  від швидкості двофазного потоку на вході у відвід  $V$  (рисунок 3.8) й об'ємної частки дисперсної фази  $\alpha$  (рисунок 3.9) досліджувалась при тиску на виході відводу 5 МПа та діаметрі крапель дисперсної рідкої фази 80 мкм.



**Рисунок 3.8** – Залежність падіння тиску в відводі від швидкості двофазного потоку на вході у відвід для різних об'ємних часток дисперсної фази

Як бачимо, зі збільшенням швидкості двофазного потоку відбувається значне падіння тиску в ньому (рисунок 3.8). Тенденції залишаються незмінними для всіх об'ємних часток дисперсної фази. У зоні малих швидкостей об'ємна частка дисперсної фази має менший вплив, ніж у зоні великих. Таку закономірність можна краще побачити на рисунку 3.9. За малих швидкостей двофазного потоку на вході

у відвід (біля 7 м/с) зі збільшенням об'ємної частки дисперсної фази втрати тиску збільшуються не суттєво. Натомість для великих швидкостей (близько 19 м/с) спостерігається різке збільшення падіння тиску у відводі зі збільшенням об'ємної частки дисперсної фази, особливо в зоні малих значень об'ємної частки.



**Рисунок 3.9** – Залежність падіння тиску в відводі від об'ємної частки дисперсної фази для різних швидкостей двофазного потоку на вході

Залежність падіння тиску у відводі  $\Delta P$  від діаметра дисперсних частинок  $d_d$  досліджувалась при швидкості двофазного потоку на вході у відвід 13 м/с і тиску на виході відводу 5 МПа. У міру збільшення діаметра дисперсних частинок їх вплив на падіння тиску у відводі збільшується за наближеною до лінійної залежністю (рисунок 3.10). Така тенденція зберігається для всіх об'ємних часток дисперсної фази. Тільки в зоні малих діаметрів дисперсних частинок при об'ємній частці дисперсної фази на вході відводу, рівній 0,3, спостерігається стрімке збільшення падіння тиску.

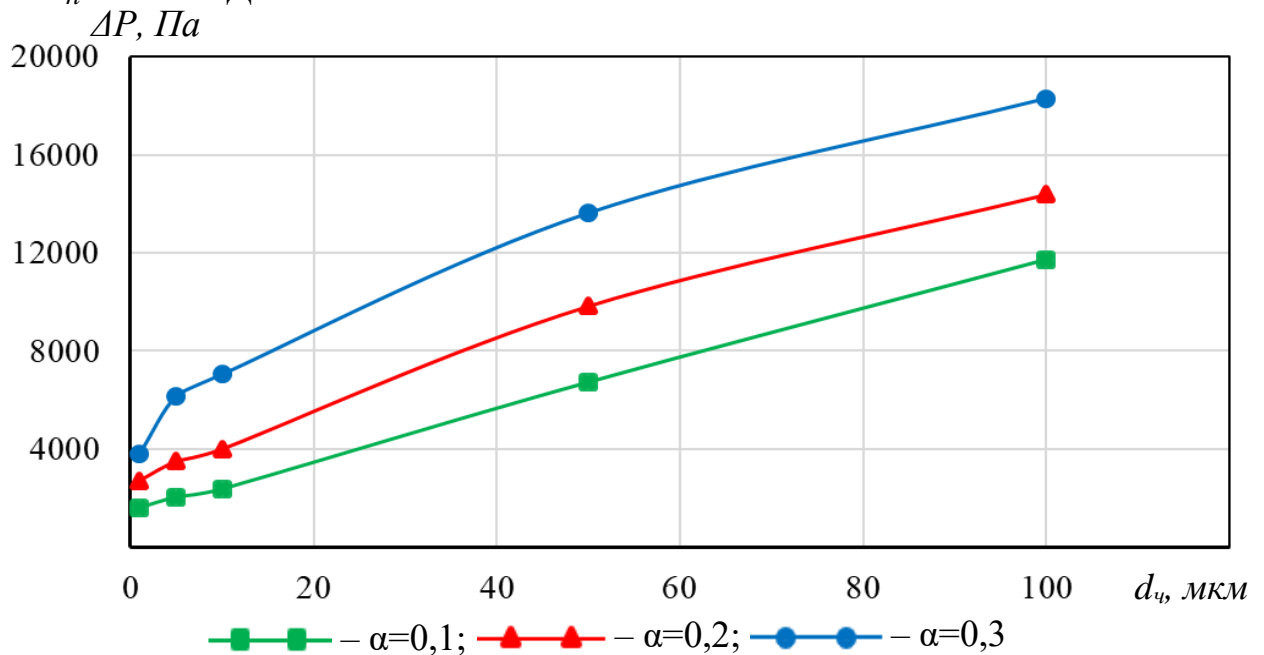
За отриманими результатами виведено емпіричну залежність для розрахунку втрати тиску двофазних потоків у відводах газопроводів, яка враховує їх геометричні параметри, експлуатаційні параметри транспортування та діаметри дисперсних фаз. Втрати тиску двофазних потоків у внутрішній порожнині відводів газопроводів із похибкою в межах  $\pm 5\%$  рівні

$$\Delta P = \frac{K\varphi\rho_2\alpha V^2}{D_n^{0,05}} \sqrt{\frac{d_u}{R_g}}, \quad (3.19)$$

де  $K$  – коефіцієнт, який залежить від геометричної форми фасонного елемента (для відводів  $K = 1,6 \cdot 10^3$ );

$\rho_2$  – густина газу;

$D_n$  – число Діна.



**Рисунок 3.10** – Залежність падіння тиску в відводі від діаметра дисперсних частинок для різних об'ємних часток дисперсної фази

Число Діна є критерієм подібності в газогідродинаміці і враховує кривизну трубопроводу. Воно рівне

$$Dn = \frac{V}{\nu_2} \sqrt{\frac{D_g^3}{2R_g}}, \quad (3.20)$$

де  $D_g$  – внутрішній діаметр відводу;

$\nu_2$  – кінематична в'язкість газу.

У трійниках на втрати гідравлічної енергії, крім геометричної форми та

геометричних параметрів, має значний вплив напрямок руху потоку та співвідношення витрат у відводі і магістралі трійника. Однак практично всі теоретичні й експериментальні дослідження в лабораторних умовах, в основному, стосуються розділення та злиття потоків у трійниках. Такі результати не є повними, оскільки не охоплюють усі можливі комбінації напрямків потоку в трійниках, які зустрічаються в різноманітних газопровідних системах. Для неохоплених комбінацій напрямків потоку не встановлено вплив геометрії трійників на гідравлічні втрати енергії.

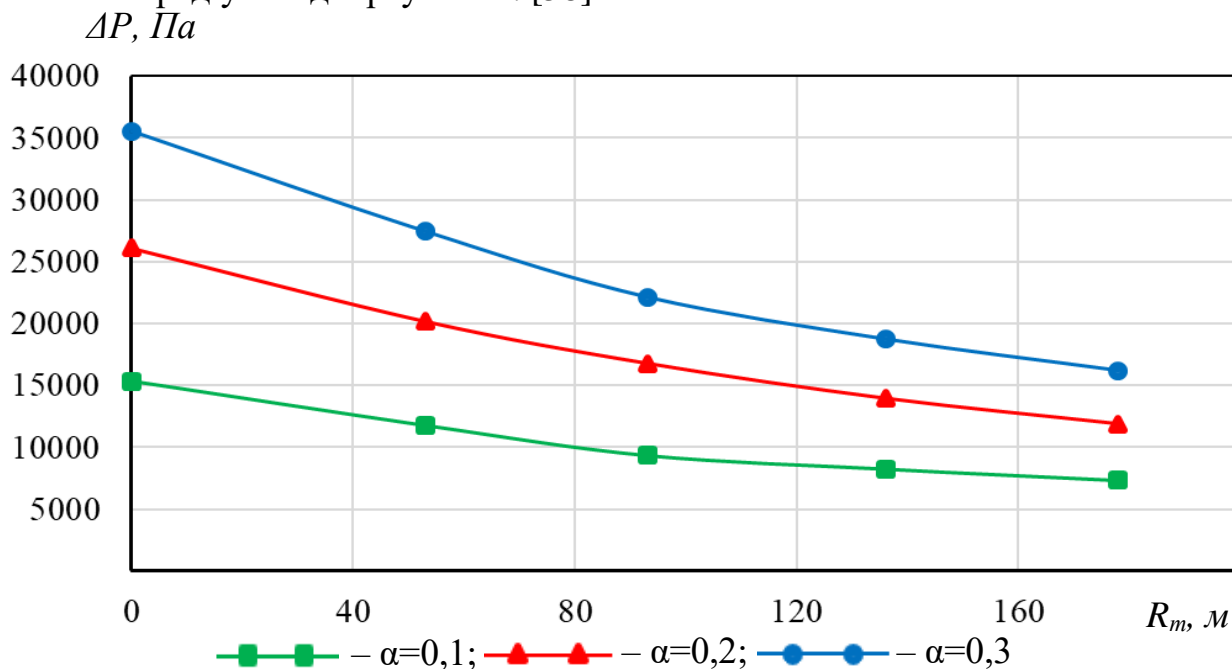
На практиці доволі часто зустрічаються трійники, в яких потік рухається магістраллю, з котрої повністю перетікає у відгалуження трійника. Такі трійники містяться у обв'язках компресорних станцій магістральних газопроводів, підземних сховищ газу, газопереробних заводів, газорозподільних станцій тощо. Крім того, вони є в місці технологічних перемичок між газопроводами, де весь потік з однієї нитки трубопроводу перетікає в іншу; у місцях багатониткових підводних трубопроводів, де весь потік транспортується резервними нитками тощо. Для такої схеми руху потоку трійниками на сьогодні мало інформації про втрати в них енергії не тільки багатозфазних, але і однофазних потоків. Крім того, в результаті повного перетікання газового потоку з магістралі у відгалуження трійника відбувається відривання газового потоку від стінки на початку відгалуження трійника, в результаті чого виникає значне завихрення, рециркуляція потоку, а отже, втрати енергії для такого напрямку руху потоку трійником будуть максимальними.

Для трійників досліджувався вплив радіуса відбортування  $R_m$  на втрати тиску в трійнику для різних об'ємних часток дисперсної фази на вході у відгалуження трійника, а саме: 0,1, 0,2 та 0,3. Трійник рівнопрохідний діаметром 530 мм. Газовий потік рухається магістраллю трійника, з якої повністю перетікає у відгалуження трійника. Швидкість суцільної та дисперсної фази на вході у магістраль трійника задавалась рівною 13 м/с, тиск на виході відгалуження трійника – 5 МПа, діаметр крапель дисперсної рідкої фази – 80 мкм.

При зменшенні радіуса відбортування трійника відбувається значне



збільшення втрат тиску в трійнику (рисунок 3.11). Виявлено, що чим більша об'ємна частка дисперсної фази, тим інтенсивніше збільшуються втрати тиску при зменшенні радіуса відбортування. [58]



**Рисунок 3.11** – Залежність падіння тиску в трійнику від радіуса відбортування трійника для різних об'ємних часток дисперсної фази

За отриманими результатами також виведено емпіричну залежність для розрахунку втрати тиску двофазних потоків із похибкою в межах  $\pm 5\%$  у трійниках рівні

$$\Delta P = K \rho_2 \alpha V^2 \sqrt{\frac{d_u}{R_m}}, \quad (3.21)$$

де  $K$  – коефіцієнт, який залежить від геометричної форми фасонного елемента (для трійників  $K = 5,8 \cdot 10^5$ );

$R_m$  – радіус відбортування трійника.

### **3.3 Дослідження руху багатофазних потоків фасонними елементами трубопроводів**

#### **3.3.1 Математичне моделювання руху багатофазних потоків фасонними елементами трубопроводів**

Щоб повно і всебічно дослідити ерозійне зношування фасонних елементів трубопроводів, необхідно знати місця інтенсивного ударяння рідких і твердих частинок, які переносяться потоком, до стінки трубопроводу, швидкість, діаметри частинок, кути атаки в місці ударяння, геометричну форму фасонних елементів і багато інших чинників. На сьогодні немає чіткого встановлених закономірностей між швидкістю ерозійного зношування стінки елементів трубопроводів складної геометричної форми й умовами процесу. Відомо: чим більша маса та швидкість частинок, тим більша їх кінетична енергія і, відповідно, більша енергія ударяння до стінки та більше ерозійне зношування.

Для дослідження ерозійного зношування фасонних елементів трубопроводів необхідно знати траєкторії руху твердих частинок цими елементами, визначити місця, де відбувається найінтенсивніше їх ударяння до стінки елементів, кути атаки в місці ударяння, характеристики дисперсних фаз у цьому місці.

Грунтовно дослідити траєкторії руху багатофазних потоків фасонними елементами газопроводів можна CFD моделюванням тривимірних турбулентних течій. CFD моделювання виконувалось в комп'ютерному програмному комплексі ANSYS Fluent Academic.

Було вибрано Лагранжевий підхід. В основі Лагранжевого підходу лежить розгляд руху окремих частинок (або груп частинок) дисперсної фази.

Лагранжевий підхід складається з таких моделей:

- DPM (Discrete Phase Model – модель дисперсної фази);
- DEM (Discrete Element Method – модель дисперсного елемента).

Лагранжева модель DPM дає змогу побудувати траєкторії руху частинок дисперсної фази в суцільній фазі розв'язанням диференційного рівняння руху

частинок. Дисперсна фаза може бути як твердою, так і бульбашками в рідині або краплями в газі. Модель враховує двосторонній обмін масою, імпульсом і енергією частинок із суцільною фазою. Модель DPM застосовується для невеликих значень об'ємної концентрації частинок, оскільки взаємодія часток між собою враховується опосередковано. Перевагою моделі DPM є можливість точно враховувати характер взаємодії дисперсної фази зі стінкою. У рамках моделі взаємодії дисперсної фази зі стінкою є додаткова модель ерозії стінки. Крім того, в рамках моделі DPM набагато простіше враховувати вторинний розпад дисперсної фази (якщо це краплі або бульбашки). Недоліком моделі DPM є обмеження на локальну об'ємну концентрацію частинок (менше 10 %).

Лагранжева модель DEM може використовуватись доповненням до моделі DPM для врахування взаємодії частинок дисперсної фази між собою, так і бути самостійною моделлю сипучого середовища. Для кожної частинки розраховується траєкторія руху на основі рівняння балансу сил, що діють на частинку. Ця модель розглядає зіткнення частинок і сили, які виникають при цьому. Реалізація цієї моделі в ANSYS Fluent має багато обмежень і спрощень. Застосовується для дослідження поведінки сипучого середовища в випадках, коли суцільна фаза (рідина або газ) має слабший вплив на потік.

Існують також гібридні моделі, в яких чергуються Лагранжевий і Ейлеревий підхід (усереднення в просторі і перехід від реального розподілу частинок до об'ємної частки). Гібридний Ейлеревий і Лагранжевий підхід в ANSYS Fluent представлений моделлю DDPM (Dense Discrete Phase Model – модель щільної дисперсної фази), побудованої як комбінація моделей Eulerian і DPM. Модель DDPM призначена для моделювання будь-яких течій з відносно невеликою концентрацією частинок, якщо треба враховувати зміну розмірів частинок, утворення вторинних частинок, взаємодію частинок зі стінкою.

Для дослідження зіткнення і тертя частинок між собою та зі стінками труби можна застосувати модель зіткнення дисперсних елементів (DEM collision model).

Усі Ейлереві і Лагранжеві моделі містять велику кількість підмоделей для описання міжфазової взаємодії: моделі силової взаємодії, моделі теплообміну,

моделі масообміну. Набори цих підмоделей для Ейлеревих і Лагранжевих моделей відрізняються. Наприклад, у рамках моделі DPM не можна врахувати складову бічної сили, що залежить від віддалі від стінки (так звану “силу пристінкового змазування”, wall lubrication force). У той же час в рамках Ейлеревих моделей можна врахувати, наприклад, силу термофорезу, що діє на малі частинки за наявності великого градієнта температури в несучій фазі. Для Ейлеревих моделей Mixture і Eulerian існує більше підмоделей міжфазового масообміну (фазових переходів). Підмоделі кипіння, конденсації та випаровування, а також міжфазових хімічних реакцій, включаючи горіння, доступні як для Ейлеревих, так і для Лагранжевих моделей, але сформульовані вони по-різному і призначені для опису різних фізичних явищ. [289]

Для моделювання руху багатофазного потоку фасонними елементами газопроводів була вибрана Лагранжева модель DPM, оскільки вона дозволяє побудувати траєкторії руху частинок дисперсної фази в суцільній фазі, визначити швидкість руху частинок. Це є необхідним для визначення місць інтенсивного ударяння рідких і твердих частинок, які переносяться потоком природного газу, до стінки трубопроводу, кутів атаки в місці ударяння. Ці знання необхідні для детального дослідження ерозійного зношування стінки труб трубопроводів. Крім того, Лагранжева модель DPM дає можливість визначити швидкість дисперсних фаз у фасонних елементах, точно враховує характер взаємодії частинок дисперсної фази зі стінкою. В рамках моделі взаємодії частинок зі стінкою є додаткова модель ерозії стінки, а об'ємна концентрація дисперсної фази в природному газі менше 10 %. [64]

Рух природного газу (суцільної фази) в ANSYS Fluent моделюється шляхом чисельного розв'язування систем рівнянь Нав'є – Стокса (2.1) і неперервності потоку (2.3), замиканням цих рівнянь двопараметричною  $k-\varepsilon$  моделлю турбулентності для відводів (2.4) і (2.5) і  $k-\omega$  моделлю для трійників (2.12) і (2.13).

Речовина, яка присутня в потоці суцільної фази у вигляді дисперсної фази, не утворює суцільне середовище, а окремі частинки взаємодіють з потоком суцільної фази й одна з одною. Для моделювання руху дисперсної фази в суцільній фазі в

ANSYS Fluent застосовується підхід Лагранжа, тобто відстежується рух окремо взятих частинок під дією сил з боку потоку суцільної фази.

Вважають, що частки дисперсної фази є сферами. Сили, які діють на частинку, обумовлені різницею швидкості частинки та швидкості потоку суцільної фази, а також витісненням цієї часткою середовища суцільної фази. Рівняння руху такої частки було виведено в роботі [290] і має вигляд

$$m_q \frac{du_q}{dt} = 3\pi\mu d_q C_{cor} (u - u_q) + \frac{\pi d_q^3 \rho}{6} \frac{du}{dt} + \frac{\pi d_q^3 \rho}{12} \left( \frac{du}{dt} - \frac{du_q}{dt} \right) + F_e - \frac{\pi d_q^3}{6} (\rho_q - \rho) \vec{\omega} \times (\vec{\omega} \times \vec{r}) - \frac{\pi d_q^3 \rho_q}{3} (\vec{\omega} \times \vec{u}_q), \quad (3.20)$$

де  $m_q$  – маса частинки;

$u_q$  – швидкість руху частинки;

$d_q$  – діаметр частинки;

$C_{cor}$  – коефіцієнт в'язкого опору;

$F_e$  – зовнішня сила, яка безпосередньо діє на частинку (наприклад, сила тяжіння або сила електричного поля);

$\vec{\omega}$  – кутова швидкість обертання;

$\vec{r}$  – радіус вектор (при дослідженні руху в відносній системі відліку).

Права частина рівняння (3.20) є сумою всіх сил, які діють на частинку, вираженою через масу та прискорення цієї частинки. Першим доданком у правій частині є гальмування частинки в результаті в'язкого тертя до потоку суцільної фази відповідно до закону Стокса. Другий доданок – сила, прикладена до частинки, зумовлена спричиненим прискоренням потоку суцільної фази перепадом тиску в суцільній фазі, що оточує частинку. Третій доданок – сила, необхідна для прискорення ваги суцільної фази в об'ємі, витісненому частинкою. Ці два доданки треба враховувати, коли густина основної фази перевершує густину частинок. Четвертий доданок ( $F_e$ ) – зовнішня сила, яка безпосередньо діє на частинку.

(наприклад, сила тяжіння або сила електричного поля). Останні два доданки – відцентрова сила і сила Кориоліса, які мають місце тільки при вивченні руху в відносній системі відліку. Крім того, іноді в правій частині (3.20) треба врахувати деякі додаткові сили (наприклад, за наявності в потоці значного перепаду температур).

Рівняння (3.20) є диференціальним рівнянням першого порядку, в якому єдиною невідомою величиною є швидкість частинки  $u_c$ , а аргументом – час  $t$ . Швидкість потоку суцільної фази  $u$  в усіх точках простору вважається відомою і визначається розв'язанням рівнянь (2.1), (2.2), (2.3). Вихідними даними, крім розміру та властивостей частинки, є її положення в початковий момент часу. Вказується також, що саме має відбуватися при вдарянні частинки до стінки або до іншої частинки. Для виконання розрахунку доданки, які містять  $u_c$ , переносяться в ліву частину рівняння (3.20). Швидкість і положення частинки в кожен наступний момент часу визначається шляхом чисельного інтегрування за часом з деяким кроком  $\Delta t$  усіх інших доданків рівняння (3.20).

Алгоритми, реалізовані в ANSYS Fluent, дозволяють моделювати вплив на потік суцільної фази дисперсної фази. У першому наближенні густина і в'язкість речовини суцільної фази та деякі інші величини множаться на  $(1-\alpha_c)$ , де  $\alpha_c$  – питомий об'єм, зайнятий частинками. Тоді на кожному кроці за часом розраховуються зміни імпульсу, маси й енергії частинок і ці зміни додаються, відповідно, в рівняння збереження імпульсу (2.1), маси (2.3) й енергії для потоку суцільної фази. Таким чином, розрахунок потоку суцільної фази та розрахунок руху частинок виконується спільно.

Якщо потік речовини суцільної фази є турбулентним, то траєкторія руху частинок не є детермінованою, оскільки залежить від інтенсивності та напрямку турбулентних пульсацій. У сучасних програмних продуктах реалізовано кілька граничних умов, які відповідають різним подіям, що відбуваються при ударянні частинки до стінки: відбивання в результаті пружного або непружного удару, прилипання до стінки, ковзання вздовж стінки (залежно від фізичних властивостей

і кута атаки), проходження крізь стінку (якщо стінка пориста) тощо. Є також можливість моделювання розщеплення та зливання за певних умов крапель води або бульбашок газу під час їх зіткнення одна з одною. [291]

Для задавання характеристик дисперсної фази в меню Models програмного комплексу ANSYS Fluent вибиралась Лагранжева модель Discret Phase, в якій у вкладці Injection відкривалось вікно Set injection properties, де для кожної дисперсної фази (спочатку для рідкої, а тоді для твердої) вибиралась поверхня подавання частинок (вхід потоку), задавалась швидкість частинок на вході, температура частинок на вході, масова витрата частинок, максимальний і мінімальний діаметр діапазону діаметрів частинок.

Швидкість і температура частинок дисперсної фази на вході в фасонний елемент приймалась рівною швидкості та температурі суцільної фази на вході. Швидкість суцільної фази на вході в фасонний елемент визначалась розрахунком динаміки руху газу фасонними елементами в ANSYS Fluent без урахування наявності в потоці дисперсної фази (підрозділ 2.2). Температура суцільної фази відповідає умовам експлуатації магістральних газопроводів. Вологовміст природних газів залежить від тиску та температури газу, і він визначався за номограмою, наведеною в [292, рисунок 7]. За значенням вологовмісту природного газу й об'ємної витрати суцільної фази розраховувалась масова витрата рідкої фази.

Згідно [293] маса механічних домішок, які знаходяться в природному газі, не повинна перевищувати  $0,001 \text{ г/м}^3$ . Згідно [294] природний газ, який подається в газорозподільні пункти містить значно більше механічних домішок, ніж  $0,001 \text{ г/м}^3$ . У [287, таблиця 2] зазначено, що маса механічних домішок в природному газі може бути до  $0,003 \text{ г/м}^3$ . Маса механічних домішок у природному газі приймалась рівною  $0,003 \text{ г/м}^3$ . За значенням маси механічних домішок у природному газі та об'ємної витрати суцільної фази розраховувалась масова витрата твердої фази.

Максимальний діаметр крапель рідкої фази визначався за (3.17). Максимальний діаметр частинок твердої фази приймався рівним розміру зерен піску, визначеного під час аналізу проб, відібраних із внутрішньої порожнини газопроводів і приймався рівним  $0,12 \text{ мм}$ .

Щоб врахувати вплив на дисперсну фазу турбулентних завихрень потоку, в вкладці Turbulent Dispersion вікна Set injection properties вибиралась опція Discrete Random Walk Model. У меню Materials для кожної дисперсної фази з бази даних матеріалів ANSYS Fluent вибирався відповідний матеріал. Оскільки з забруднень, які містяться в транспортованому магістральними газопроводами природному газі, переважають конденсат, вода та пісок, то для рідкої фази вибирався конденсат густиною  $\rho_{\text{конд}}=960 \text{ кг/м}^3$ , густина якого приблизно рівна густині води, а для твердих частинок пісок густиною  $\rho_{\text{пісок}}=2800 \text{ кг/м}^3$ .

Також задавалась гранична умова стінка (Wall) із задаванням коефіцієнта еквівалентної шорсткості труб 0,03 мм. У вкладці DPM граничної умови стінка вибирався тип граничної умови для дисперсної фази Reflect – відбивання частинки дисперсної фази від стінки (кут падіння рівний куту відбивання).

Для моделювання руху багатофазного потоку фасонними елементами газопроводів в ANSYS Fluent була використана та ж геометрія фасонних елементів, що і для моделювання руху однофазного газового потоку (підрозділ 2.2), задавались ті ж граничні умови для суцільної фази на вході та виході потоку в розрахункову геометрію, налаштовувались ті ж параметри вирішувача.

У вікнах Set injection properties моделі Discret Phase задавались характеристики кожної дисперсної фази на вході (рисунок 3.15, а). Згідно з номограмою, наведеною в [125, рисунок 7], для тиску суцільної фази 4,9 МПа і температури 297 К вологовміст природного газу складає  $0,6 \text{ г/м}^3$ . За вологовмістом природного газу й об'ємною витратою суцільної фази знаходилась масова витрата рідкої фази, яка склала  $M_{\text{конд}}=0,58 \text{ кг/с}$ . Маса механічних домішок у природному газі на вході компресорної станції до системи очищення приймалась рівною  $0,003 \text{ г/м}^3$ . За масою механічних домішок у природному газі було визначено масову витрату твердої фази, яка склала  $M_{\text{пісок}} = 2,1 \cdot 10^{-3} \text{ кг/с}$ .

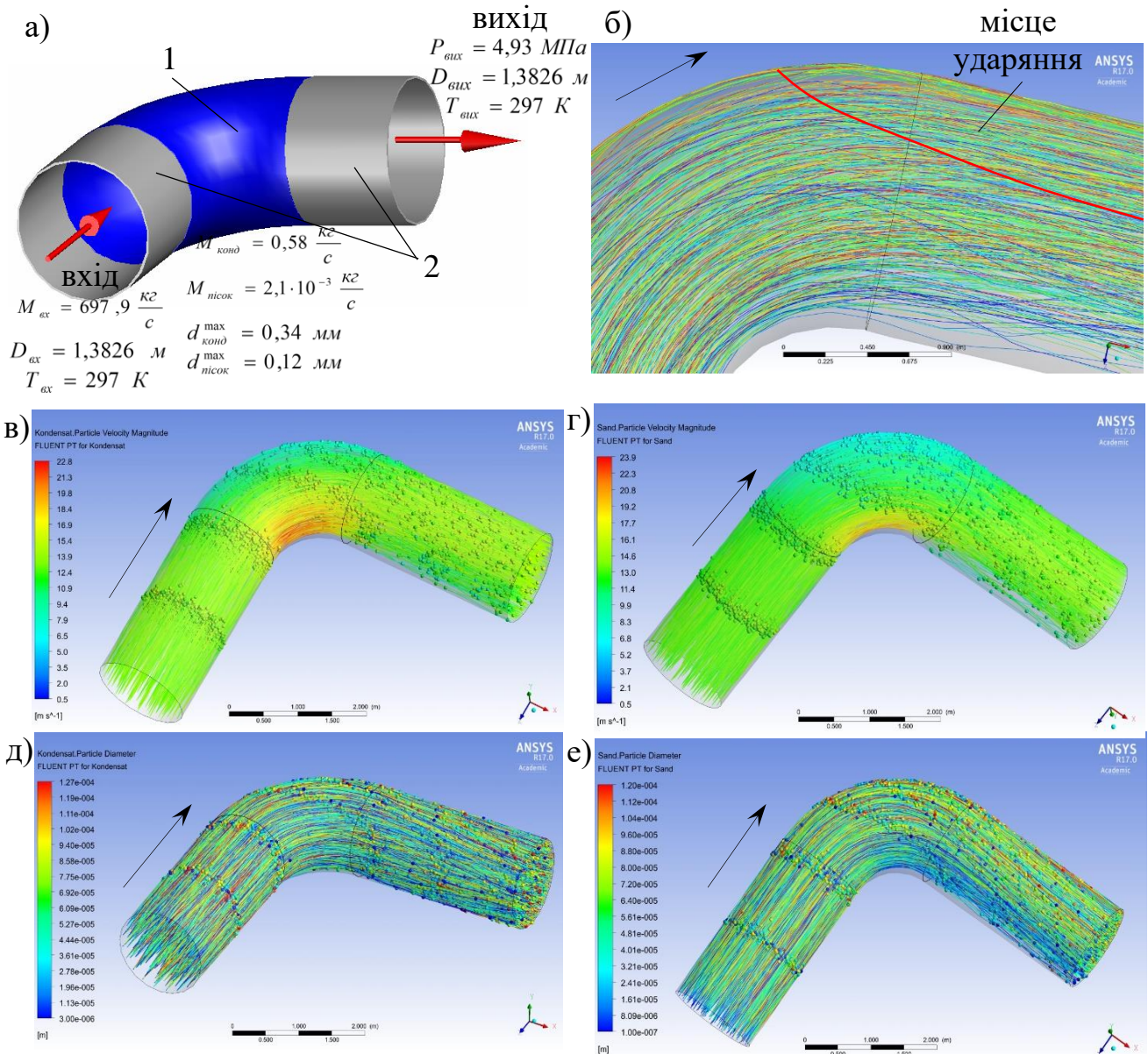


### 3.3.2 Дослідження траєкторій руху дисперсних частинок фасонними елементами трубопроводів

Результати моделювання були візуалізовані в постпроцесорах ANSYS Fluent, ANSYS CFD, що дало змогу дослідити та зібрати вичерпні дані про рух крапель конденсату і твердих частинок фасонними елементами лінійної частини магістрального газопроводу. Було візуалізовано розраховані траєкторії руху крапель конденсату та твердих частинок у потоці природного газу, які забарвлювались в кольори, що відповідають швидкості та діаметру крапель і частинок відповідно до шкали значень.

Розглянемо відвід з кутом вигину  $90^\circ$ . У препроцесорі ANSYS Fluent задавались граничні умови та характеристики кожної дисперсної фази, наведені на рисунку 3.12, а.

Як видно з рисунку 3.12, під час руху газового потоку з дисперсними фазами відводом із кутом вигину  $90^\circ$  він змінює свій напрям, у результаті чого утворюється складна картина руху. Дослідивши траєкторії руху дисперсних фаз у відводі, встановлено, що в місці повороту відводу з опуклого боку більша частина крапель конденсату та твердих частинок (до 60 %) рухаються потоком суцільної фази з наближенням до стінки в місці повороту без ударяння до неї. Менша частина крапель конденсату та твердих частинок в місці повороту відводу рухається траєкторією, радіус якої більший радіуса вигину відводу, в результаті чого відбувається ударяння крапель конденсату та твердих частинок до стінки відводу та привареної до нього з правого боку труби (рисунок 3.12, б). Найінтенсивніше ударяння відбувається в місці закінчення відводу з опуклого його боку і на початку привареної до відводу труби. При цьому чим далі від повороту відводу, тим кут атаки є меншим. Так, у кінці відводу він біля  $40^\circ$ , а вздовж привареної до відводу труби він поступово зменшується. Швидкість крапель конденсату в місці ударяння, де закінчується відвід, складає біля 8,5 м/с, а на початку привареної до відводу труби досягає 14 м/с (рисунок 3.12, в). Такою ж в цих місцях є швидкість твердих частинок (рисунок 3.12, г).



1 – відвід 90° 1420×24; 2 – труба 1420×18,7; а) – розрахункова схема;  
 б) – траєкторії руху дисперсної фази; в) – траєкторії руху крапель конденсату, забарвлені в кольори, що відповідають швидкості; г) – траєкторії руху твердих частинок, забарвлені в кольори, що відповідають швидкості частинок;  
 д) – траєкторії руху крапель конденсату, забарвлені в кольори, що відповідають діаметру крапель; е) – траєкторії руху твердих частинок, забарвлені в кольори, що відповідають діаметру частинок

**Рисунок 3.12** – Результати моделювання руху дисперсної фази відводом трубопроводу з кутом вигину 90°

У відводі відбувається перебудова профілю швидкостей як суцільної, так і дисперсної фази в повздовжніх і в поперечних перерізах (рисунок 3.12, в, г). Уздовж вгнутого боку дисперсні фази пришвидшуються до 22 м/с, а вздовж опуклого – вповільнюються до 7 м/с. Протилежна картина спостерігається на виході з відводу – вздовж ввігнутого боку дисперсна фаза вповільнюється до 6 м/с, а вздовж опуклого – пришвидшується до 14 м/с (рисунок 3.12, в, г). На початку повороту з вгнутого боку відводу відбувається відривання дисперсної фази від стінки труби зі збільшенням віддалі між траєкторіями руху дисперсної фази та стінкою труби до 0,1 м. На виході з відводу відбувається незначне завихрення газового потоку з наявними в ньому дисперсними фазами з наближенням траєкторій руху дисперсної фази до стінки труби.

Також у відводі відбувається нерівномірний перерозподіл дисперсних фаз за діаметром (рисунок 3.12, д, е). Більша частина крапель конденсату та твердих частинок, які мають більші діаметри рухаються з опуклого боку відводу, і частина з них ударяється в стінку відводу та привареної до відводу труби, що призводить до ерозійного зношування. Більша частина дисперсної фази меншого діаметра рухаються з ввігнутого боку відводу. Розрахований за (3.17) максимальний діаметр крапель конденсату був скорегований і склав  $d_{\text{конд}}^{\text{max}} = 0,127$  мм (рисунок 3.12, д).

Розглянемо відвід із кутом вигину  $60^\circ$ . У препроцесорі ANSYS Fluent задавались граничні умови та характеристики кожної дисперсної фази, які наведені на рисунку 3.13, а.

Як видно з рисунку 3.13, під час руху газового потоку з дисперсними фазами відводом з кутом вигину  $60^\circ$  він змінює свій напрям, у результаті чого утворюється складна картина руху. Дослідивши траєкторії руху дисперсних фаз у відводі, встановлено, що в місці вигину відводу з опуклого боку більша частина крапель конденсату і твердих частинок (до 70 %) рухаються з незначним наближенням до стінки в місці повороту без ударяння до неї. Менша частина крапель конденсату та твердих частинок у місці вигину відводу рухається траєкторією, радіус якої більший за радіус відводу. В результаті відбувається вдаряння крапель конденсату

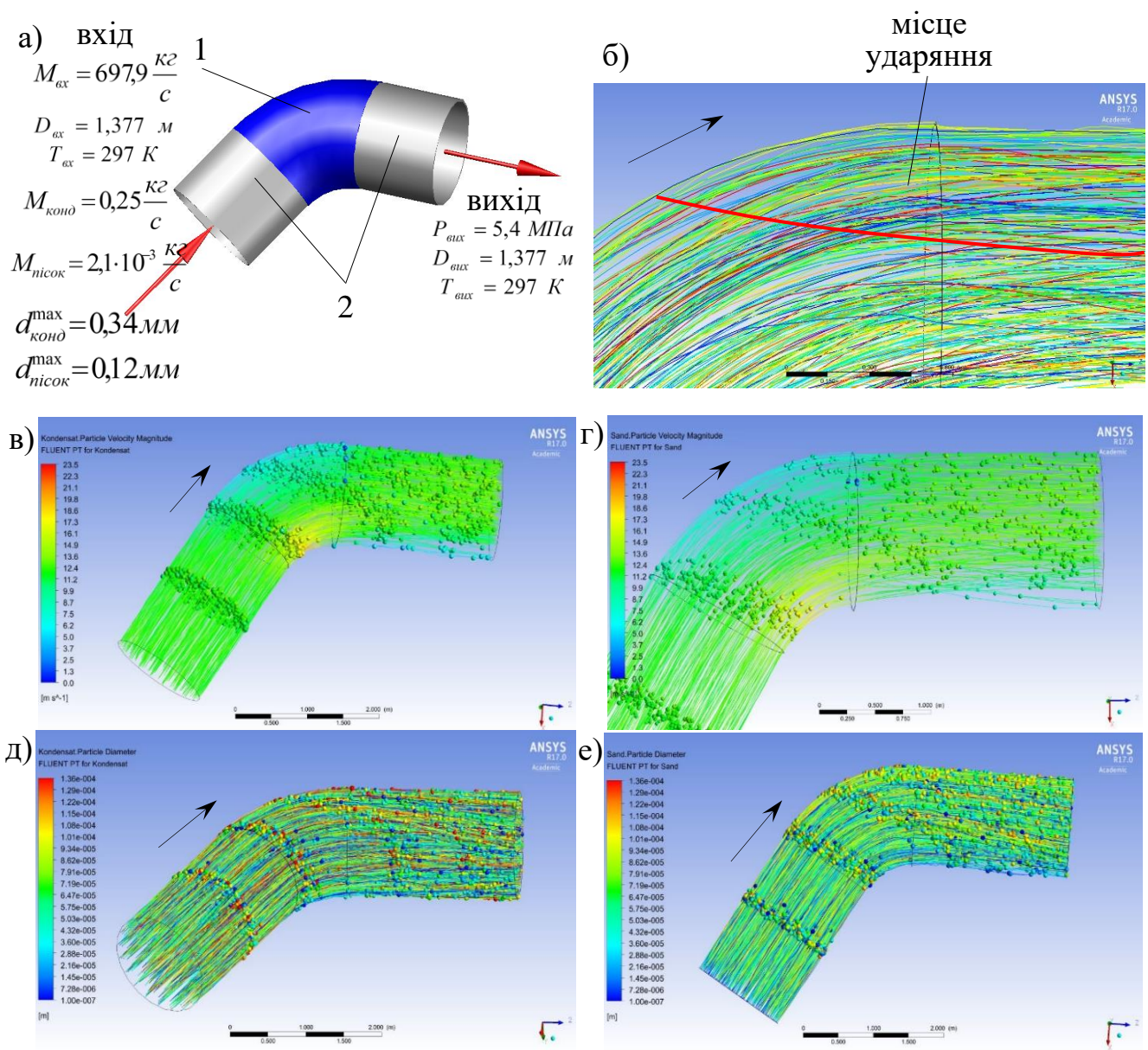
і твердих частинок до стінки відводу та привареної до нього з правого боку труби (рисунок 3.13, б). Найінтенсивніше ударяння відбувається в місці закінчення відводу з опуклого його боку та на початку привареної до відводу труби. При цьому, чим далі від повороту відводу, тим кут атаки є меншим. Так, у кінці відводу він біля  $25^\circ$ , а вздовж привареної до відводу труби він поступово зменшується. Швидкість крапель конденсату в місці ударяння, де закінчується відвід, складає біля 6,2 м/с, а на початку привареної до відводу труби – досягає 11,5 м/с (рисунок 3.13, в). Такою ж у цих місцях є швидкість твердих частинок (рисунок 3.13, г).

У відводі відбувається перебудова профілю швидкостей як суцільної, так і дисперсної фази в повздовжніх і в поперечних перерізах (рисунок 3.13, в, г). Уздовж ввігнутого боку дисперсні фази пришвидшуються до 23 м/с, а вздовж опуклого – вповільнюються до 5 м/с. Протилежна картина спостерігається на виході з відводу – вздовж вгнутого боку дисперсна фаза вповільнюється до 3 м/с, а вздовж опуклого – пришвидшується до 11,5 м/с (рисунок 3.13, в, г). На початку повороту з вгнутого боку відводу відбувається відривання дисперсної фази від стінки труби зі збільшенням віддалі між траєкторіями руху дисперсної фази та стінкою труби до 0,08 м. На виході з відводу відбувається незначне завихрення газового потоку з наявними в ньому дисперсними фазами з наближенням траєкторій руху дисперсної фази до стінки труби.

Також у відводі відбувається нерівномірний перерозподіл дисперсних фаз за діаметром (рисунок 3.13, д, е). Більша частина крапель конденсату та твердих частинок, які мають більші діаметри, рухаються з опуклого боку відводу, і частина з них ударяється в стінку відводу та привареної до відводу труби та призводить до ерозійного зношування. Дисперсні фази меншого діаметра рухаються з ввігнутого боку відводу. [56]

Розглянемо зварний трійник, в якому потік із магістралі повністю перетікає у відгалуження трійника. Граничні умови та характеристики кожної дисперсної фази наведені на рисунку 3.14, а.

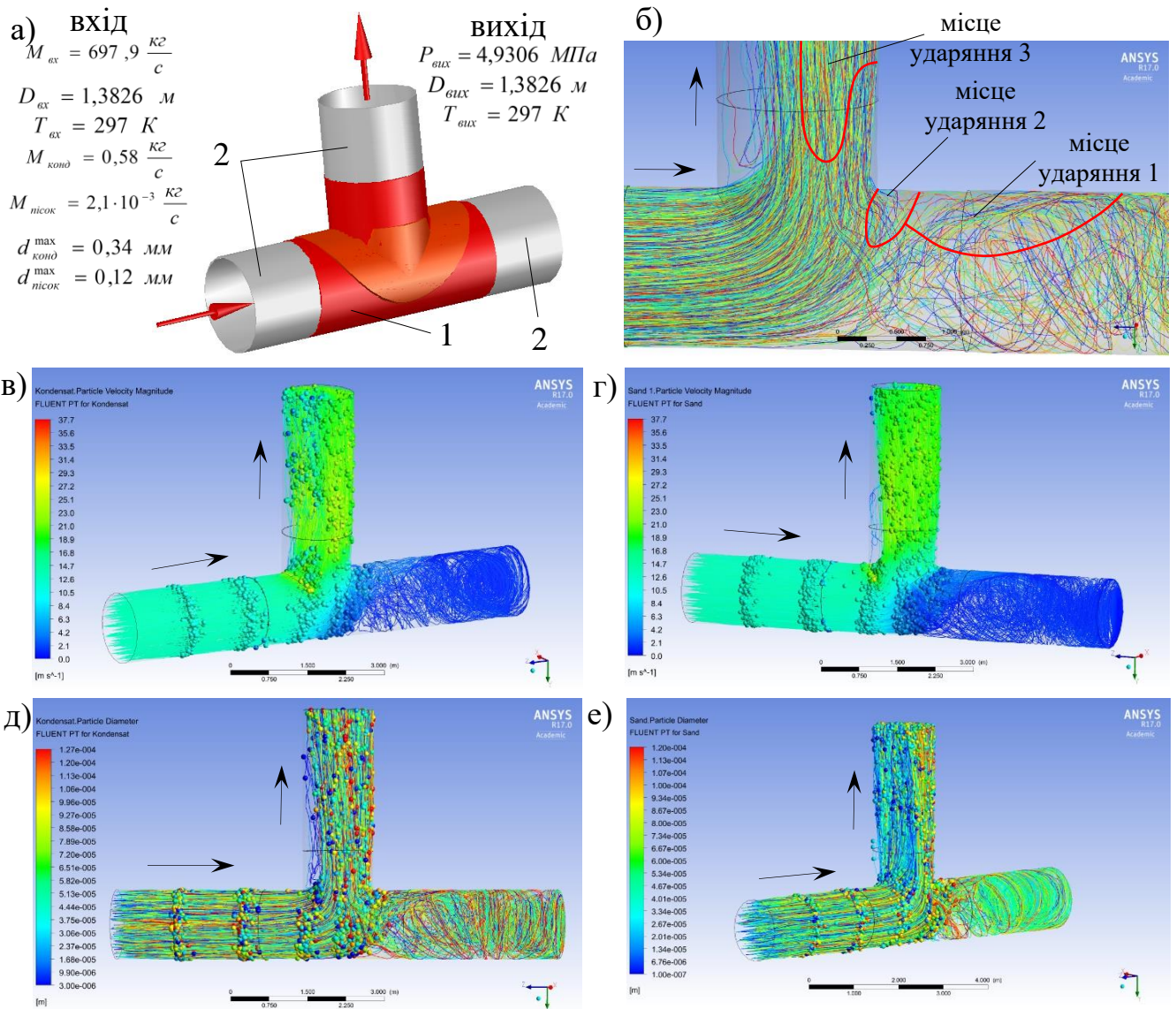
Під час проходження рівнопрохідним трійником газовий потік із дисперсними фазами змінює свій напрям і перетікає з магістралі у відгалуження



1 – відвід 60° 1420×28; 2 – труба 1420×21,5; а) – розрахункова схема; б) – траєкторії руху дисперсної фази; в) – траєкторії руху крапель конденсату, забарвлені в кольори, що відповідають швидкості; г) – траєкторії руху твердих частинок, забарвлені в кольори, що відповідають швидкості частинок; д) – траєкторії руху крапель конденсату, забарвлені в кольори, що відповідають діаметру крапель; е) – траєкторії руху твердих частинок, забарвлені в кольори, що відповідають діаметру частинок

**Рисунок 3.13** – Результати моделювання руху дисперсної фази відводом газопроводу з кутом вигину 60°

трійника, в результаті чого спостерігається складна картина руху (рисунок 3.14). Дослідивши траєкторії руху дисперсних фаз у магістралі рівнопрохідного трійника, встановлено, що в місці зміни напрямку руху газового потоку дугоподібні траєкторії незначної частини дисперсних фаз, яка рухалась біля нижньої твірної магістралі трійника, виходять за межі проекції (уявного продовження) відгалуження трійника в внутрішню порожнину його магістралі, що зумовлено силами інерції (рисунок 3.14, б). Коли рідкі і тверді частинки, які рухаються цими траєкторіями, наближаються до осі магістралі трійника, частина з них, яка рухалась найближче до нижньої твірної магістралі трійника, рухається в напрямі верхньої твірної магістралі трійника дугоподібними траєкторіями, вигнутими в праву сторону від відгалуження трійника, й ударяється в стінку магістралі трійника (на віддалі більше 0,4 м від відгалуження трійника) в стінку прилеглої до магістралі трійника з правої його сторони труби (рисунок 3.14, б, місце ударяння 1). На віддалі 0,4 м від відгалуження трійника кут атаки складає біля  $50^\circ$ , і далі, вправо від відгалуження, він поступово зменшується. Швидкість крапель конденсату в місці ударяння 1 складає біля 4 м/с (рисунок 3.14, в). Такою ж в цьому місці є швидкість твердих частинок (рисунок 3.14, г). Після ударяння в стінку магістралі трійника ця дисперсна фаза в прилеглій до магістралі трійника з правої сторони трубі закручується і повертається назад в основний потік, рухаючись поблизу бічної поверхні магістралі трійника (рисунок 3.14, б). Інша частина дисперсної фази, яка рухалась далі від нижньої твірної магістралі трійника і дугоподібні траєкторії якої виходять за межі проекції відгалуження трійника в внутрішню порожнину його магістралі, рухається до верхньої частини магістралі трійника і поблизу стінки траєкторії руху рідких і твердих частинок різко заокруглюється в напрямку відгалуження трійника (основного потоку). При цьому відбувається вдаряння рідких і твердих частинок у стінку магістралі трійника. Місцем ударяння є внутрішня поверхня магістралі трійника, віддалена від відгалуження трійника вправо не більше, ніж на 0,25 м (рисунок 3.14, б, місце ударяння 2). У результаті того, що біля стінки верхньої частини магістралі трійника траєкторії руху рідких і твердих частинок різко заокруглюються в сторону відгалуження трійника, кут



1 – трійник зварний рівнопрохідний з підсилюючими накладками 1420×28 – 1420×28; 2 – труба 1420×18,7; а) – розрахункова схема; б) – траєкторії руху дисперсних фаз; в) – траєкторії руху крапель конденсату, забарвлені в кольори, що відповідають швидкості; г) – траєкторії руху твердих частинок, забарвлені в кольори, що відповідають швидкості частинок; д) – траєкторії руху крапель конденсату, забарвлені в кольори, що відповідають діаметру крапель; е) – траєкторії руху твердих частинок, забарвлені в кольори, що відповідають діаметру частинок

**Рисунок 3.14** – Результати моделювання руху дисперсних фаз рівнопрохідним трійником, в якому газовий потік з магістралі повністю перетікає в відгалуження трійника

атаки в цьому місці (рисунок 3.14, б, місце ударяння 2) складає біля  $30^\circ$ . Швидкість крапель конденсату та твердих частинок в місці ударяння 2 складає від 5 м/с до 16 м/с (у міру наближення до відгалуження збільшується) (рисунок 3.14, в, г). Після ударяння дисперсна фаза в потоці суцільної фази рухається в сторону відгалуження, де перетікає у відгалуження. У результаті цього відбувається відривання потоку від стінки трубопроводу на початку відгалуження справа та відтіснення основного потоку вліво в цьому місці. Дослідивши траєкторії руху дисперсних фаз у відгалуженні рівнопрохідного трійника, виявлено, що у відгалуженні ударяння дисперсної фази відбувається з правого його боку (рисунок 3.14, б, місце ударяння 3). Причому вздовж твірної відгалуження трійника, розміщеної з правого його боку вдаряння дисперсних фаз відбувається до стінки, привареної до відгалуження трійника труби на віддалі більше 0,5 м від зварного шва, а не в стінку відгалуження трійника (рисунок 3.14, б, місце ударяння 3). Справа і зліва від твірної відгалуження трійника, розміщеної з правого його боку місце ударяння дисперсних фаз витягнуто в сторону магістралі трійника аж до середини відгалуження. Причиною цього є відтіснення основного потоку в відгалуженні потоком, дугоподібні траєкторії дисперсної фази в якому виходять за межі проекції відгалуження трійника в внутрішню порожнину його магістралі. Причому максимальне відтіснення відбувається біля твірної відгалуження трійника, розміщеної з правого його боку. Тому місце вдаряння 3 має форму, наведену на рисунку 3.14, б. Кут атаки в місці ударяння дисперсної фази до стінки відгалуження трійника та привареної до відгалуження труби не перевищує  $30^\circ$ . Причому, чим далі від магістралі трійника і чим менше відтіснення основного потоку, тим кут атаки є меншим.

Швидкість крапель конденсату та твердих частинок в місці ударяння 3 складає біля 21 м/с (рисунок 3.14, в). Такою ж в цьому місці є швидкість твердих частинок (рисунок 3.14, г). Біля протилежної стінки відгалуження трійника та привареної до нього труби відбувається завихрення газового потоку з наявними в ньому дисперсними фазами (рисунок 3.14, в, г). Швидкість частинок у місці завихрення складає від 1 м/с до 10 м/с (рисунок 3.14, в, г).

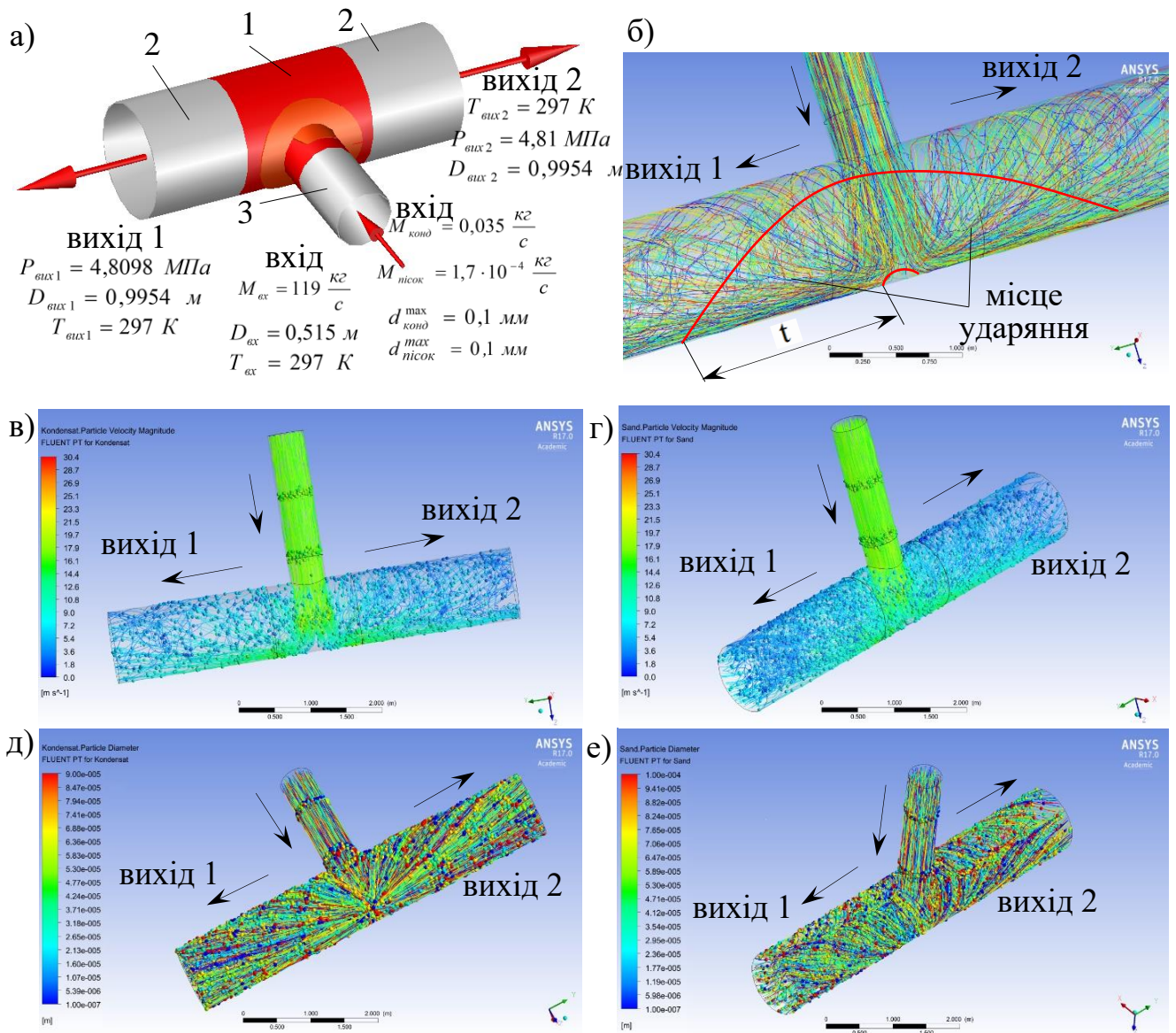


Із візуалізованих результатів моделювання руху крапель конденсату та твердих частинок різних діаметрів видно, що у відгалуженні рівнопрохідного трійника відбувається нерівномірний перерозподіл дисперсних фаз за діаметром (рисунок 3.14, д, е). Більша частина крапель конденсату і твердих частинок, які мають більші діаметри, у відгалуженні трійника рухаються з правого його боку, і частина з них ударяється в стінку, привареної до відгалуження трійника труби, що призводить до її ерозійного зношування. Дисперсні фази меншого діаметра рухаються з протилежної сторони потоку, та більша їх частина міститься в завихреному потоці газу в відгалуженні рівнопрохідного трійника. З шкали значень можна помітити, що розрахований за (3.17) максимальний діаметр крапель конденсату, який задавався у вікні Set injection properties програмним комплексом ANSYS Fluent, скорегований і склав  $d_{\text{конд}}^{\text{max}} = 0,127$  мм (рисунок 3.14, д).

Розглянемо трійник, в якому газовий потік із відгалуження трійника перетікає в дві сторони магістралі трійника. Граничні умови та характеристики кожної дисперсної фази наведені на рисунку 3.15, а.

Як видно з рисунку 3.15, під час руху газового потоку з дисперсними фазами трійником 1 (рисунок 3.15) відбувається його роздвоєння та перетікання в дві протилежні сторони магістралі трійника, в результаті чого утворюється складна картина руху.

З відгалуження трійника газовий потік із дисперсними фазами перетікає в магістраль трійника, причому до входу в відгалуження трійника (у прилеглий до нього трубі) газовий потік із рідкими і твердими частинками починає прискорюватись. Таке прискорення газового потоку та дисперсних фаз продовжується до повздовжньої осі магістралі трійника, де швидкість окремих крапель конденсату і твердих частинок досягає 20 м/с (рисунок 3.15, в, г). Причому до повздовжньої осі магістралі трійника діаметр газового потоку з дисперсними фазами, який перетікає у магістраль із відгалуження трійника, дорівнює внутрішньому діаметру відгалуження трійника. Починаючи з осі магістралі трійника, газовий потік з дисперсними фазами, який перетік із відгалуження трійника, починає сповільнюватись. І на віддалі 0,2–0,3 м від стінки магістралі



1 – трійник зварний з підсилюючими накладками 1020×18 – 529×10; 2 – труба 1020×12,3; 3 – труба 529×7; а) – розрахункова схема; б) – траєкторії руху дисперсної фази; в) – траєкторії руху крапель конденсату, забарвлені в кольори, що відповідають швидкості; г) – траєкторії руху твердих частинок, забарвлені в кольори, що відповідають швидкості частинок; д) – траєкторії руху крапель конденсату, забарвлені в кольори, що відповідають діаметру крапель; е) – траєкторії руху твердих частинок, забарвлені в кольори, що відповідають діаметру частинок

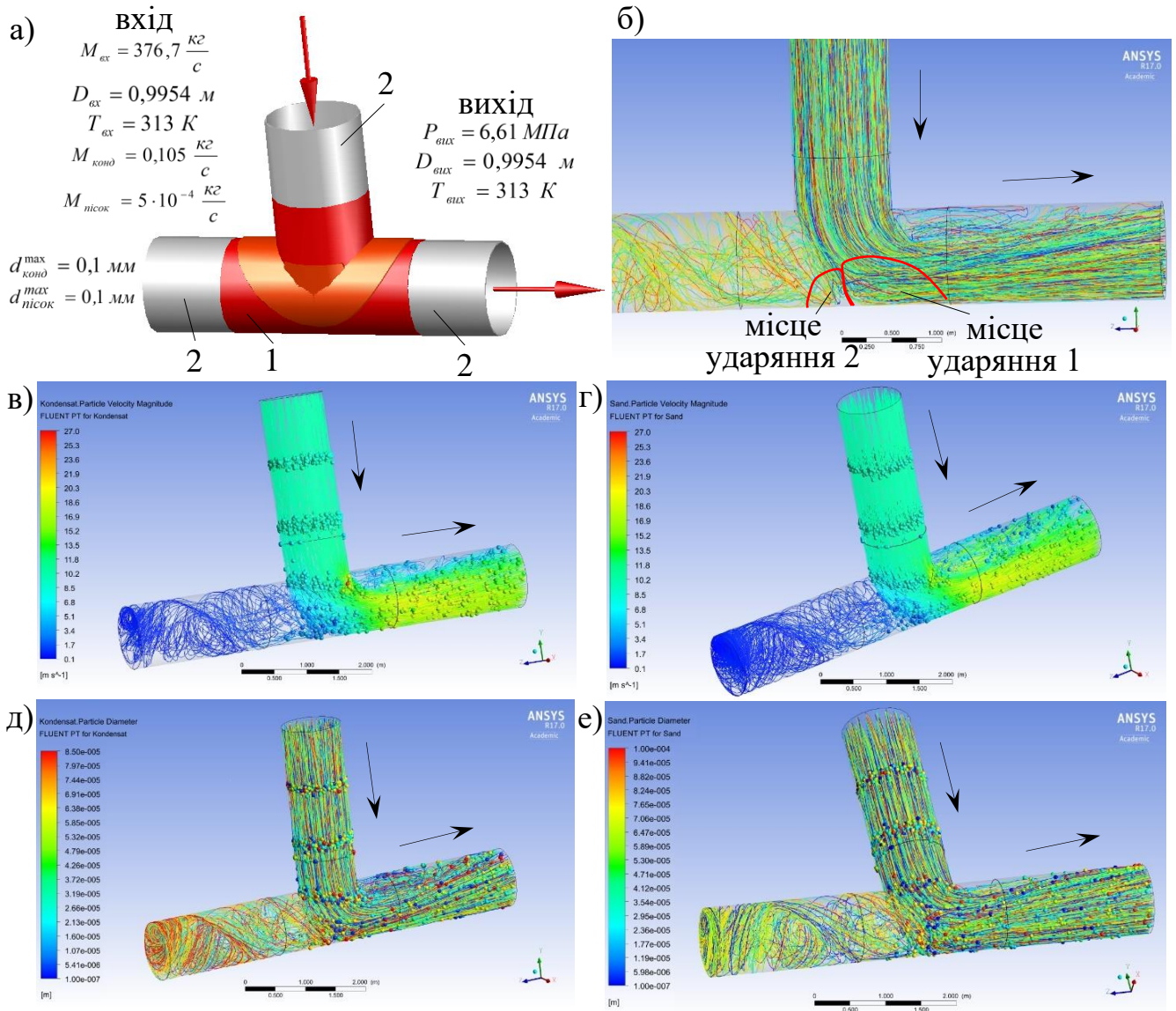
**Рисунок 3.15** – Результати моделювання руху дисперсної фази трійником, в якому газовий потік із відгалуження трійника перетікає у дві сторони його магістралі

трійника, навпроти відгалуження, газовий потік і рідкі та тверді частинки в магістралі трійника розходяться в різні сторони на кут  $360^\circ$ , в результаті чого їх швидкість знижується до 10 м/с (рисунок 3.15, в, г). За місцем розходження газового потоку біля стінки магістралі трійника навпроти відгалуження швидкість рідких і твердих частинок знижується до 1 м/с (виникає своєрідний “застійне склепіння”) (рисунок 3.15, в, г). Газовий потік із дисперсними фазами, який розійшовся в різні сторони в магістралі трійника поверхнею “застійного склепіння”, рухається до стінок магістралі трійника, де відбувається ударяння рідких і твердих частинок у стінку магістралі трійника (рисунок 3.15, б). Місце ударяння має форму викривленого внутрішнього поверхнею магістралі трійника кільця, шириною  $t=1,5$  м, навколо “застійного склепіння” (рисунок 3.15, б). Максимальний кут атаки в місці ударяння спостерігається біля внутрішнього кола кільця, і він складає біля  $50^\circ$ . У міру віддалення від внутрішнього кола і наближення до зовнішнього кола кільця, кут атаки зменшується (рисунок 3.15, б). Так, у середній частині кільця кут атаки складає біля  $20^\circ$ . Швидкість крапель конденсату та твердих частинок у місці ударяння біля внутрішнього кола кільця (“застійного склепіння”) є мінімальною і складає 2 м/с, у середній частині кільця збільшується до 16,5 м/с і поблизу зовнішнього кола кільця складає 10 м/с (рисунок 3.15, в, г). Досліджуючи траєкторії руху дисперсної фази в суцільній, було помічено, що газовий потік з рідкими і твердими частинками від основи “застійного склепіння” рухається в усіх напрямках уздовж стінок магістралі трійника (на кут  $360^\circ$ ) (рисунок 3.15, б). Таким чином, фактично весь газовий потік із дисперсними фазами в магістралі трійника вздовж стінки по обидві сторони від відгалуження трійника (площиною симетрії є площина повздовжнього перерізу трійника) рухається в сторону відгалуження під різними кутами (за винятком незначної частинки потоку, яка рухається в різні сторони від відгалуження трійника вздовж твірної магістралі трійника, розміщеної навпроти відгалуження) (рисунок 3.15, е). Наблизившись до твірної магістралі трійника, розміщеної з сторони відгалуження, газовий потік із дисперсними фазами, який рухався у сторону відгалуження з однієї сторони відгалуження (площиною симетрії є площина повздовжнього перерізу

магістралі і відгалуження трійника), зустрічається з газовим потоком з дисперсними фазами, який рухався з другої сторони відгалуження, в результаті цього відбувається закручування газового потоку з рідкими і твердими частинками, і він розділяється на два закручені потоки з дисперсними фазами, які рухаються на вихід із магістралі трійника. Аналогічне розділення та закручування потоку газу відбувається і в протилежному напрямку магістралі трійника. Фактично, в одному поперечному перерізі магістралі трійника і труби, привареної до нього, є два закручені потоки, які займають половину площі поперечного перерізу кожен (рисунок 3.15, е). Швидкість рідких і твердих частинок у закрученому потоці значно знижується – до 1–5 м/с (рисунок 3.15, в, г).

Досліджуючи траєкторії руху крапель конденсату і твердих частинок, забарвлених в кольори, що відповідають їх діаметрам, встановлено, що в трійнику, де газовий потік із відгалуження перетікає в дві сторони магістралі, відбувається рівномірний розподіл крапель конденсату і твердих частинок різного діаметра по всій його внутрішній порожнині (рисунок 3.15, д, е). Розрахований за (3.17) максимальний діаметр крапель конденсату програмним комплексом ANSYS Fluent був скорегований і склав  $d_{\text{конд}}^{\text{max}} = 0,09$  мм (рисунок 3.15, д).

Розглянемо трійник, у якому газовий потік рухається відгалуженням трійника і з відгалуження увесь спрямовується в одну сторону магістралі трійника. Граничні умови та характеристики кожної дисперсної фази наведені на рисунку 3.16, а. Потік у трійнику змінює свій напрям і перетікає з відгалуження у праву сторону магістралі трійника, в результаті чого утворюється складна картина руху (рисунок 3.16). Дослідивши траєкторії руху дисперсних фаз у рівнопрохідному трійнику, встановлено, що в місці зміни напрямку потоку в магістралі трійника навпроти відгалуження, рідкі та тверді частинки рухаються дугоподібними траєкторіями і перетікають у праву сторону магістралі трійника. При цьому потік газу з рідкими та твердими частинками, який перетікає в праву сторону магістралі трійника, в магістралі і в привареній до неї трубі рухається, в основному, вздовж стінки навпроти відгалуження. Відбувається ударяння незначної частини дисперсної фази до стінки магістралі трійника. Місцем ударяння є стінка магістралі



1 – трійник зварний рівнопрохідний із підсилюючими накладками 1020×20 – 1020×20; 2 – труба 1020×12,3; а) – розрахункова схема; б) – траєкторії руху дисперсної фази; в) – траєкторії руху крапель конденсату, забарвлені в кольори, що відповідають швидкості; г) – траєкторії руху твердих частинок, забарвлені в кольори, що відповідають швидкості частинок; д) – траєкторії руху крапель конденсату забарвлені в кольори, що відповідають діаметру крапель; е) – траєкторії руху твердих частинок, забарвлені в кольори, що відповідають діаметру частинок

**Рисунок 3.16** – Результати моделювання руху дисперсної фази рівнопрохідним трійником, у якому газовий потік із відгалуження повністю перетікає в одну з сторін магістралі трійника

трійника навпроти відгалуження розміщена за місцем перетину осі відгалуження трійника з стінкою його магістралі вправо (рисунок 3.16, б, місце ударяння 1). Кут атаки поблизу місця перетину осі відгалуження трійника зі стінкою його магістралі є максимальним і складає біля  $30^\circ$  (рисунок 3.16, б). Швидкість крапель конденсату та твердих частинок в цьому місці є незначною і складає біля 8 м/с (рисунок 3.16, в, г). У міру віддалення від місця перетину осі відгалуження трійника з стінкою його магістралі вправо кут атаки зменшується (рисунок 3.16, б), а швидкість крапель конденсату та твердих частинок збільшується і досягає 18,5 м/с у місці закінчення магістралі трійника (рисунок 3.16, в, г). Біля верхньої стінки з правого боку магістралі трійника відбувається завихрення газового потоку з дисперсною фазою, зумовлене відриванням потоку від стінки в місці приварювання відгалуження до магістралі трійника. Швидкість газу з рідкими та твердими частинками в цьому місці складає 0,5–0,6 м/с (рисунок 3.16, в, г).

Дослідивши траєкторії руху дисперсних фаз у рівнопрохідному трійнику, також виявлено, що в місці зміни напрямку потоку поблизу нижньої частини магістралі трійника навпроти відгалуження незначна частина рідких і твердих частинок відриваються від основного потоку і дугоподібними траєкторіями рухаються у ліву сторону магістралі трійника. Це призводить до їх ударяння в стінку магістралі трійника. Місцем ударяння є стінка магістралі трійника навпроти відгалуження розміщена за місцем перетину осі відгалуження трійника зі стінкою його магістралі в ліво (рисунок 3.16, б, місце ударяння 2). Кут атаки неподалік місця перетину осі відгалуження трійника зі стінкою його магістралі є максимальним і складає біля  $30^\circ$  (рисунок 3.16, б). У міру віддалення від місця перетину осі відгалуження трійника зі стінкою його магістралі в праву сторону кут атаки зменшується (рисунок 3.16, б). Швидкість крапель конденсату та твердих частинок в цьому місці складає 3 м/с (рисунок 3.16, в, г). Після ударяння дисперсна фаза закручується і повертається назад в основний потік, рухаючись верхньою та середньою частиною магістралі трійника (рисунок 3.16).

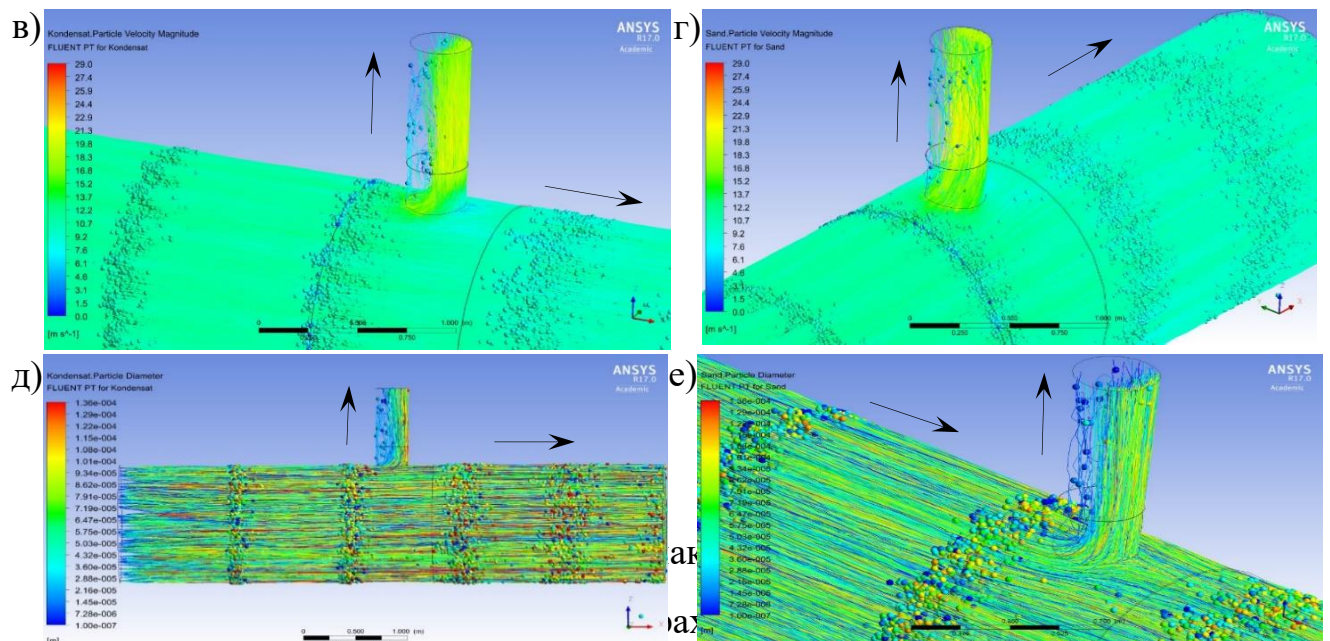
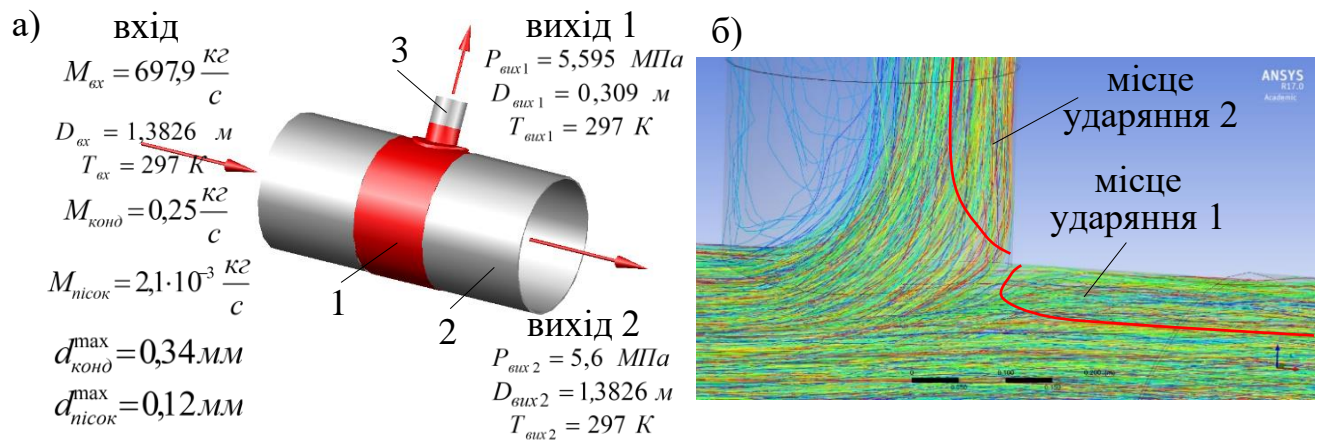
Досліджуючи траєкторії руху крапель конденсату та твердих частинок, забарвлених в кольори, що відповідають їх діаметрам, встановлено, що в трійнику,

в якому газовий потік із відгалуження трійника повністю перетікає у одну з сторін магістралі трійника, відбувається рівномірний розподіл крапель конденсату і твердих частинок різного діаметра у всій його внутрішній порожнині (за винятком місця завихрення газового потоку, де переважають частинки найменшого діаметра) (рисунок 3.16, д, е). Розрахований за (3.17) максимальний діаметр крапель конденсату програмним комплексом ANSYS Fluent був скорегований і склав  $d_{\text{конд}}^{\text{max}} = 0,085$  мм (рисунок 3.16, д). [65]

Розглянемо трійник, в якому з магістралі частина потоку спрямовується у відгалуження трійника. Граничні умови та характеристики кожної дисперсної фази наведені на рисунку 3.17, а.

Для визначення тиску на виході відгалуження трійника (рисунок 3.17, а) у програмному комплексі ANSYS Fluent попередньо розраховувався трійник для різних тисків на виході 1 відгалуження трійника доти, поки не було визначено, при якому тиску на виході відгалуження масова витрата буде рівною проектній масовій витраті. Такий тиск дорівнював  $P_{\text{вих1}} = 5595000$  Па, а відповідна йому масова витрата складала  $M_{\text{вих1}} = 27,4$  кг/с.

Під час проходження трійником частина газового потоку з дисперсними фазами змінює свій напрям і перетікає з магістралі у відгалуження трійника (масова витрата відгалуженням складає  $M_{\text{вих1}} = 27,4$  кг/с), у результаті чого спостерігається складна картина руху газу трійником (рисунок 3.17). Дослідивши траєкторії руху рідких і твердих частинок у трійнику, встановлено, що з магістралі в відгалуження трійника дугоподібними траєкторіями перетікають дисперсні фази, які рухаються в верхній частині магістралі трійника. При цьому дугоподібні траєкторії незначної кількості рідких і твердих частинок виходять за межі проекції (уявного продовження) відгалуження трійника в внутрішню порожнину його магістралі (рисунок 3.17, б). Коли дисперсні фази, які рухаються цими траєкторіями, наближаються до стінки магістралі трійника з правої сторони відгалуження траєкторії їх руху заокруглюються в сторону руху газового потоку магістраллю трійника та відбувається ударяння рідких і твердих частинок до стінки магістралі



дисперсних фаз; в) – траєкторії руху крапель конденсату, забарвлені в кольори, що відповідають швидкості; г) – траєкторії руху твердих частинок, забарвлені в кольори, що відповідають швидкості частинок; д) – траєкторії руху крапель конденсату, забарвлені в кольори, що відповідають діаметру крапель; е) – траєкторії руху твердих частинок, забарвлені в кольори, що відповідають діаметру частинок

**Рисунок 3.17** – Результати моделювання руху дисперсних фаз трійником у якому газ рухається магістраллю трійника і з якого частина потоку перетікає у відгалуження трійника



трійника. Місцем ударяння є внутрішня поверхня верхньої частини магістралі трійника розміщена з правого боку відгалуження трійника (рисунок 3.17, б, місце ударяння 1). Максимальний кут атаки в місці ударяння спостерігається біля відгалуження трійника і складає біля  $40^\circ$ . У міру віддалення від відгалуження трійника вправо кут атаки зменшується. Швидкість крапель конденсату в місці ударяння 1 складає від 5 м/с до 9 м/с (у міру віддалення магістраллю трійника від відгалуження збільшується) (рисунок 3.17, в). Такою ж в цьому місці є швидкість твердих частинок (рисунок 3.17, г).

Дослідивши траєкторії руху дисперсних фаз у відгалуженні трійника виявлено, що у відгалуженні рідкі та тверді частинки, які перетекли з магістралі, продовжують рухатись дугоподібними траєкторіями. В результаті цього відбувається їх ударяння до стінки відгалуження трійника та привареної до нього труби справа (рисунок 3.17, б, місце ударяння 2). Кут атаки на початку відгалуження (подлизу місця його приварювання до магістралі) є максимальним і складає біля  $45^\circ$ . Далі відгалуженням і привареною до нього трубою кут атаки зменшується. Швидкість крапель конденсату та твердих частинок у місці ударяння на початку відгалуження складає 6,5 м/с і в міру віддалення від початку відгалуження збільшується та досягає максимального значення 20 м/с на початку привареної до відгалуження труби (рисунок 3.17, в, г). Біля протилежної стінки відгалуження трійника і привареної до нього труби відбувається завихрення газового потоку з наявними в ньому дисперсними фазами (рисунок 3.17, в, г). Швидкість частинок у місці завихрення складає від 1 м/с до 10 м/с (рисунок 3.17, в, г).

Із візуалізованих результатів моделювання видно, що у відгалуженні трійника відбувається нерівномірний перерозподіл дисперсних фаз за діаметром (рисунок 3.17, д, е). Більша частина крапель конденсату і твердих частинок, які мають більші діаметри, у відгалуженні трійника рухаються з правої його сторони. Частина з них ударяється в стінку відгалуження і привареної до нього труби, що призводить до ерозійного зношування (рисунок 3.17, б, місце ударяння 1). Дисперсні фази меншого діаметра рухаються з протилежної сторони потоку та

містяться в завихреному у відгалуженні трійника потоці газу. [56]

### **Висновки до розділу 3**

1. Визначено види, властивості та розміри характерних забруднень, які містяться у внутрішній порожнині трубопровідних систем. У внутрішній порожнині магістральних газопроводів міститься пісок розміром зерен до 120 мкм, продукти внутрішньотрубної корозії (до 20 % загального обсягу проби) розміром до 200 мкм, конденсат і вода діаметр крапель яких залежить від густини газу та рідкої фази, тиску, сили поверхневого натягу і може досягати 130 мкм.

2. Визначено закономірності впливу рідких дисперсних фаз у газопровідних потоках на втрати гідравлічної енергії в фасонних елементах трубопровідних систем. Встановлено, що з збільшенням об'ємної частки дисперсної рідкої фази збільшуються втрати гідравлічної енергії двофазного потоку в таких елементах. Величина втрат гідравлічної енергії залежить від геометричних параметрів фасонних елементів, режимних параметрів транспортування та характеристик дисперсних фаз. Такі дослідження виконані Ейлеровим підходом (модель Mixture) шляхом моделювання руху фасонними елементами двох фаз (газоподібної та рідкої), які вважались взаємопроникними континуумами.

3. Найсуттєвіший вплив об'ємної частки дисперсної рідкої фази на втрати гідравлічної енергії потоку спостерігався у відводах трубопровідних систем із великим кутом і малим радіусом вигину. У відводах газопроводів із кутом вигину  $90^\circ$  втрати тиску двофазних потоків при досліджуваних параметрах потоку були втричі більшими, ніж у відводах із кутом вигину  $30^\circ$ . А у відводах з радіусом вигину рівним DN – вдвічі більшими, ніж із радіусом вигину  $3,5 DN$ . Особливо втрати тиску у відводах зростають при великих швидкостях багатофазного потоку та малих тисках у місці розміщенні відводу. Також істотно збільшуються втрати енергії двофазного потоку у відводах малого діаметра. В трійниках двофазний потік призводить до значних гідравлічних втрат енергії. Найсуттєвіший вплив об'ємної частки дисперсної рідкої фази на втрати гідравлічної енергії потоку спостерігався, коли радіус відборткування трійника був найменший або

відборткування було взагалі відсутнє (зварні трійники). Отримано емпіричні залежності для визначення втрати тиску двофазних потоків у фасонних елементах трубопровідних систем.

4. Визначено закономірності впливу геометричної форми, напрямків руху двофазного потоку фасонними елементами трубопровідних систем на траєкторії руху дисперсних фаз такими елементами. Отримано розраховані траєкторії руху дисперсної фази в потоці суцільної елементами трубопровідних систем складної геометричної форми. Встановлено закономірності перерозподілу швидкості та розмірів дисперсних фаз у внутрішній порожнині фасонних елементів. Виявлено місця інтенсивного ударяння дисперсної фази до стінки фасонних елементів, місця завихрення дисперсних фаз, відривання потоку з рідкими та твердими частинками від стінки. Визначено швидкість рідких і твердих частинок, кути атаки, діаметри крапель конденсату та твердих частинок у місці ударяння. Такі дослідження виконані Лагранжевим підходом (модель DPM), який розглядає рух кожної окремої частинки дисперсної фази в суцільній фазі фасонним елементом.

5. У відводах трубопроводів з кутом вигину  $90^\circ$  біля 40 % частинок дисперсної фази вдаряється в стінку відводу з опуклого його боку. Причому концентрація дисперсних частинок більшого діаметра в місці ударяння є значно більшою, ніж меншого, а швидкість потоку в місці ударяння збільшується. Зі зменшенням кута вигину відводу кількість дисперсних частинок, які ударяються в стінку відводу, кут атаки дисперсних частинок в місці ударяння, їх швидкість зменшуються, а концентрація дисперсних частинок різного діаметра в місці ударяння все більше вирівнюється. У трійниках розподіл дисперсних фаз за діаметрами, розподіл швидкостей дисперсних фаз, місця їх ударяння в стінку, кути атаки в місці ударяння найсуттєвіше залежать від напрямків руху потоків.

Основні наукові результати розділу опубліковані в працях [56–65].

## РОЗДІЛ 4

### ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ЕРОЗІЙНОГО ЗНОШУВАННЯ СКЛАДНИХ ТРУБОПРОВІДНИХ СИСТЕМ

CFD моделюванням та експериментально визначено закономірності процесів ерозійного зношування фасонних елементів трубопроводних систем (відводів, трійників). Математична модель базується на розв'язанні системи рівнянь Нав'є-Стокса, нерозривності, руху дисперсних фаз, рівняння Фінні з відповідними початковими та граничними умовами. Результати моделювання візуалізовані побудовою полів концентрації дисперсної фази та полів швидкості ерозійного зношування на контурах фасонних елементів. Виявлено місця інтенсивного ударяння рідких і твердих частинок до стінки фасонних елементів трубопроводних систем, місця їх інтенсивного ерозійного зношування, визначено швидкість стоншення стінки.

Визначено закономірності впливу швидкості та діаметра дисперсних фаз, кутів атаки, концентрації дисперсної фази на стінці на місцезнаходження та інтенсивність ерозійного зношування фасонних елементів трубопроводних систем. Досліджено вплив напрямків руху потоку трійником на місцезнаходження і інтенсивність ерозійного зношування його стінки. Достовірність отриманих результатів підтверджено лабораторними та промисловими експериментальними дослідженнями.

Визначено закономірності впливу діаметра, кута та радіуса вигину відводів трубопроводів, швидкості двофазного потоку, розмірів і витрати дисперсних фаз на місцезнаходження та інтенсивність ерозійного зношування фасонних елементів. Побудовано графічні залежності максимальної швидкості ерозійного зношування відводів трубопроводів від кожного з досліджуваних параметрів. Отримано нову емпіричну залежність між інтенсивністю ерозійного зношування відводів трубопроводів та основними параметрами процесу.

Виконано аналіз результатів експериментальних вимірювань товщин стінок об'єктів технологічних об'єктів магістральних газопроводів, отриманих у різний

час. Визначено вплив тривалості експлуатації відводів газопроводів на швидкість ерозійного зношення.

Виконано комплексне експериментальне дослідження причин аварійного витoku теплоносія з трійника тепломережі м. Київ. Здійснено механічні дослідження взірців сталі трійника, дослідження мікроструктури сталі, CFD моделювання руху теплоносія трійником.

#### **4.1 Чисельне моделювання ерозійного зношення фасонних елементів трубопроводів**

Ерозійне зношення – ерозія твердої поверхні, зумовлена впливом на неї твердих або рідких частинок. Ці частинки містяться в транспортованому продукті та мають кінетичну енергію, достатню, для зношення металевої труби. [72, 295] Ерозія фасонних елементів трубопроводів може призвести до витоків, розривів стінки та втрат продукту [73, 74], становить загрозу для життя і може стати причиною руйнувань будівель, оскільки велика кількість таких елементів розміщена всередині будівель та в межах території компресорних станцій, підземних сховищ газу.

Ерозією є деградація стінки фасонного елемента, зумовлена його зношенням частинками, які рухаються з великою швидкістю в потоці газу. Ерозійне зношення є одним із чинників, які зменшують залишковий ресурс фасонних елементів лінійної частини трубопроводів.

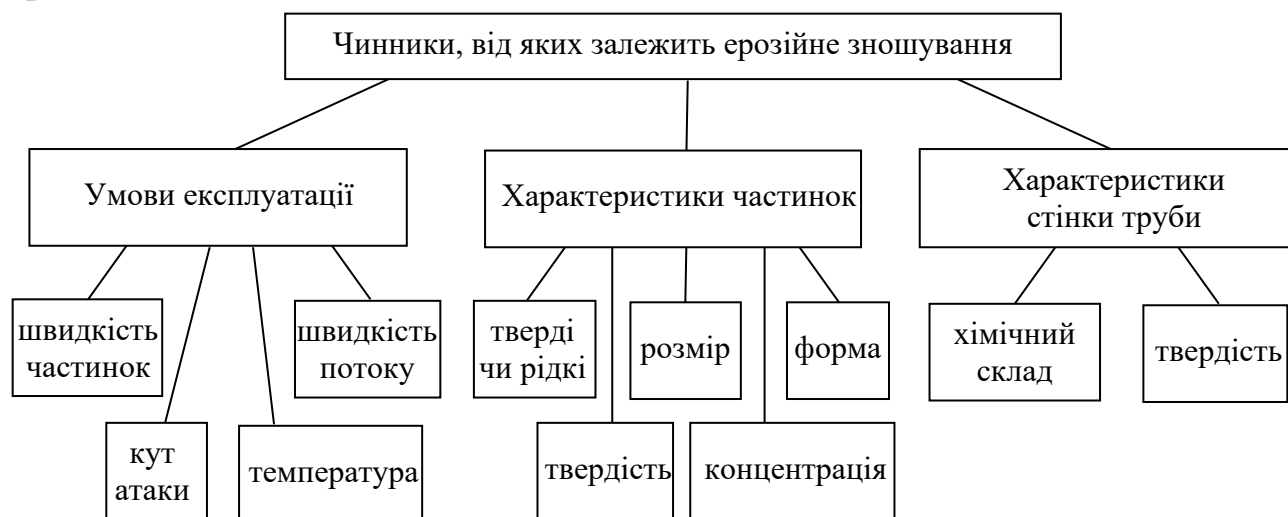
Є декілька чинників, від яких залежить ерозійне зношення (рисунок 4.1). Ці чинники можна поділити на:

- умови експлуатації – швидкість частинок, кут атаки, швидкість потоку, температура, інтенсивність зіткнення частинок з стінкою трубопроводу;
- характеристики частинок – тверді чи рідкі, розмір, форма, твердість, матеріал;
- характеристики стінки труби – хімічний склад, твердість.

Значний вплив на швидкість ерозійного зношення також мають

характеристики транспортованого продукту. На швидкість ерозійного зношування впливають наступні параметри:

- характеристики продукту: густина, в'язкість;
- режим течії: ламінарний, турбулентний;
- мікроскопічні властивості поверхні, корозійна активність, мастильний ефект. [71, 296]



**Рисунок 4.1** – Чинники, від яких залежить ерозійне зношування

Для розуміння впливу вищенаведених чинників на величину ерозійного зношування стінки труби доцільно розглянути вплив кожного з них окремо. Найважливішими з усіх чинників є швидкість частинок, кут атаки й інтенсивність зіткнення частинок із стінкою трубопроводу – вони найчастіше зустрічаються в усіх моделях ерозійного зношування.

Кут атаки визначається як кут між стінкою трубопроводу і траєкторією руху частинки безпосередньо перед зіткненням з стінкою трубопроводу. Якщо частинки рухаються паралельно поверхні, то кут атаки становить майже  $0^{\circ}$ . Це призведе тільки до незначного зношування стінки трубопроводу. Кут атаки складає  $90^{\circ}$ , якщо частинки рухаються нормально до поверхні.

Точно передбачувати ерозійне зношування фасонних елементів трубопроводів дуже складно через широкий спектр параметрів, які впливають на його місцезнаходження та величину.

Інформацію про ерозійне зношування фасонних елементів трубопроводів

отримують їх зовнішнім обстеженням ультразвуковими дефектоскопами. Це вимагає спеціальних дозволів, фінансових і часових витрат, розкопування підземних ділянок трубопроводів. Місця обстежень фасонних елементів трубопроводів на ерозійне зношування не передбачені жодним українським нормативним документом, і фахівці, які виконують обстеження, визначають їх на основі нічим не обґрунтованих логічних міркувань, набутого досвіду. Все це не завжди дозволяє виявити місця максимальної ерозії, що є не менш важливим, ніж точне визначення величини ерозійного зношування. Зміщення ультразвукового первинного перетворювача тільки на кілька сантиметрів від місця ерозійного зношування може спричинити суттєве зниження якості обстеження фасонних елементів газопроводів [296]. Тому точне виявлення місць ерозійного зношування є надзвичайно важливим.

Сьогодні вирішити такі задачі в найкоротші терміни можна CFD моделюванням, яке дозволяє досліджувати траєкторії руху дисперсних фаз фасонними елементами трубопроводів (що було зроблено в підрозділі 3.3.2), досліджувати ерозійне зношування елементів трубопроводів складної геометричної форми (виявляти місця та розраховувати величину ерозійного зношування).

Комплексна процедура чисельного моделювання ерозійного зношування складається з трьох етапів:

- моделювання газового потоку (суцільної фази) в фасонних елементах трубопроводів;
- моделювання руху рідких і твердих частинок у потоці фасонних елементів трубопроводів;
- моделювання ерозійного зношування фасонних елементів. [75]

Рух суцільної фази моделюється чисельним розв'язуванням систем рівнянь, які описують найзагальніший випадок руху газоподібного середовища. Такими є рівняння Нав'є – Стокса (2.1), яке виражає собою закон збереження імпульсу, (або Рейнольдса (2.2), якщо потік турбулентний) і нерозривності (2.3), яке виражає собою закон збереження маси

Для моделювання руху дисперсної фази в суцільній фазі застосовано підхід Лагранжа. Тобто відстежується рух окремо взятих частинок під дією сил із боку потоку суцільної фази. Рівнянням руху частинок є рівняння (3.20).

Розрахунок ерозійного зношування виконується з використанням моделі Фінні, розробленої для жорстких пластичних матеріалів шляхом аналізу рівнянь руху однієї частинки під час її зіткнення з поверхнею. Для оцінки обсягу втрати матеріалу поверхні, зумовленої зіткненням з нею частинки, була досліджена траєкторія руху частинки. При цьому було прийнято наступні припущення:

- прорізання поверхні є пластичною деформацією;
- тріщини не поширюються попереду частинки, яка ріже поверхню;
- відшарування матеріалу спричинене ріжучою дією частинок.

Даний модель неможливо застосовувати для крихких матеріалів.

Згідно з моделлю Фінні питома швидкість ерозії (маса поверхні вилучена з одиниці площі за одиницю часу) на поверхні рівна

$$E = K u_q^n f(\theta), \quad (4.1)$$

де  $K$  – коефіцієнт, який залежить від модуля пружності матеріалу стінки та густини частинки;

$n$  – стала, яка залежить від матеріалу стінки (для сталі змінюється від 2,3 до 2,5);

$f(\theta)$  – безрозмірна функція, яка враховує вплив кута атаки  $\theta$  на швидкість ерозійного зношування. Ця функція може набувати різного вигляду. Наприклад, у роботі [297] вона має вигляд

$$f(\theta) = \begin{cases} A\theta^2 + B\theta & \dots \theta \leq \varphi \\ X \cos^2 \theta \sin(W\theta) + Y \sin^2 \theta + Z & \dots \theta > \varphi \end{cases}, \quad (4.2)$$

де  $A, B, W, X, Y, Z, \varphi$  – емпіричні коефіцієнти.



Для моделювання ерозійного зношування фасонних елементів магістральних газопроводів в ANSYS Fluent була використана та ж геометрія фасонних елементів, що і для моделювання руху одно та багатофазних газових потоків фасонними елементами газопроводів (підрозділ 2.2.5, підрозділ 3.3.2). Задавались ті ж матеріали і характеристики кожної дисперсної фази, ті ж граничні умови на вході і виході потоку в розрахункову геометрію для суцільної фази, налаштовувались ті ж параметри вирішувача (підрозділ 2.4). Відмінністю є те, що для виконання моделювання ерозійного зношування в вкладці Physical Models вікна Лагранжевої моделі Discret Phase вибиралась опція Erosion/Accretion.

Результати моделювання ерозійного зношування були візуалізовані в постпроцесорі ANSYS Fluent, що дало змогу виявити місця найінтенсивнішого ударяння рідких і твердих частинок до стінки фасонних елементів і місця максимального ерозійного зношування на контурах фасонних елементів.

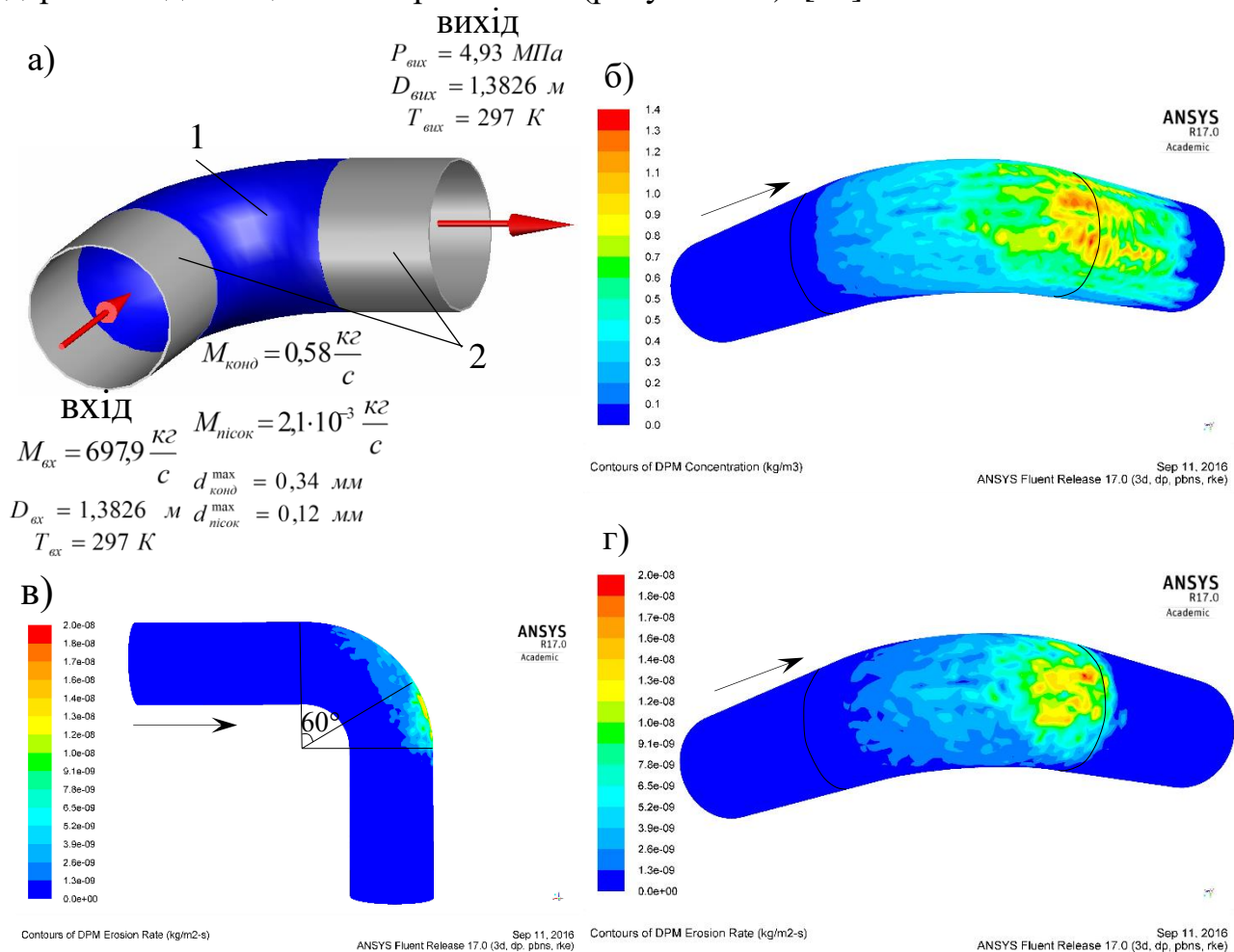
Розглянемо відвід із кутум вигину  $90^\circ$ . Геометричні розміри відводу та прилеглих до нього ділянок труб, граничні умови та характеристики кожної дисперсної фази, які задавались у препроцесорі ANSYS Fluent, наведені на рисунку 4.2, а.

Результати розрахунків були візуалізовані в постпроцесорі програмного комплексу ANSYS Fluent побудовою полів концентрації дисперсної фази (рисунок 4.2, б) і полів швидкості ерозійного зношування (рисунок 4.2, в, г) на контурах відводу.

Як видно з полів концентрації дисперсної фази на контурах відводу (рисунок 4.2, б), інтенсивне ударяння рідких і твердих частинок до стінки відбувається з опуклого його боку. Місце ударяння простягається вздовж відводу і прилеглої до нього труби, починаючи від середини відводу і на довжину 1,5 м від кільцевого зварного шва в сторону руху продукту прилеглою до відводу трубою. Найінтенсивніше ударяння відбувається з опуклого боку відводу в місці виходу з нього газового потоку та на початку прилеглої до нього труби (максимальна концентрації дисперсної фази на контурах складає 1,4 кг/с).

Із полів ерозійного зношування на контурах відводу (рисунок 4.2, в, г) видно,

що інтенсивне ерозійне зношування відбувається з опуклого боку відводу в місці виходу з нього газового потоку між кутом  $60^\circ$  і  $90^\circ$  відводу та на початку привареної до відводу труби на довжину  $0,1$  м у напрямку руху продукту. Максимальна швидкість ерозійного зношування рівна  $2,0 \cdot 10^{-8}$  кг/м<sup>2</sup>·с. При такій швидкості ерозійного зношування стінка стоншується з швидкістю  $0,08$  мм/рік. На початку привареної до відводу труби швидкість ерозійного зношування різко зменшується, хоча інтенсивне ударяння рідких і твердих частинок до стінки відбувається ще на довжину  $1,5$  м від кільцевого зварного шва. Це зумовлено зменшенням кута атаки на величину менше, ніж  $15^\circ$  у міру віддалення місця ударяння від кільцевого зварного шва (рисунок 4.2). [76]

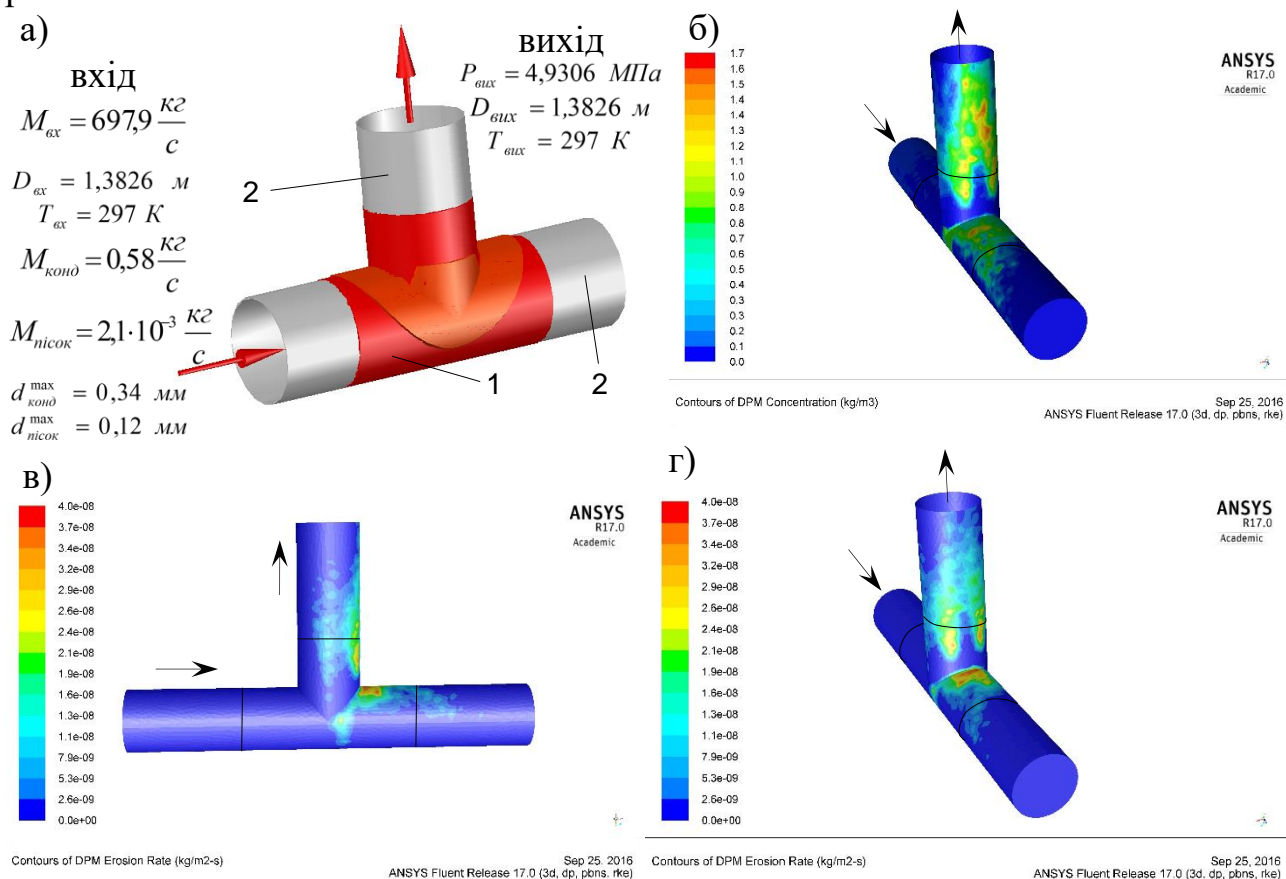


1 – відвід  $90^\circ$   $1420 \times 24$ ; 2 – труба  $1420 \times 18,7$ ; а) – розрахункова схема; б) – поля концентрації дисперсної фази на контурах; в), г) – поля швидкості ерозійного зношування на контурах

**Рисунок 4.2** – Результати моделювання ерозійного зношування відводу з кутум вигину  $90^\circ$

Розглянемо зварний трійник, у якому газ рухається магістраллю трійника і з магістралі потік повністю перетікає у відгалуження трійника. Геометричні розміри трійника і прилеглих до нього ділянок труб, граничні умови та характеристики кожної дисперсної фази, які задавались у препроцесорі ANSYS Fluent, наведені на рисунку 4.3, а.

Результати розрахунків були візуалізовані в постпроцесорі програмного комплексу ANSYS Fluent побудовою полів концентрації дисперсної фази (рисунок 4.3, б) і полів швидкості ерозійного зношування (рисунок 4.3, в, г) на контурах трійника.



1 – трійник зварний рівнопрохідний із підсилюючими накладками 1420×28 – 1420×28; 2 – труба 1420×18,7; а) – розрахункова схема; б) – поля концентрації дисперсної фази на контурах; в), г) – поля швидкості ерозійного зношування на контурах

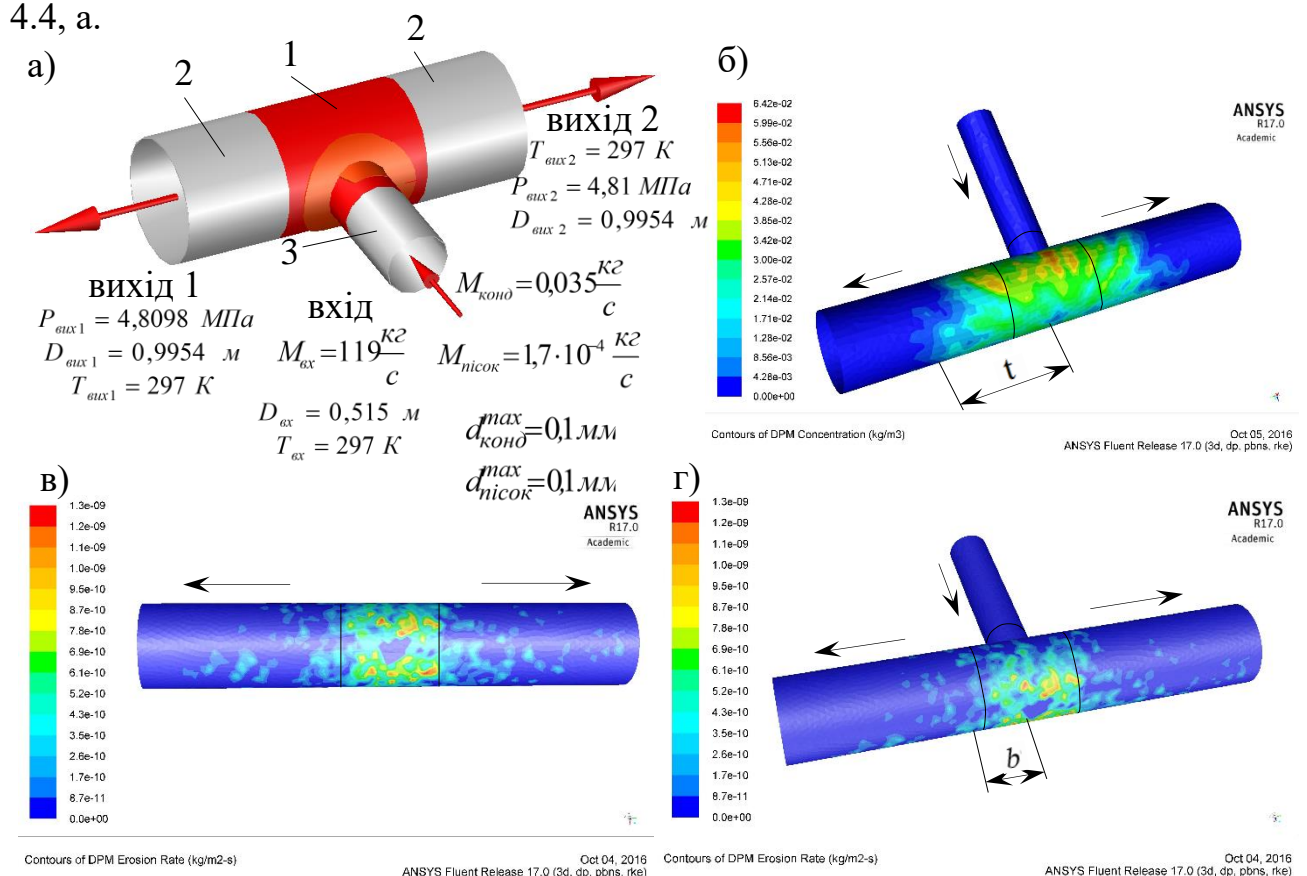
**Рисунок 4.3** – Результати моделювання ерозійного зношування трійника, в якому газовий потік із магістралі повністю перетікає у відгалуження трійника

Як видно з полів концентрації дисперсної фази на контурах трійника (рисунок 4.3, б), найінтенсивніше рідкі і тверді частинки вдаряються до стінки верхньої частини магістралі трійника з правої сторони відгалуження та до стінок відгалуження трійника і прилеглої до нього труби справа. В відгалуженні трійника місце ударяння дисперсних фаз простягається, починаючи від середини відгалуження трійника і на довжину більше 3 м від кільцевого зварного шва в сторону руху продукту, прилеглою до відгалуження трубою. Причому вздовж твірної відгалуження трійника розміщеної з правого його боку ударяння дисперсних фаз відбувається до стінки, привареної до відгалуження трійника труби на віддалі більше 0,5 м від зварного шва (рисунок 4.3, б). Справа і зліва від твірної відгалуження трійника, розміщеної з правого його боку, місце ударяння дисперсних фаз витягнуто в сторону магістралі трійника аж до середини відгалуження. Максимальна концентрація дисперсної фази на контурах магістралі і відгалуження трійника складає 1,7 кг/с.

Із полів ерозійного зношування на контурах трійника (рисунок 4.3, в, г) видно, що найінтенсивніше ерозійне зношування трійника відбувається в верхній частині його магістралі з правої сторони відгалуження, на віддалі біля 0,1 м від відгалуження трійника. Максимальна швидкість ерозійного зношування рівна  $4,0 \cdot 10^{-8}$  кг/м<sup>2</sup>·с. При такій швидкості ерозійного зношування стінка стоншується зі швидкістю 0,158 мм/рік. Також ерозійне зношування меншої інтенсивності відбувається з правого боку відгалуження трійника і прилеглої до нього труби. Місце ерозійного зношування простягається починаючи від середини відгалуження трійника і на довжину 1,5 м від кільцевого зварного шва в напрямку руху продукту, прилеглою до відгалуження трубою. Причому в місці твірної відгалуження трійника, розміщеної з правого його боку, відбувається ерозійне зношування привареної до відгалуження трійника труби на віддалі більше 0,5 м від зварного шва в напрямку руху продукту відгалуженням (рисунок 4.3, г). Справа і зліва від твірної відгалуження трійника, розміщеної з правого боку відгалуження, місце ерозійне зношування витягнуто в сторону магістралі трійника аж до середини відгалуження.

Максимальна швидкість ерозійного зношування в цьому місці рівна  $2,5 \cdot 10^{-8}$  кг/м<sup>2</sup>·с. За такої швидкості ерозійного зношування стінка стоншується зі швидкістю 0,099 мм/рік. [69]

Розглянемо зварний трійник в якому потік із відгалуження трійника розходиться у дві сторони магістралі трійника. Геометричні розміри трійника та прилеглих до нього ділянок труб, граничні умови та характеристики кожної дисперсної фази, які задавались у препроцесорі ANSYS Fluent наведені на рисунку 4.4, а.



1 – трійник зварний з підсилюючими накладками 1020×18 – 529×10; 2 – труба 1020×12,3; 3 – труба 529×7; а) – розрахункова схема; б) – поля концентрації дисперсної фази на контурах; в), г) – поля швидкості ерозійного зношування на контурах

**Рисунок 4.4** – Результати моделювання ерозійного зношування трійника, в якому потік із відгалуження трійника розходиться в дві сторони магістралі трійника

Результати розрахунків були візуалізовані в постпроцесорі програмного комплексу ANSYS Fluent побудовою полів концентрації дисперсної фази (рисунок

4.4, б) та полів швидкості ерозійного зношування (рисунок 4.4, в, г) на контурах трійника.

Як видно з полів концентрації дисперсної фази на контурах трійника (рисунок 4.4, б), місце найінтенсивнішого ударяння рідких і твердих частинок має форму кільця шириною  $t=1,5$  м, викривленого внутрішньою поверхнею магістралі трійника і прилеглих до нього труб. Діаметр внутрішнього кола кільця наближено рівний діаметру відгалуження трійника. Максимальна концентрація дисперсної фази на контурах магістралі трійника є незначною, оскільки в магістралі трійника дисперсна фаза розосереджується на велику площу внутрішньої поверхні, і складає  $0,064$  кг/с.

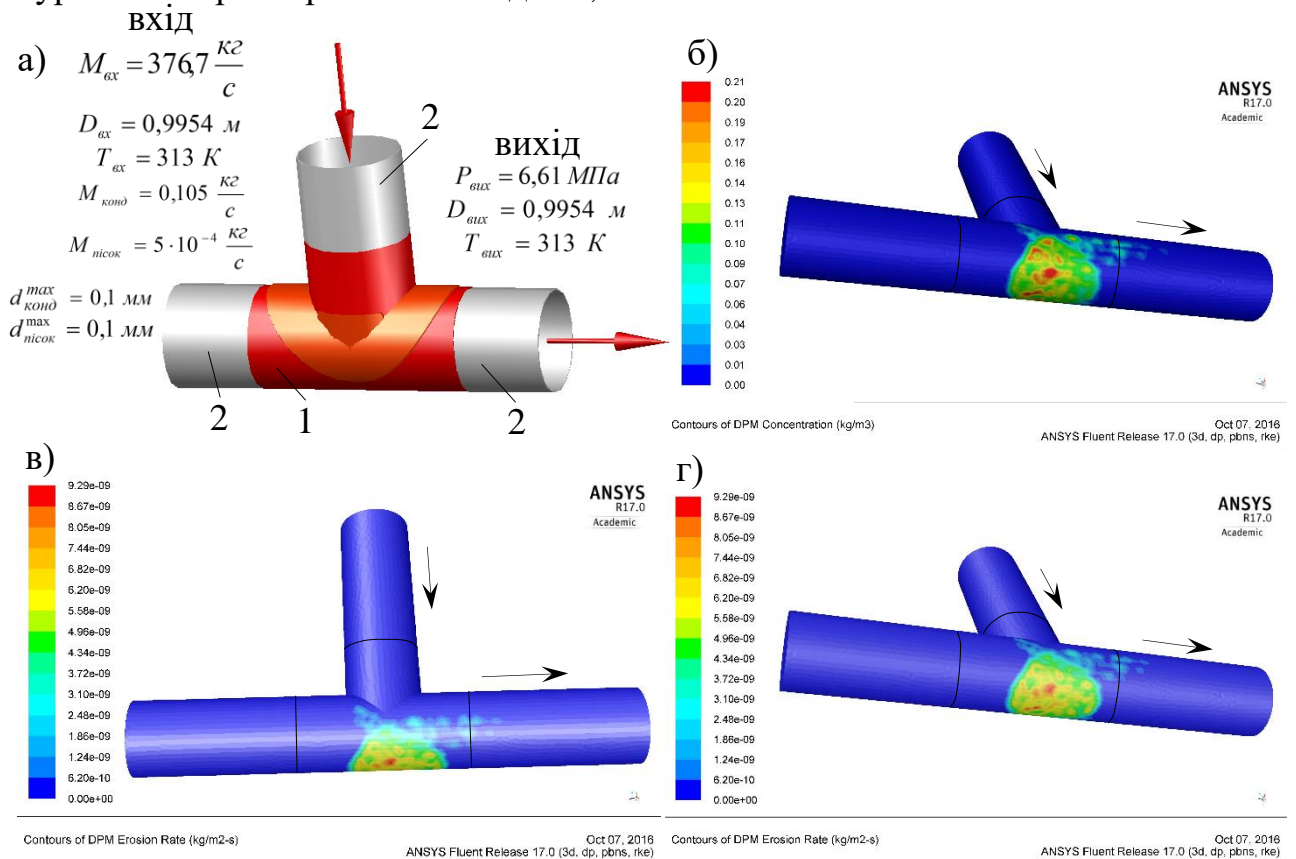
Із полів ерозійного зношування на контурах трійника (рисунок 4.4, в, г) видно, що місце найінтенсивнішого ерозійного зношування трійника розміщено в магістралі трійника з боку протилежного відгалуженню і має форму кільця викривленого внутрішньою поверхнею магістралі трійника. Ширина кільця складає  $b=0,8$  м, а діаметр внутрішнього кола кільця також наближено рівний діаметру відгалуження трійника. Максимальна швидкість ерозійного зношування є незначною і складає  $1,3 \cdot 10^{-9}$  кг/м<sup>2</sup>·с. За такої швидкості ерозійного зношування стінка стоншується з швидкістю  $0,0052$  мм/рік.

Розглянемо трійник, в якому газовий потік із відгалуження повністю перетікає в одну зі сторін магістралі трійника. Геометричні розміри трійника та прилеглих до нього ділянок труб, граничні умови та характеристики кожної дисперсної фази, які задавались в препроцесорі ANSYS Fluent, наведені на рисунку 4.5.

Результати розрахунків були візуалізовані в постпроцесорі програмного комплексу ANSYS Fluent побудовою полів концентрації дисперсної фази (рисунок 4.5, б) і полів швидкості ерозійного зношування (рисунок 4.5, в, г) на контурах трійника.

Як видно з полів концентрації дисперсної фази на контурах трійника (рисунок 4.5, б), місцем найінтенсивнішого ударяння рідких і твердих частинок є стінка магістралі трійника навпроти відгалуження. Місце ударяння має

грушоподібну форму. Кругла частина грушоподібного місця ударяння майже повністю співпадає з проекцією відгалуження трійника на внутрішню стінку його магістралі. Витягнута частина грушоподібного місця ударяння простягається в напрямку руху продукту магістраллю трійника, наблизившись до привареної до трійника труби на віддаль 0,3 м. Максимальна концентрація дисперсної фази на контурах магістралі трійника складає 0,21 кг/с.



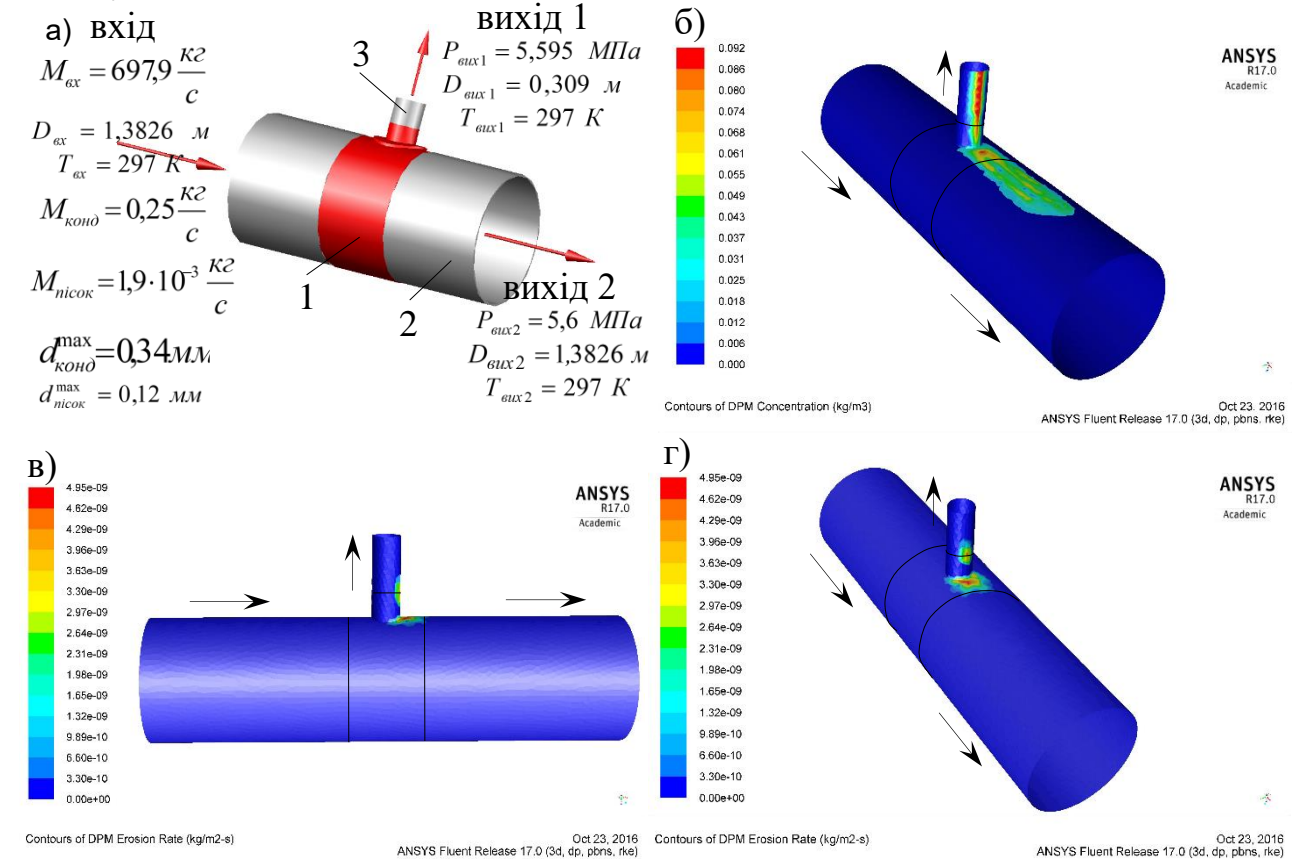
1 – трійник зварний рівнопрохідний із підсилюючими накладками 1020×20 – 1020×20; 2 – труба 1020×12,3; а) – розрахункова схема; б) – поля концентрації дисперсної фази на контурах; в), г) – поля швидкості ерозійного зношування на контурах

**Рисунок 4.5** – Результати моделювання ерозійного зношування трійника, в якому потік із відгалуження трійника повністю перетікає в одну зі сторін магістралі трійника

Із полів ерозійного зношування на контурах трійника (рисунок 4.5, в, г) видно, що місце найінтенсивнішого ерозійного зношування трійника розміщене там ж, де і місце найінтенсивнішого ударяння рідких і твердих частинок до стінки

магістралі трійника і також має грушоподібну форму. Максимальна швидкість ерозійного зношування трійника складає  $9,29 \cdot 10^{-9}$  кг/м<sup>2</sup>·с. За такої швидкості ерозійного зношування стінка стоншується з швидкістю 0,037 мм/рік. [66]

Розглянемо трійник, в якому з магістралі трійника частина потоку перетікає у відгалуження трійника. Геометричні розміри трійника і прилеглих до нього ділянок труб, граничні умови та характеристики кожної дисперсної фази, які задавались в препроцесорі ANSYS Fluent, наведені на рисунку 4.6. Під час проходження трійником частина газového потоку з дисперсними фазами змінює свій напрям і перетікає з магістралі у відгалуження трійника (масова витрата відгалуженням складає  $M_{вих1} = 27,4$  кг/с).



1 – трійник зварний із підсилюючою накладкою 1420×20 – 325×9; 2 – труба 1420×18,7; 3 – труба 325×8; а) – розрахункова схема; б) – поля концентрації дисперсної фази на контурах; в), г) – поля швидкості ерозійного зношування на контурах

**Рисунок 4.6** – Результати моделювання ерозійного зношування трійника, в якому частина газového потоку з магістралі трійника перетікає у відгалуження трійника



Результати розрахунків були візуалізовані в постпроцесорі програмного комплексу ANSYS Fluent побудовою полів концентрації дисперсної фази (рисунок 4.6, б) та полів швидкості ерозійного зношування (рисунок 4.6, в, г) на контурах трійника.

Як видно з полів концентрації дисперсної фази на контурах трійника (рисунок 4.6, б), інтенсивне ударяння рідких і твердих частинок до стінки відбувається у магістралі й у відгалуженні трійника. В магістралі трійника місце ударяння розміщене з правої сторони відгалуження в верхній частині магістралі. Місце ударяння у магістралі трійника простягається усією розміщеною з правого боку відгалуження трійника верхньою частиною магістралі трійника та на довжину біля 1,5 м від кільцевого зварного шва в сторону руху продукту прилеглою до відгалуження трубою. Максимальна концентрація дисперсної фази на контурах магістралі трійника знаходиться в верхній частині магістралі посередині між відгалуженням і зварним швом трійник-труба і складає 0,085 кг/с. У відгалуженні трійника місце ударяння розміщене з правого боку відгалуження і простягається від початку відгалуження трійника і на довжину більше 1 м прилеглою до відгалуження трійника трубою (максимальна концентрація дисперсної фази на контурах відгалуження трійника складає 0,092 кг/с).

Із полів ерозійного зношування на контурах трійника (рисунок 4.6, в, г) видно, що інтенсивне ерозійне зношування відбувається і в магістралі, і в відгалуженні трійника. В магістралі трійника місце ерозійного зношування простягається усією розміщеною з правого боку відгалуження трійника верхньою частиною магістралі трійника. Максимальна швидкість ерозійного зношування стінки магістралі трійника в цьому місці складає  $4,95 \cdot 10^{-9}$  кг/м<sup>2</sup>·с. За такої швидкості ерозійного зношування стінка стоншується з швидкістю 0,02 мм/рік. Місце максимального ерозійного зношування знаходиться на віддалі біля 0,07 м від відгалуження. Суттєвого ерозійного зношування прилеглої до магістралі трійника труби не відбувається, хоча інтенсивне ударяння рідких і твердих частинок до її стінки відбувається ще на довжину більше 1,5 м від кільцевого зварного шва. Це зумовлено зменшенням кута атаки в міру віддалення місця ударяння від місця

максимального ерозійного зношування стінки магістралі.

У відгалуженні трійника місце ерозійного зношування розміщене справа і має форму овалу, центр якого розміщений у місці кільцевого зварного шва. Овалоподібне місце ерозійного зношування віддалене від магістралі трійника на віддаль 0,09 м. Максимальна швидкість ерозійного зношування стінки відгалуження трійника спостерігається в центрі овалу і складає  $4,68 \cdot 10^{-9}$  кг/м<sup>2</sup>·с. За такої швидкості ерозійного зношування стінка стоншується з швидкістю 0,019 мм/рік. Місце максимального ерозійного зношування знаходиться в центрі овалоподібного місця ерозійного зношування.

## **4.2 Експериментальні дослідження ерозійного зношування фасонних елементів**

### **4.2.1 Експериментальний стенд**

Експериментальні дослідження ерозійного зношування фасонних елементів виконувались в лабораторії кафедри газонафтопроводів та газонафтосховищ Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу. Для досліджень розроблено та побудовано багатофункціональний експериментальний стенд-макет лінійної частини газопроводу, який дозволяє виконувати комплексні дослідження руху потоків фасонними елементами трубопроводів, руху внутрішньотрубних засобів трубопроводами, ефективності очистки трубопроводів різними способами.

Експериментальний стенд призначений для розв'язування таких задач:

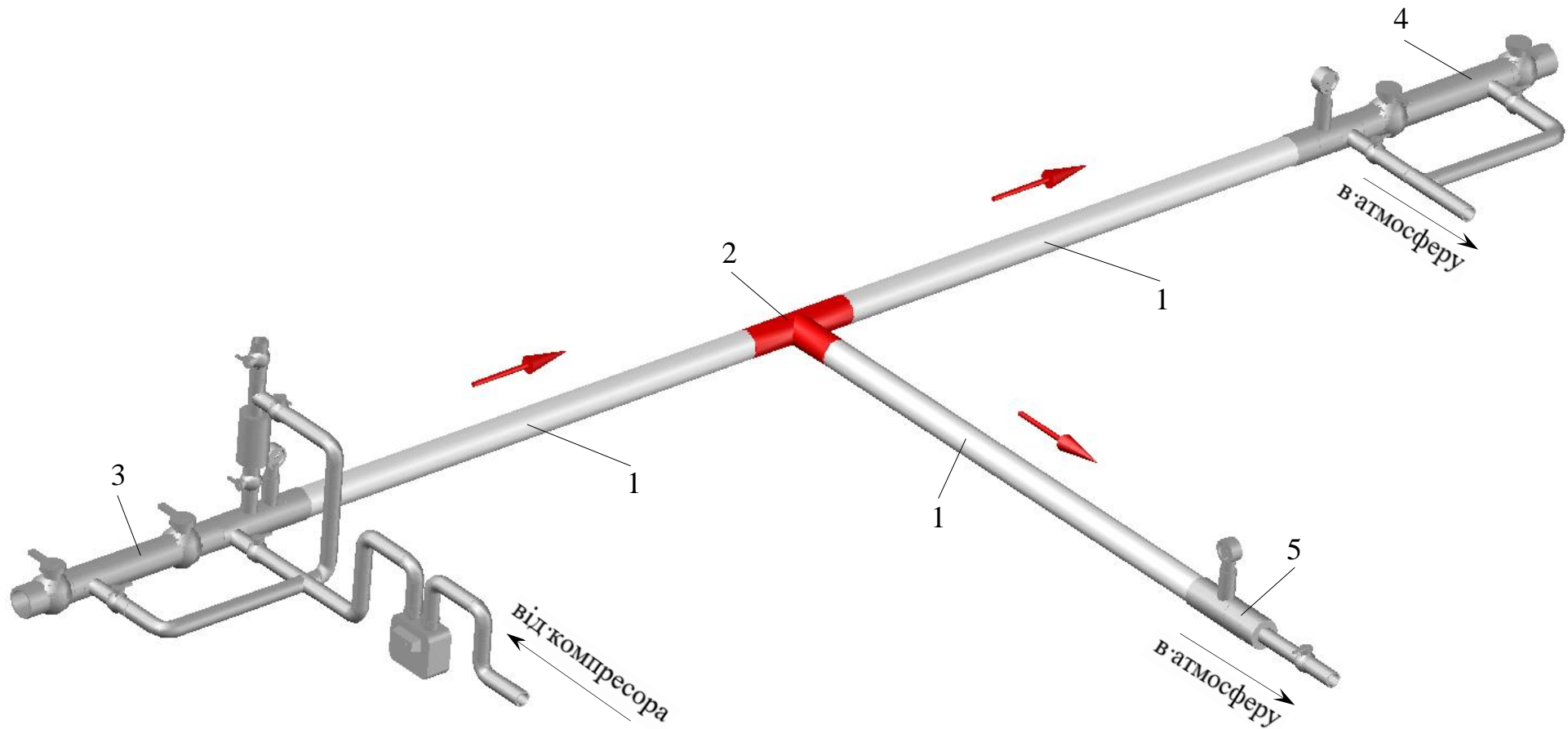
- виявлення місць інтенсивного ерозійного зношування фасонних елементів трубопроводів;
- дослідження руху внутрішньотрубних засобів трубопроводами;
- дослідження ефективності очистки трубопроводів очисними поршнями;
- дослідження ефективності очистки трубопроводів швидкісними потоками.

Експериментальний стенд для дослідження ерозійного зношування трійників

(рисунок 4.7, рисунок 4.8) складається з прозорих скляних труб 1 внутрішнім діаметром 38 мм, товщиною стінки 3,5 мм і довжиною 2,4 м, прозорого пластикового трійника 2 для візуалізації потоку; вузла запускання внутрішньотрубних засобів і дисперсних фаз в трубопровід 3; вузла приймання внутрішньотрубних засобів і випускання багатофазного потоку з трубопроводу 4; вузла випускання багатофазного потоку з трубопроводу 5. Експериментальний стенд для досліджень ерозійного зношування відводу з кутом вигину  $90^\circ$  (рисунок 4.9, рисунок 4.10) складається з прозорих скляних труб 1 внутрішнім діаметром 38 мм, товщиною стінки 3,5 мм і довжиною 2,4 м; прозорого скляного відводу 2 із кутом вигину  $90^\circ$ ; вузла запускання внутрішньотрубних засобів і дисперсних фаз в трубопровід 3; вузла випускання багатофазного потоку з трубопроводу 4.

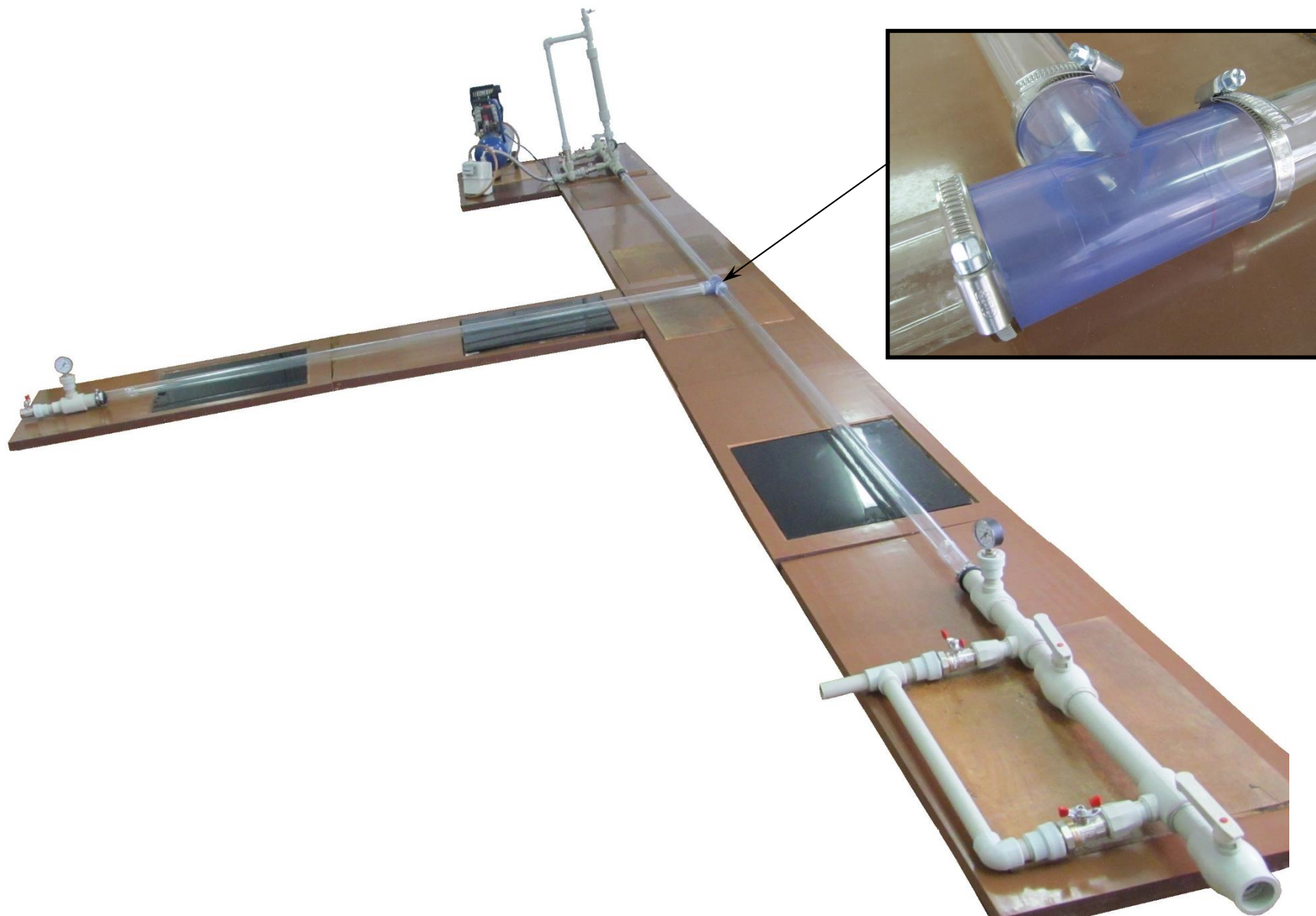
Скляні труби, прозорий пластиковий трійник, вузли запускання-приймання внутрішньотрубних засобів і дисперсних фаз з'єднані одне з одним муфтами з резиновими прокладками, які легко знімаються. Це дає змогу змінювати фасонні елементи, конфігурацію стенду для зміни схеми руху багатофазного потоку трійником.

Вузол запускання внутрішньотрубних засобів і дисперсних фаз у трубопровід (рисунок 4.11, рисунок 4.12) виготовлений із пластикових труб і фасонних елементів і складається із ємності для твердої та рідкої фази 1, газового лічильника 2, манометра 3, камери запускання внутрішньотрубних засобів 4, кранів 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11. У трубопровід повітря подається від компресора через газовий лічильник 2 після відкриття крана 6. Щоб запустити внутрішньотрубний засіб в трубопровід, його поміщають в камеру 4 через відкритий кран 8, тоді закривають крани 6 та 8 і відкривають крани 7 та 9. Щоб подати тверду або рідку фазу в трубопровід, її засипають або заливають в ємність 1 через відкритий кран 11, тоді закривають кран 11 і відкривають крани 12 та 10. Дисперсну фазу подають у трубопровід тільки після досягнення необхідної витрати повітряного потоку. Тиск на дисперсну фазу в ємності 1 необхідний забезпечення безперервного потоку твердих або рідких частинок із регульованою краном 12 витратою та для уникнення зворотного потоку.

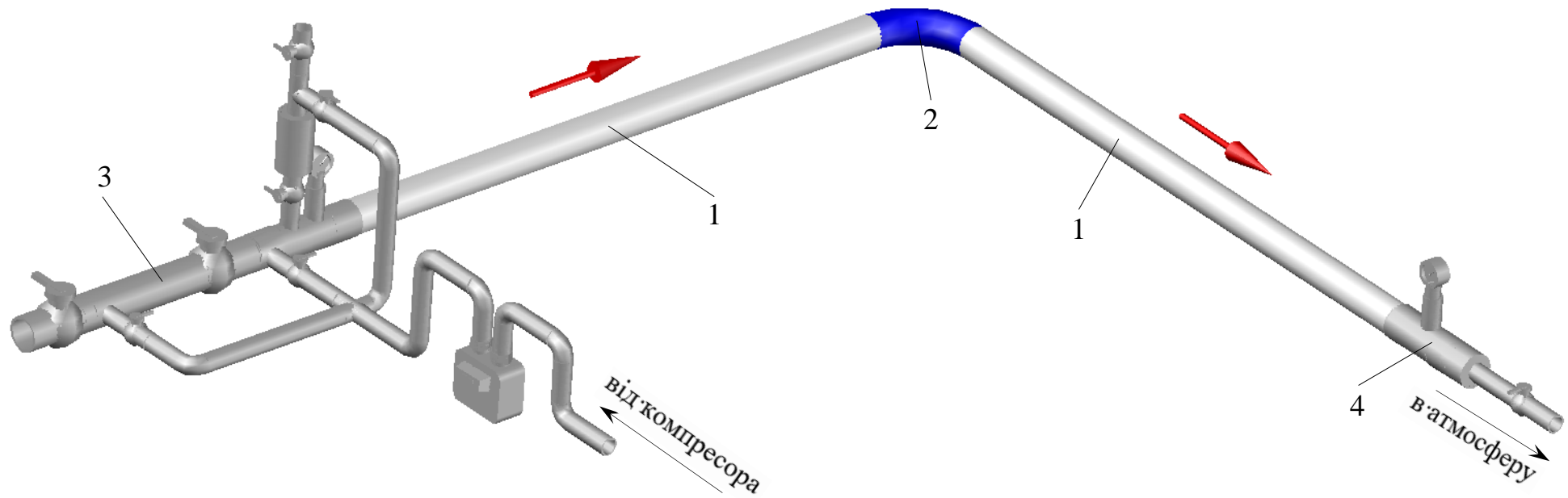


- 1 – скляна труба; 2 – прозорий пластиковий трійник; 3 – вузол запускання внутрішньотрубних засобів та дисперсних фаз у трубопровід; 4 – вузол приймання внутрішньотрубних засобів та випускання двофазного потоку з трубопроводу;  
5 – вузол випускання двофазного потоку з трубопроводу

**Рисунок 4.7** – Схема експериментального стенду для досліджень ерозійного зношування трійника

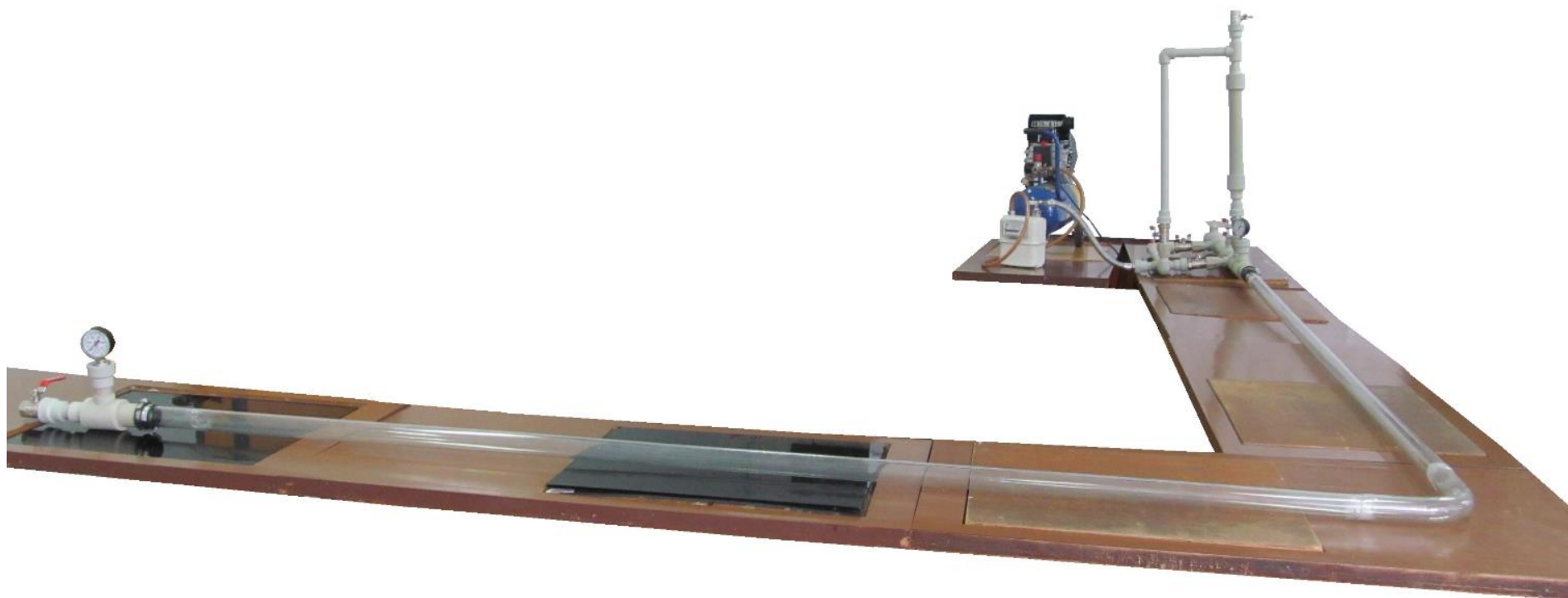


**Рисунок 4.8** – Експериментальний стенд для дослідження ерозійного зношування трійника

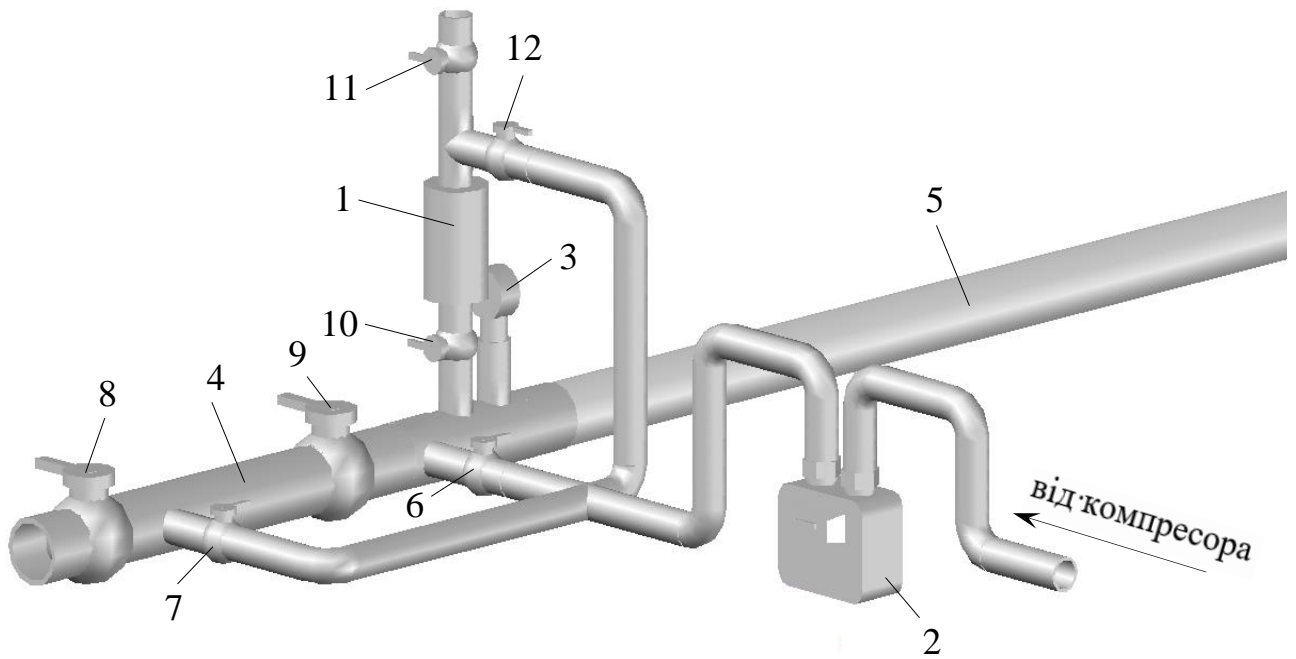


1 – скляна труба; 2 – скляний відвід; 3 – вузол запускання внутрішньотрубних засобів і дисперсних фаз у трубопровід;  
4 – вузол випускання двофазного потоку з трубопроводу

**Рисунок 4.9** – Схема експериментального стенду для дослідження ерозійного зношування відводу



**Рисунок 4.10** – Експериментальний стенд для досліджень ерозійного зношування відводу



1 – ємність для твердої та рідкої фази; 2 – газовий лічильник; 3 – манометр;  
4 – камера запускання; 5 – скляна труба; 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12 – кран

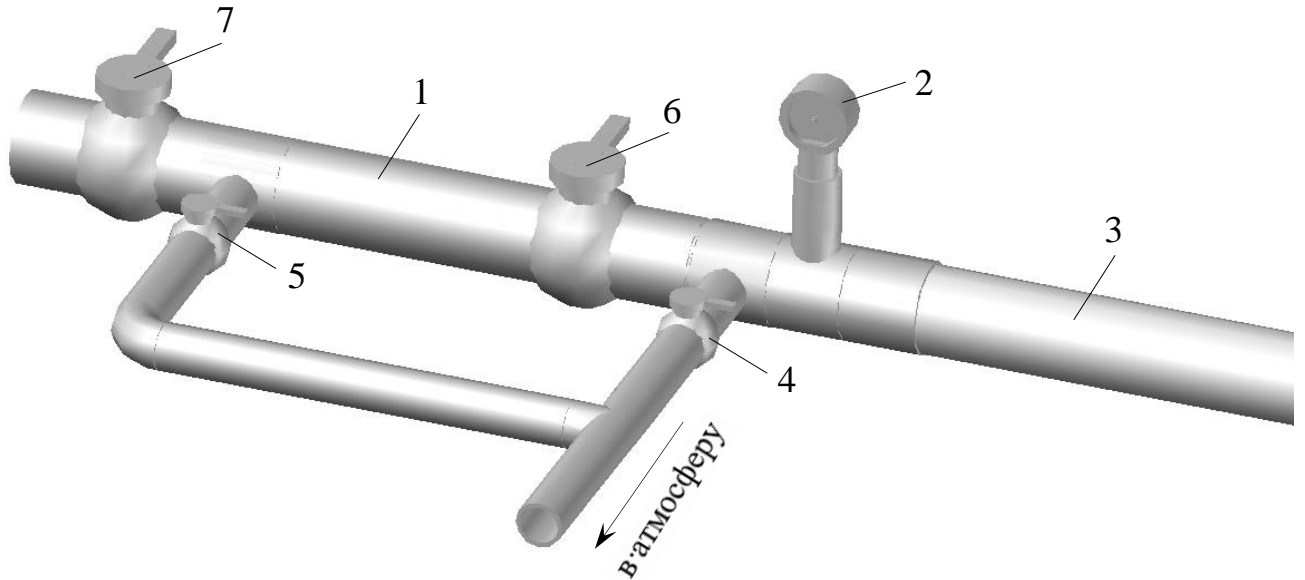
**Рисунок 4.11** – Схема вузла запускання внутрішньотрубних засобів та дисперсних фаз у трубопровід



**Рисунок 4.12** – Вузол запускання внутрішньотрубних засобів і дисперсних фаз у трубопровід

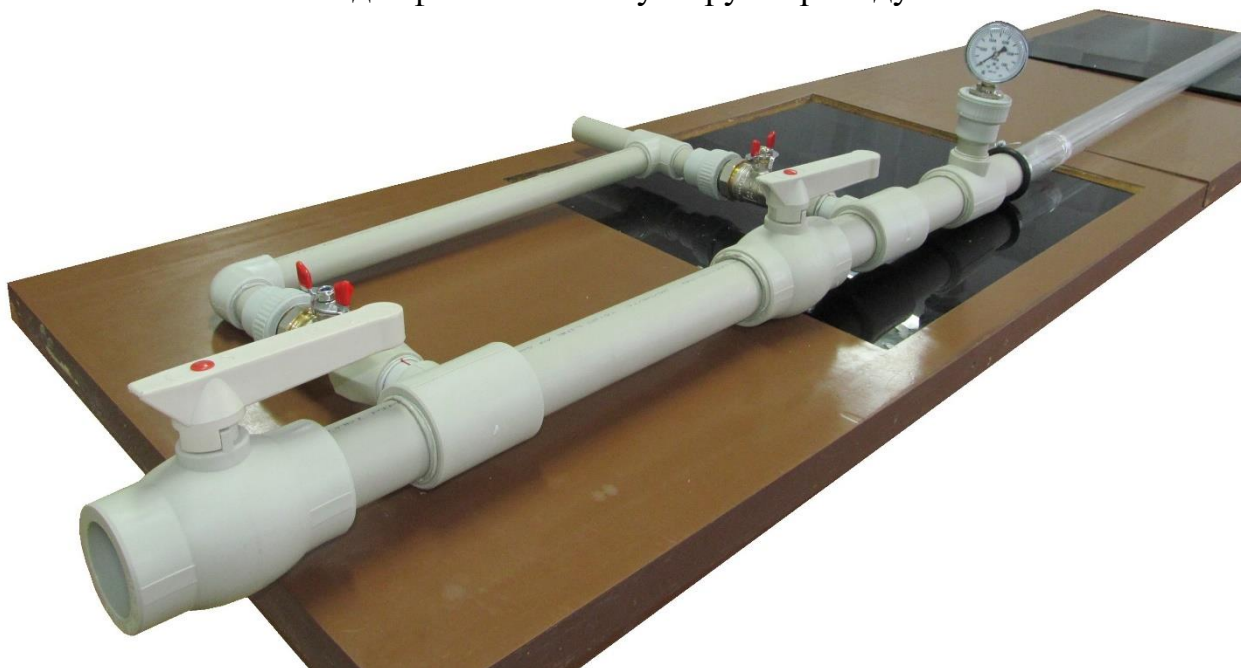


Вузол приймання внутрішньотрубних засобів і випускання двофазного потоку з трубопроводу (рисунок 4.13, рисунок 4.14) виготовлений із пластикових труб і фасонних елементів і складається з камери приймання 1, манометра 2, кранів 4, 5, 6, 7. Двофазний потік із трубопроводу в атмосферу випускають через кран 4.



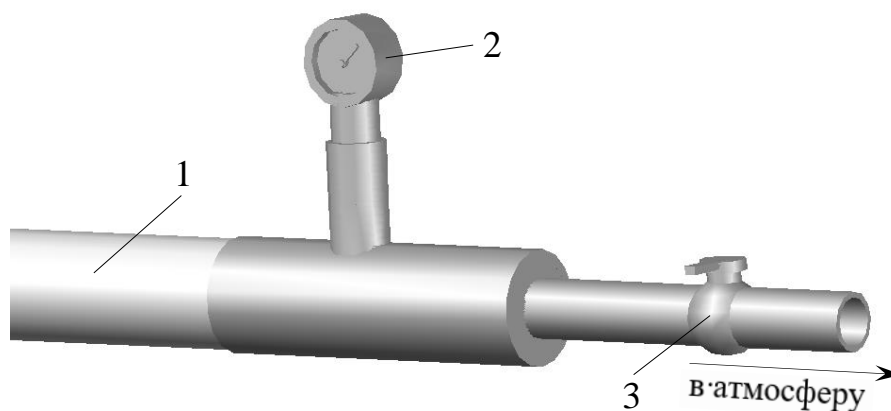
1 – камера приймання; 2 – манометр; 3 – скляна труба; 4, 5, 6, 7 – кран

**Рисунок 4.13** – Схема вузла приймання внутрішньотрубних засобів та випускання двофазного потоку з трубопроводу



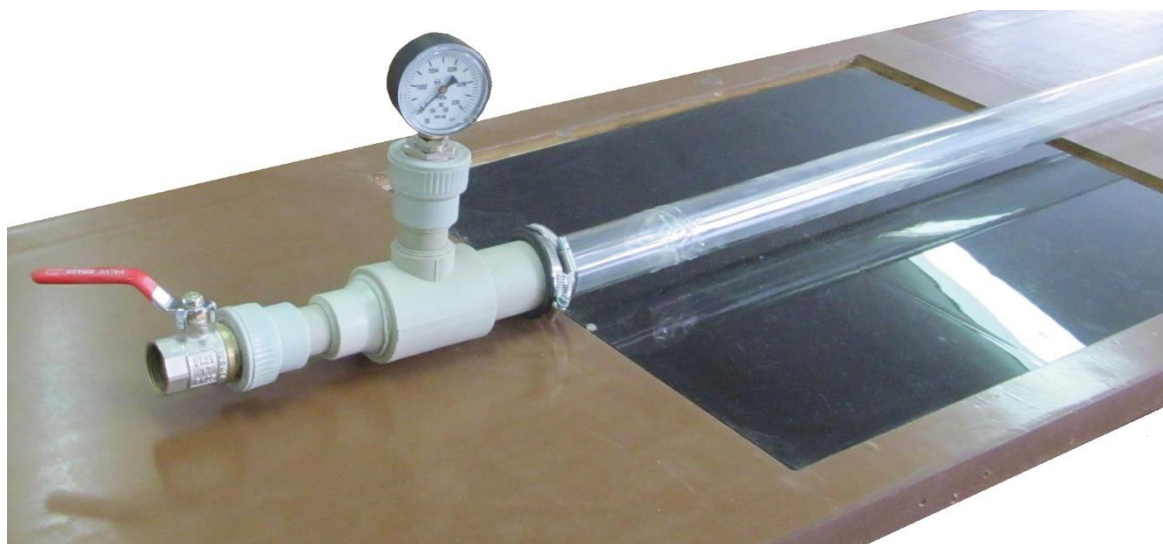
**Рисунок 4.14** – Вузол приймання внутрішньотрубних засобів та випускання двофазного потоку з трубопроводу

Вузол випускання двофазного потоку з трубопроводу (рисунок 4.15, рисунок 4.16) також виготовлений із пластикових труб і фасонних елементів і складається з манометра 1 і крана 2.



1 – скляна труба; 2 – манометр; 3 – кран

**Рисунок 4.15** – Схема вузла випускання двофазного потоку з трубопроводу



**Рисунок 4.16** – Вузол випускання двофазного потоку з трубопроводу

Стиснуте повітря подається від поршневого компресора з ресивером. Витрата повітря вимірюється лічильником GF-1 ОКТАВА, максимальна об'ємна витрата якого  $6,0 \text{ м}^3/\text{год}$ , мінімальна –  $0,04 \text{ м}^3/\text{год}$ . Межі допустимої відносної похибки лічильника  $\pm 2,0 \%$ . Тиск вимірюється манометром надлишкового тиску класу точності 2,5. Діапазон вимірювань тиску – від 0 до  $0,1 \text{ МПа}$ .

#### 4.2.2 Методика експериментальних досліджень

Експерименти виконуються з метою виявлення місць ерозійного зношування фасонних елементів трубопроводів. Для цього потрібно виявляти місця інтенсивного ерозійного зношування фасонних елементів.

Експериментальні дослідження виконувались таким чином. Відкриттям крану 6 вузла запускання внутрішньотрубних засобів та дисперсних фаз в трубопровід (рисунок 4.11) повітря подавалось від компресора в трубопровід. Витрата повітря на вході, яка визначає середню швидкість двофазного потоку, вимірювалась газовим лічильником 2, а тиск – манометром 3. Середня швидкість повітря в трубопроводі розраховувалась. Після чого, відкривши кран 11, засипали (заливали) дисперсну фазу в ємність для твердої та рідкої фази 1. Відкриттям кранів 10 і 12 дисперсна фаза запускалась в трубопровід.

Відкривши кран 11, засипалась (заливалась) дисперсна фаза в ємність для твердої та рідкої фази 1. Після досягнення необхідної витрати повітряного потоку трубопроводом кран 11 закривався, а відкриттям кранів 10 і 12 дисперсна фаза запускалась в трубопровід (рисунок 4.11). Витрата дисперсної фази визначалась шляхом фіксування часу, за який випорожниться ємність для твердої та рідкої фази 1 (рисунок 4.11). Швидкість дисперсної фази визначалась фіксування часу, за який частинка пролетить між приклеєними до скляної труби білими смужками.

Також під час експериментальних досліджень вимірювався тиск у місці випускання двофазного потоку з трубопроводу манометром 2, вузла приймання внутрішньотрубних засобів і випускання двофазного потоку з трубопроводу (рисунок 4.13) та вузла випускання двофазного потоку з трубопроводу (рисунок 4.15).

За рухом дисперсної фази в потоці повітря прозорим трубопроводом і прозорими фасонними елементами велось візуальне спостереження.

Швидкість дисперсної фази визначалась фіксування часу, за який частинка пролетить між приклеєними до скляної труби білими смужками.

В якості твердих частинок використовувався кварцовий пісок. У трубопровід подавався кварцовий пісок з різними розміри зерен. Із вузлів випускання двофазний потік виходить в атмосферу.

Експериментальні дослідження виконувались при заданій витраті повітря  $0,015 \text{ м}^3/\text{с}$ , масовій витраті дисперсної фази  $34 \text{ г/с}$ , температурі довкілля  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Експериментальні дослідження ерозійного зношування трійника виконувались для різних схем руху потоку:

– потік рухається магістраллю трійника і з магістралі частина потоку перетікає у відгалуження трійника (рисунок 4.7);

– потік рухається магістраллю трійника і з магістралі повністю перетікає у відгалуження трійника (рисунок 4.17, а);

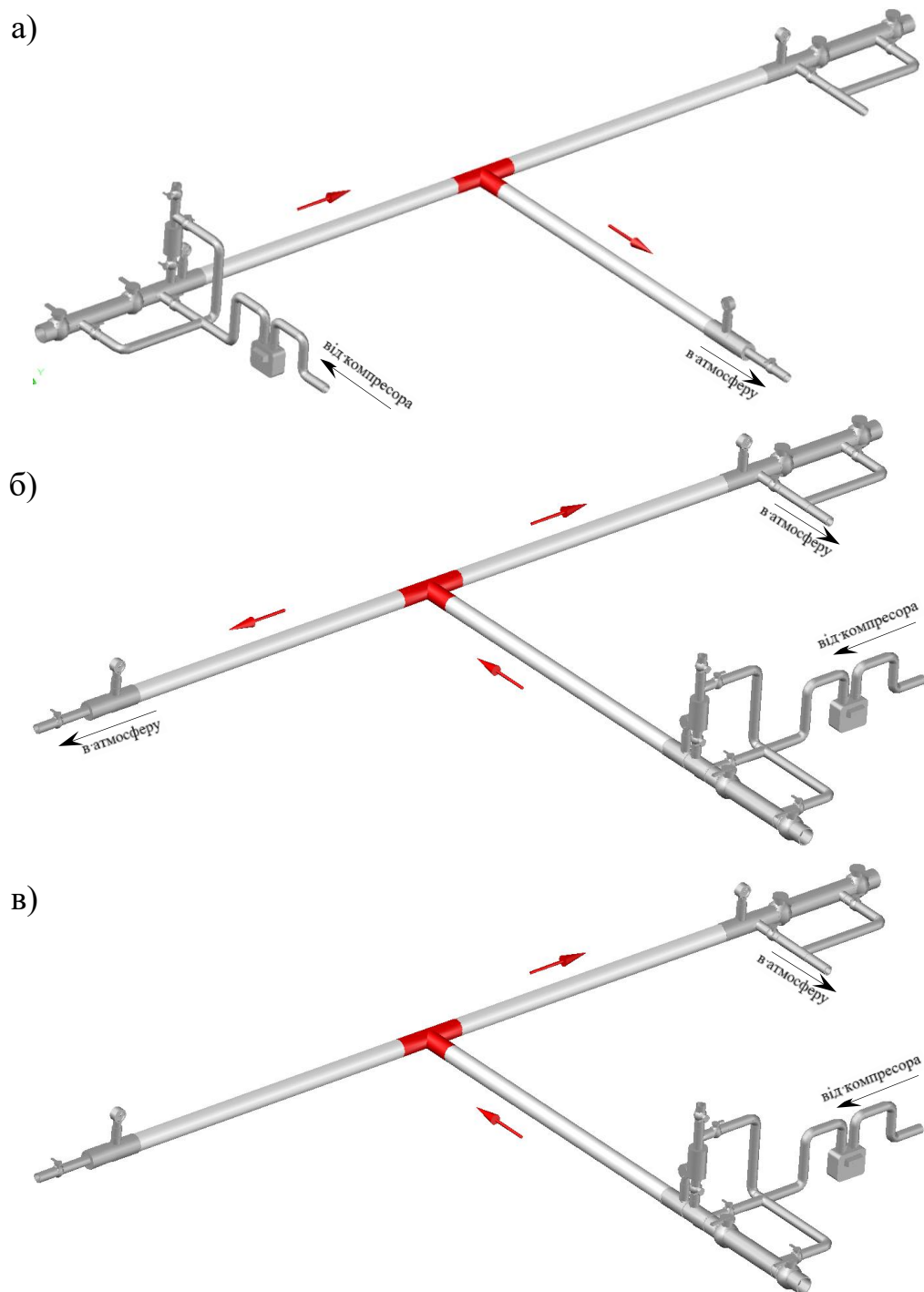
– потік рухається відгалуженням трійника і з відгалуження перетікає у магістраль трійника, де частина потоку рухається в одну сторону магістралі, а інша частина – в іншу сторону магістралі (рисунок 4.17, б);

– потік рухається відгалуженням трійника і з відгалуження перетікає у одну з сторін магістралі (рисунок 4.17, в).

Зміна схем руху потоку виконувалась зміною конфігурації стенду. Це було можливо завдяки тому, що скляні труби, прозорий пластиковий трійник, вузли запускання-приймання внутрішньотрубних засобів і дисперсних фаз були з'єднані одне з одним муфтами з резиновими прокладками, які легко знімаються.

Для виявлення місць ерозійного зношування фасонних елементів трубопроводів внутрішня поверхня відводу, трійника фарбувалась трьома шарами червоної акрилової фарби (рисунок 4.18). Щоб фарбу нанести рівномірним шаром однакової товщини, один із кінців фасонного елемента заглушувувався і в нього наливалась акрилова фарба.

Місце інтенсивного ерозійного зношування фасонних елементів трубопроводів визначалось шляхом виявленням місць внутрішньої поверхні фасонного елемента з видаленою двофазним потоком фарбою.



а) – потік рухається магістраллю трійника і з магістралі направляється у відгалуження трійника; б) – потік рухається відгалуженням трійника і з відгалуження направляється у магістраль трійника, де частина потоку перетікає в одну сторону магістралі, а інша частина в іншу сторону магістралі; в) – потік рухається відгалуженням трійника і з відгалуження направляється у одну з сторін магістралі

**Рисунок 4.17** – Схеми експериментальних досліджень руху двофазних потоків трійником



**Рисунок 4.18** – Пофарбовані акриловою фарбою фасонні елементи трубопроводу

Для підвищення точності кожен експеримент повторювався тричі. Після кожного експерименту вимірювались місце або місця з видаленою фарбою, здійснювалось їх фотофіксування. Тоді фасонний елемент видалявся з експериментального стенду, очищувався від акрилової фарби та заново фарбувався. Після висихання фарби експеримент повторювався.

#### **4.2.3 Результати експериментальних досліджень**

Для якісного обстеження фасонних елементів трубопроводів важливо знати місце їх ерозійного зношування, оскільки зміщення ультразвукового первинного перетворювача тільки на кілька сантиметрів від місця ерозійного зношування може призвести до суттєвого зниження якості обстеження фасонних елементів. Для визначення місця ерозійного зношування фасонних елементів трубопроводів, в найперше, необхідно виявити місця ударяння дисперсної фази в стінки фасонних елементів. Тому експериментальні дослідження полягають у визначенні місць

ударення дисперсної фази до стінки фасонних елементів, місць їх ерозійного зношування.

На рисунку 4.19 наведені фотографій фасонних елементів із видаленою двофазним потоком фарбою. Місце інтенсивного ерозійного зношування відводу (рисунок 4.19, а) розміщене з опуклого його боку в кінці заокругленої частини



а) – відвід; б) – трійник, у якому потік рухається магістраллю трійника і з магістралі частина потоку спрямовується у відгалуження трійника; в) – трійник, у якому потік рухається магістраллю трійника і з магістралі весь потік спрямовується у відгалуження трійника; г) – трійник, у якому потік рухається відгалуженням трійника і з відгалуження увесь потік спрямовується в одну сторону магістралі трійника

**Рисунок 4.19** – Результати експериментальних досліджень ерозійного зношування фасонних елементів трубопроводів

відводу. Таке місцезнаходження інтенсивного ерозійного зношування відводу свідчить, що потік повітря впливає на рух частинок піску відводом і переважна їх більшість ударяється до стінки відводу не в середині заокругленої його частини з опуклого боку, а в кінці.

У трійнику, в якому потік рухається магістраллю трійника і з магістралі частина потоку спрямовується у відгалуження трійника (рисунк 4.19, б), місце інтенсивного ерозійного зношування розміщене і в магістралі, і в відгалуженні трійника. В магістралі трійника місце ерозійного зношування розміщене з правої сторони відгалуження трійника.

У трійнику, в якому потік рухається магістраллю трійника і з магістралі весь потік спрямовується у відгалуження трійника (рисунк 4.19, в), місце інтенсивного ерозійного зношування розміщене і в магістралі, і в відгалуженні трійника. Як і в попередньому випадку, в магістралі трійника місце ерозійного зношування розміщене з правої сторони відгалуження трійника.

У трійнику, в якому потік рухається відгалуженням трійника і з відгалуження весь потік спрямовується в одну сторону магістралі трійника (рисунк 4.19, г), місце інтенсивного ерозійного зношування розміщене в магістралі трійника навпроти відгалуження і має грушоподібну форму. Кругла частина грушоподібного місця ерозійного зношування майже повністю співпадає з проекцією відгалуження трійника на внутрішню стінку його магістралі. Витягнута частина грушоподібного місця ерозійного зношування простягається в напрямку руху потоку магістраллю трійника. [70]

Комплексний аналіз результатів експериментальних досліджень фасонних елементів трубопроводних систем шляхом їх поєднання з результатами моделювань руху багатофазних потоків такими елементами, результатами моделювань ерозійного зношування наведений у додатку Б.



### 4.3 Дослідження впливу геометричних параметрів відводів на їх ерозійне зношування

Вплив геометричних параметрів відводів (діаметр відводу  $D_{з.в}$ , радіус вигину  $R_в$  і кут вигину  $\varphi$  (рисунок 2.4)) на ерозійні процеси у відводах трубопроводів не достатньо вивчений. Щоб дослідити їх вплив на місцезнаходження і величину ерозійного зношування, було накреслено тривимірні моделі внутрішньої порожнини відводів, конструкція та геометричні розміри яких ідентичні промисловим зразкам і відповідають ТУ У 27.2-05747991-001 [257], ГазТУ 102-488/1 [258] та ОСТ 102-61 [259]. Було вибрано п'ять різних зовнішніх діаметрів відводів – 89 мм, 219 мм, 530 мм, 1020 мм і 1420 мм. Для діаметру 530 мм були накреслені відводи з радіусом вигину DN (DN – умовний діаметр відводу) та кутами вигину  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$  і  $90^\circ$ , а також із кутом вигину  $90^\circ$  і радіусами вигину DN, 1,5 DN, 2 DN, 2,5 DN та 3,5 DN. Відводи були накреслені з прилеглими ділянками труб.

Моделювання було виконано для піску, котрий є однією з найбільших загроз цілісності відводів промислових газопроводів, якими газ транспортують від свердловин до систем очистки. Особливо це стосується транспортування сланцевого газу на ранніх стадіях видобування, коли швидкість газового потоку є максимальною. Також він є у внутрішній порожнині магістральних газопроводів. Розміри частинок було визначено експериментально – шляхом дослідження відібраних із внутрішньої порожнини газопроводів взірців. Гранулометричний склад взірців було визначено за допомогою комплекту сит із різним діаметром отворів. Виміряна густина піску складає  $2803 \text{ кг/м}^3$ .

Суцільною фазою був вибраний природний газ. Швидкість газового потоку на вході у відвід задавалась рівною 13 м/с. Швидкість і температура частинок дисперсної фази на вході в відвід приймалась рівною швидкості та температурі суцільної фази на вході. Температура суцільної фази відповідала умовам експлуатації газопроводів і задавалась 273 К. Дисперсна фаза вводилась рівномірно на вході і задавалась сферичної форми діаметром, рівним 0,1 мм. Витрата піску на

вході в відвід задавалась рівною 0,001 кг/с.

Результати CFD моделювання візуалізовувались у постпроцесорі ANSYS Fluent побудовою полів швидкості ерозійного зношування на контурах відводів. Це дозволило виявити місця та визначити величину максимального ерозійного зношування відводів.

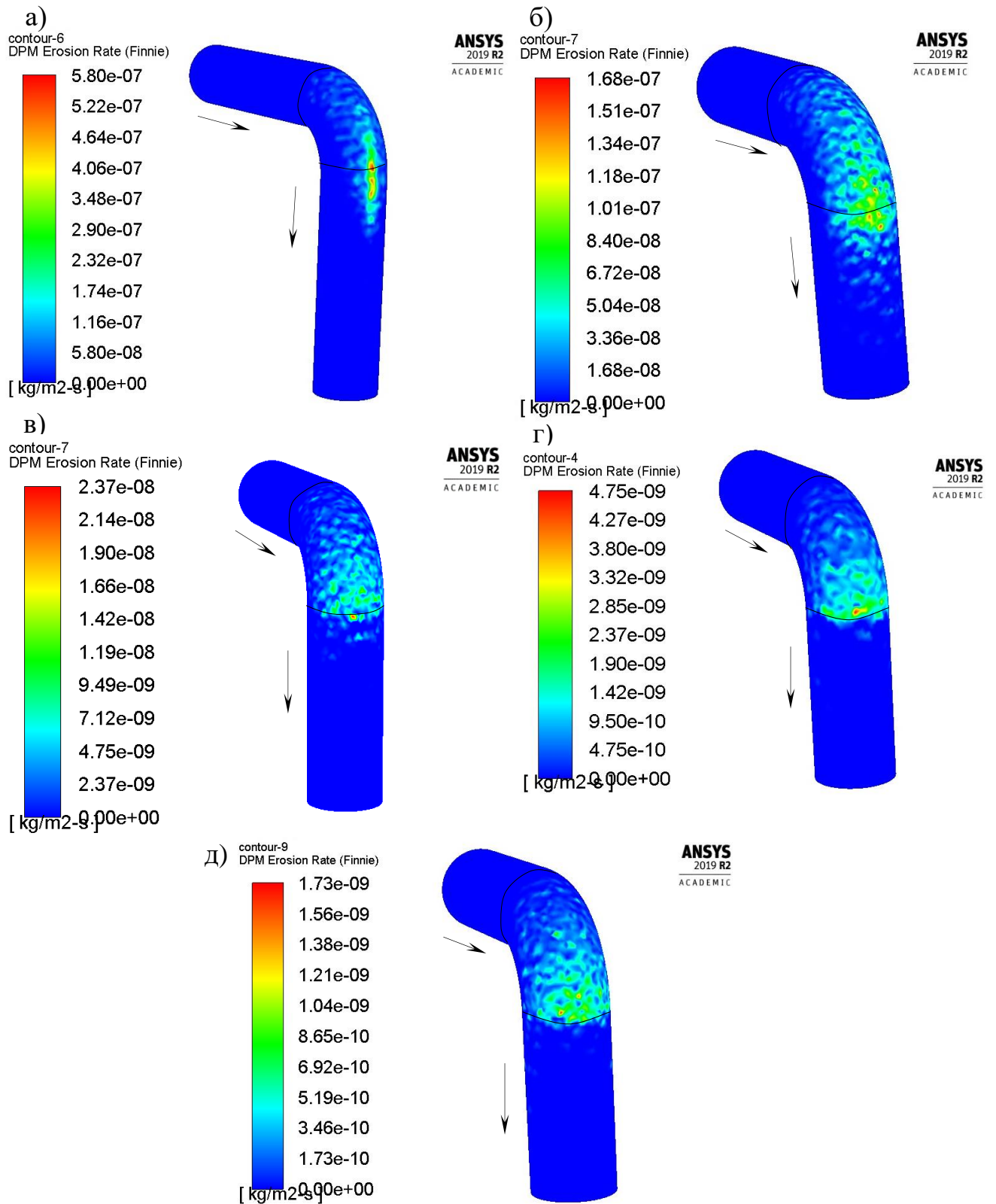
Щоб встановити вплив діаметра відводу газопроводу на величину і місце його ерозійного зношування, досліджувались відводи зовнішнім діаметром 89 мм, 219 мм, 530 мм, 1020 мм і 1420 мм.

Результати CFD моделювання (рисунок 4.20) показують, що інтенсивне ерозійне зношування відбувається з опуклого боку відводу в місці виходу з нього газового потоку (між кутом  $60^\circ$  і  $90^\circ$  відводу) та на початку привареної до відводу труби в напрямку руху продукту. Причому зі зменшенням діаметра відводу поле максимального ерозійного зношування все більше поширюється на приварену до відводу трубу. Для діаметру відводу 89 мм його довжина на привареній до відводу трубі настільки ж велика, як і на відводі.

Діаметр відводу газопроводу має значний вплив на величину його ерозійного зношування за всіх інших незмінних параметрів. При зменшенні діаметра відводу спостерігається різке збільшення величини ерозійного зношування (рисунок 4.21). Якщо діаметр відводу газопроводу зменшується від 1420 мм до 89 мм величина максимальної швидкості ерозійного зношування відводів збільшується від  $1,73 \cdot 10^{-9}$  кг/м<sup>2</sup>·с до  $5,8 \cdot 10^{-7}$  кг/м<sup>2</sup>·с. Причому найбільше збільшення максимальної швидкості ерозійного зношування відбувається тоді коли діаметр відводу менший 530 мм.

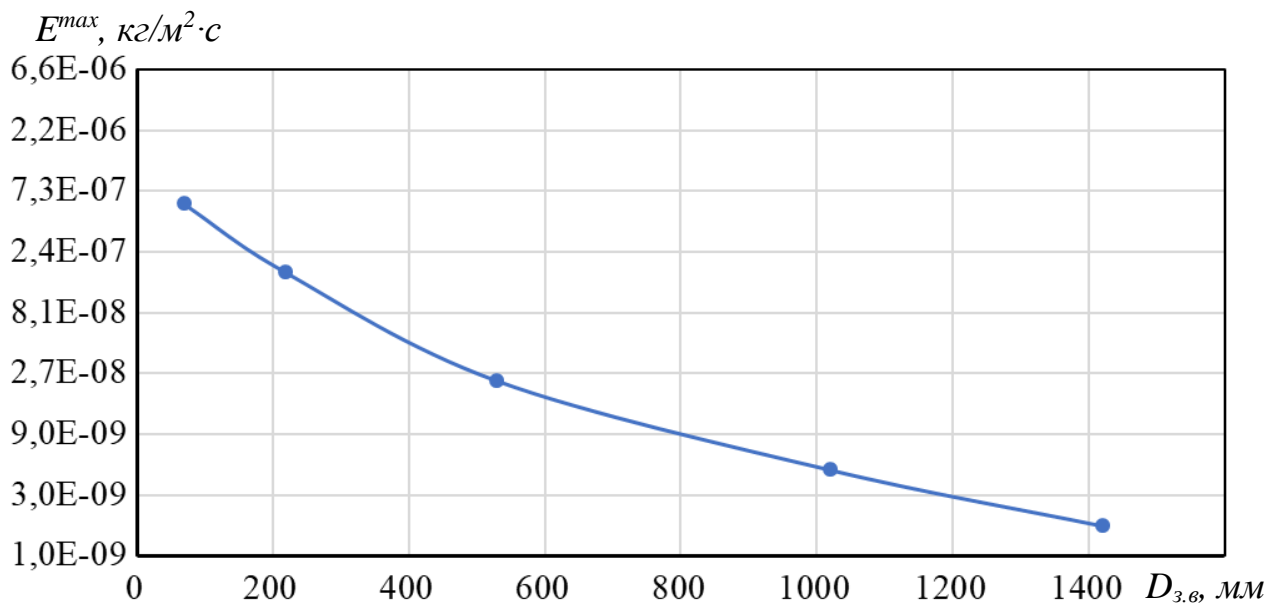
Щоб встановити вплив кута вигину відводу газопроводу на величину і місце його ерозійного зношування, досліджувались відводи зовнішнім діаметром 530 мм з кутами вигину  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$  і  $90^\circ$ .

На основі результатів CFD моделювання (рисунок 4.22) визначено, що з зменшенням кута вигину відводу поле максимального ерозійного зношування все більше зміщується від місця виходу з відводу газового потоку до середини опуклого боку відводу. Так, якщо кут вигину відводу складає  $90^\circ$ , то поле його



а) –  $D_{3,6}=89$  мм; б) –  $D_{3,6}=219$  мм; в) –  $D_{3,6}=529$  мм; г) –  $D_{3,6}=1020$  мм;  
 д) –  $D_{3,6}=1420$  мм

**Рисунок 4.20** – Поля швидкості ерозійного зношування на контурах відводів різних діаметрів



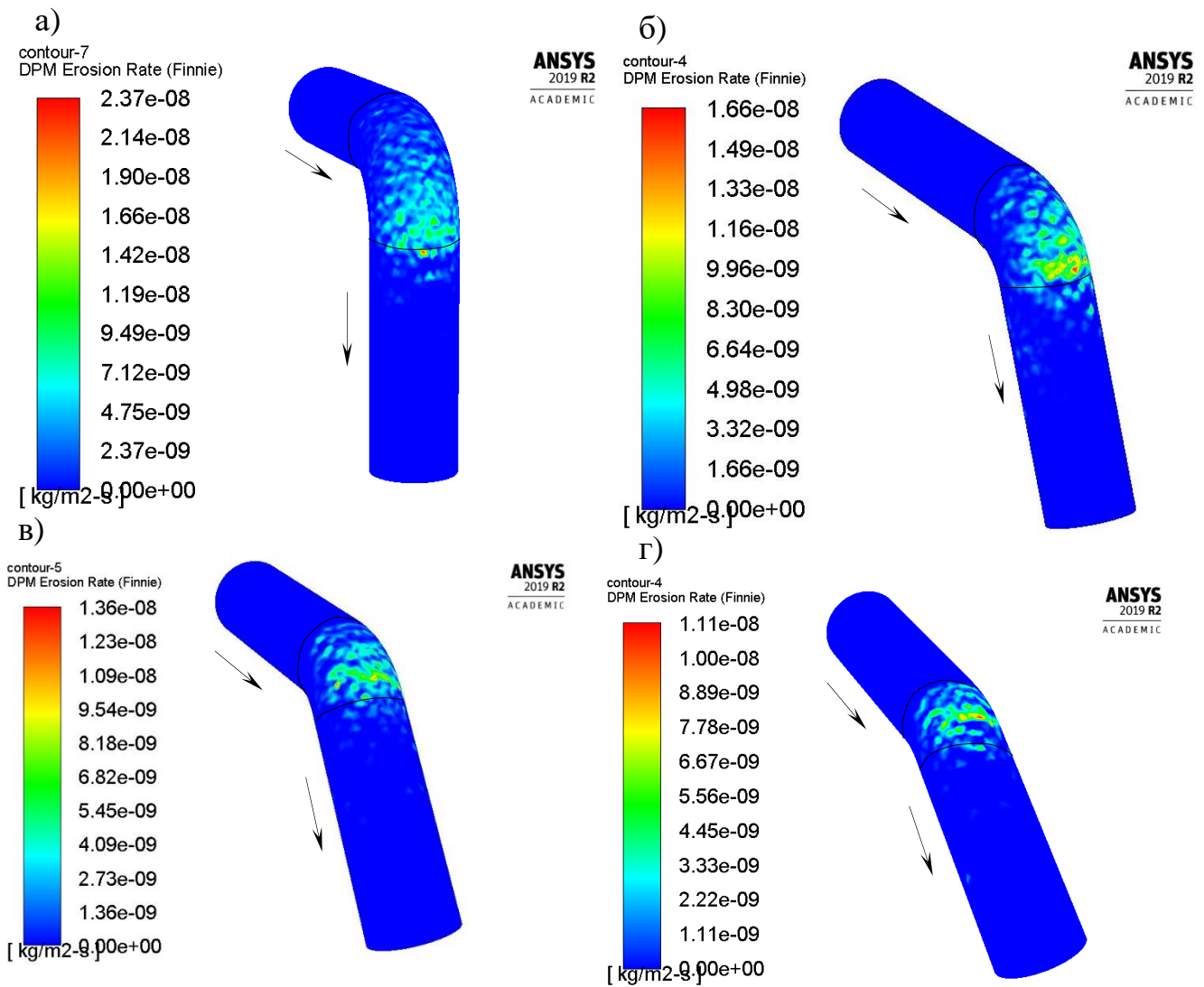
**Рисунок 4.21** – Залежність максимальної швидкості ерозійного зношування від зовнішнього діаметра відводу

максимального ерозійного зношування розташоване в місці виходу з відводу газового потоку та на початку привареної до відводу труби. Якщо ж кут вигину відводу складає  $30^\circ$ , то поле його максимального ерозійного зношування вже зосереджено в середній частині опуклого боку відводу.

Кут вигину відводу газопроводу не має значного впливу на величину його ерозійного зношування за всіх інших незмінних параметрів. При зменшенні кута вигину відводу спостерігається незначне зменшення величини його ерозійного зношування (рисунок 4.23). Якщо кут вигину відводу газопроводу зменшується від  $90^\circ$  до  $30^\circ$ , величина максимальної швидкості ерозійного зношування відводів зменшується від  $2,37 \cdot 10^{-8} \text{ кг/м}^2 \cdot \text{с}$  до  $1,11 \cdot 10^{-8} \text{ кг/м}^2 \cdot \text{с}$ .

Щоб встановити вплив радіуса вигину відводу газопроводу на величину і місце його ерозійного зношування, досліджувались відводи зовнішнім діаметром 530 мм з радіусами вигину рівним DN, 1,5 DN, 2 DN, 2,5 DN та 3,5 DN.

Результати CFD моделювання (рисунок 4.24) показують, що з збільшенням радіуса вигину відводу поле максимального ерозійного зношування з опуклого боку відводу все більше зміщується від місця виходу з відводу газового потоку до місця входу газового потоку в відвід. Так, якщо радіус вигину відводу рівний DN,

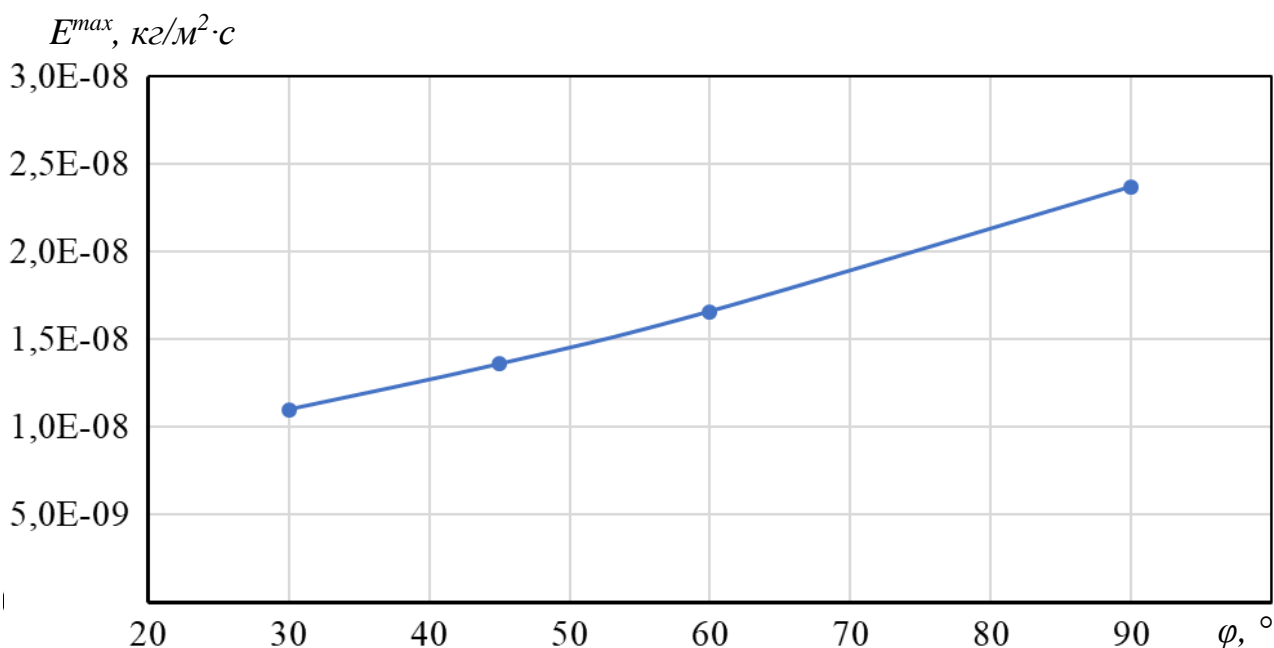


а) –  $\varphi=90^\circ$ ; б) –  $\varphi=60^\circ$ ; в) –  $\varphi=45^\circ$ ; г) –  $\varphi=30^\circ$

**Рисунок 4.22** – Поля швидкості ерозійного зношування на контурах відводів різних кутів вигину

то поле його максимального ерозійного зношування розташоване в місці виходу з відводу газового потоку і на початку привареної до відводу труби. Якщо ж радіус вигину відводу рівний 2 DN, то поле його максимального ерозійного зношування уже зосереджено в середній частині опуклого боку відводу. І якщо радіус вигину відводу рівний 3,5 DN, то поле його максимального ерозійного зношування розміщене найближче до входу газового потоку в відвід.

Радіус вигину відводу газопроводу впливає на величину його ерозійного зношування за всіх інших незмінних параметрів. При збільшенні радіуса

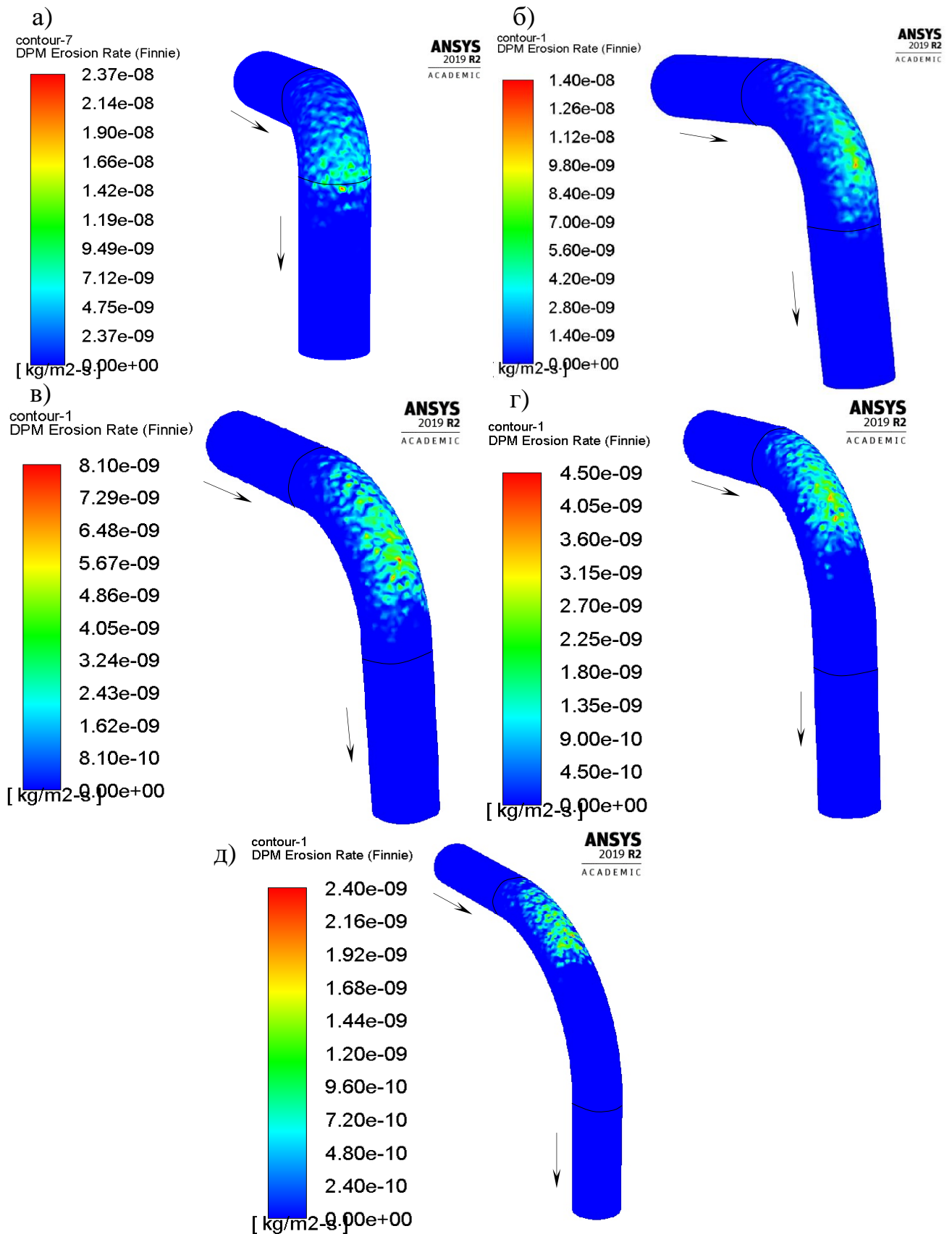


**Рисунок 4.23** – Залежність максимальної швидкості ерозійного зношування від кута вигину відводу

вигину відводу газопроводу спостерігається зменшення величини його ерозійного зношування (рисунок 4.25). Якщо радіус вигину відводу газопроводу збільшується від DN до 3,5 DN, величина максимальної швидкості ерозійного зношування відводу зменшується від  $2,37 \cdot 10^{-8}$   $\text{кг}/\text{м}^2 \cdot \text{с}$  до  $2,4 \cdot 10^{-9}$   $\text{кг}/\text{м}^2 \cdot \text{с}$ . [67]

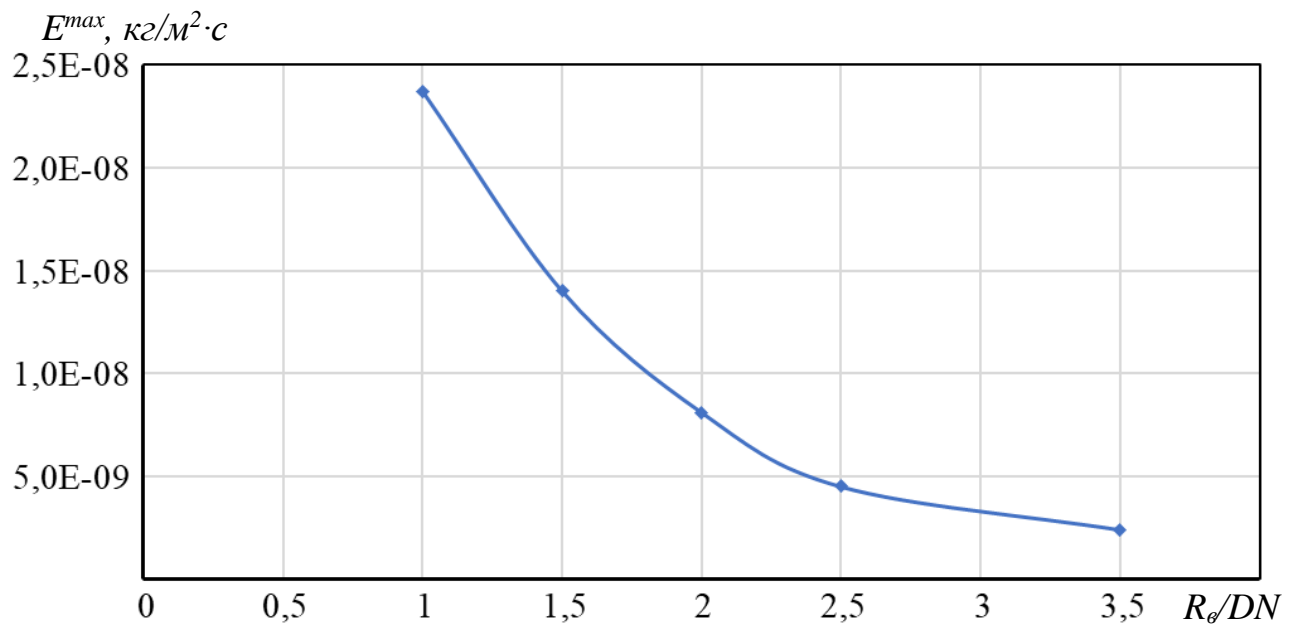
#### **4.4 Дослідження впливу параметрів багатофазних потоків на ерозійне зношування відводів**

Процес ерозійного зношування відводів є достатньо складним, оскільки місцезнаходження та величина ерозійних дефектів залежить від багатьох параметрів багатофазних трубопровідних потоків. Зокрема, густини транспортованого продукту та його швидкості, швидкості дисперсної фази та її властивостей, розміру частинок дисперсної фази, інтенсивності турбулентності, кута атаки. Якщо відомий ступінь впливу кожного з цих параметрів на величину та місцезнаходження ерозійного зношування відводів, можна розробити ефективні заходи для зменшення ерозії. Тому доцільним є розрахунок швидкості ерозії



а) –  $R_e=DN$ ; б) –  $R_e=1,5 DN$ ; в) –  $R_e=2 DN$ ; г) –  $R_e=2,5 DN$ ; д) –  $R_e=3,5 DN$

**Рисунок 4.24** – Поля швидкості ерозійного зношування на контурах відводів різних радіусів вигину



**Рисунок 4.25** – Залежність максимальної швидкості ерозійного зношування від відношення радіуса вигину відводу до номінального діаметра відводу

відводів газопроводів при різних параметрах двофазних потоків.

Величина ерозійного зношування відводів газопроводів найбільшою мірою залежить від таких параметрів двофазного потоку:

- швидкості газового потоку, від якої у значною мірою залежить швидкість дисперсних частинок і їх сила вдаряння з стінкою;
- розмір дисперсних частинок;
- витрата дисперсних частинок.

Для дослідження впливу кожного з цих параметрів на величину ерозійного зношування було вибрано відвід газопроводу зовнішнім діаметром 530 мм із кутом вигину  $90^\circ$  і радіусом вигину, рівним DN (DN – умовний діаметр відводу). У такому відводі відбувається найрізкіша зміна напрямку газового потоку і ерозійне зношування буде максимальним. Суцільною фазою вибирався природний газ. Тиск на виході відводу задавався рівним 5 МПа. Дисперсною фазою вибирався пісок, характеристики якого такі ж, як у підрозділі 4.4.1.

Результати моделювання візуалізовувались у постпроцесорі ANSYS Fluent, що дало змогу виявити місця та визначити величину максимального ерозійного зношування відводів.



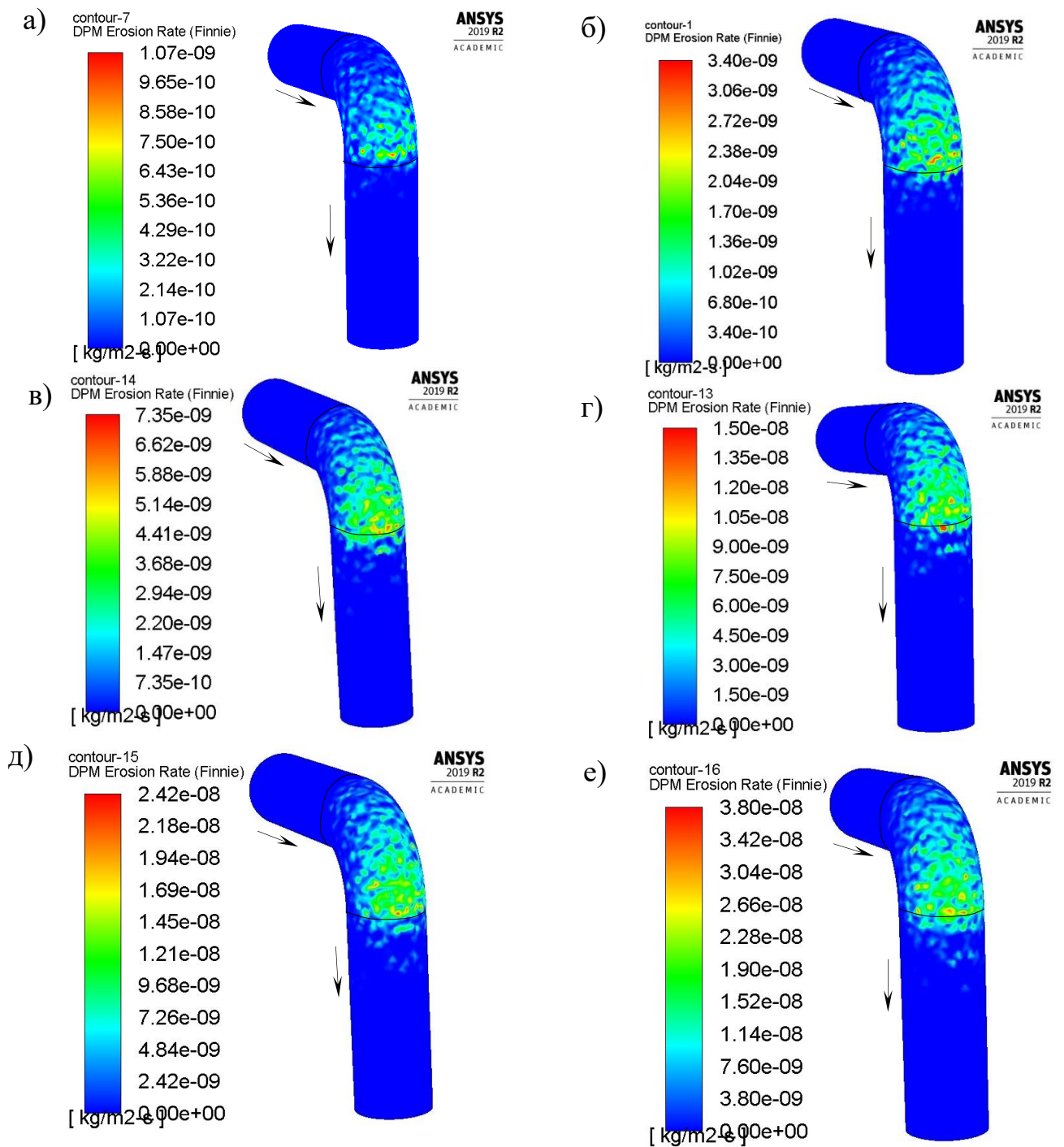
Щоб встановити вплив швидкості газового потоку  $V$  на величину і місцезнаходження ерозійного зношування відводу, на вході вона змінювалась в межах від 4 м/с до 19 м/с з кроком 3 м/с. Мінімальна швидкість газового потоку на вході у відвід приймалась рівною 4 м/с, оскільки в [150] було визначено, що наближено такою є мінімальна швидкість потоку, при якій тверді частинки будуть переміщуватись трубопроводом. Витрата піску на вході в відвід задавалась рівною 0,001 кг/с, діаметр зерен піску – 0,1 мм.

Результати CFD моделювання (рисунок 4.26) показують, що інтенсивне ерозійне зношування відбувається з опуклого боку відводу в місці виходу з нього газового потоку (між кутом  $60^\circ$  і  $90^\circ$  відводу) та на початку привареної до відводу труби в напрямку руху продукту. Зі збільшенням швидкості газового потоку значної зміни місцезнаходження поля максимального ерозійного зношування не відбувається.

Швидкість газового потоку має значний вплив на величину ерозійного зношування відводу за усіх інших незмінних параметрів. При збільшенні швидкості газового потоку на вході у відвід спостерігається різке експоненціальне зростання величини ерозійного зношування (рисунок 4.27). Причиною цього є те, що більша швидкість дисперсних частинок збільшує їх кінетичну енергію. Якщо швидкість газового потоку збільшується від 4 м/с до 19 м/с, величина максимальної швидкості ерозійного зношування відводів збільшується від  $1,07 \cdot 10^{-9}$  кг/м<sup>2</sup>·с до  $3,8 \cdot 10^{-8}$  кг/м<sup>2</sup>·с. Причому, якщо швидкість газового менша 10 м/с значного збільшення швидкості ерозійного зношування не відбувається.

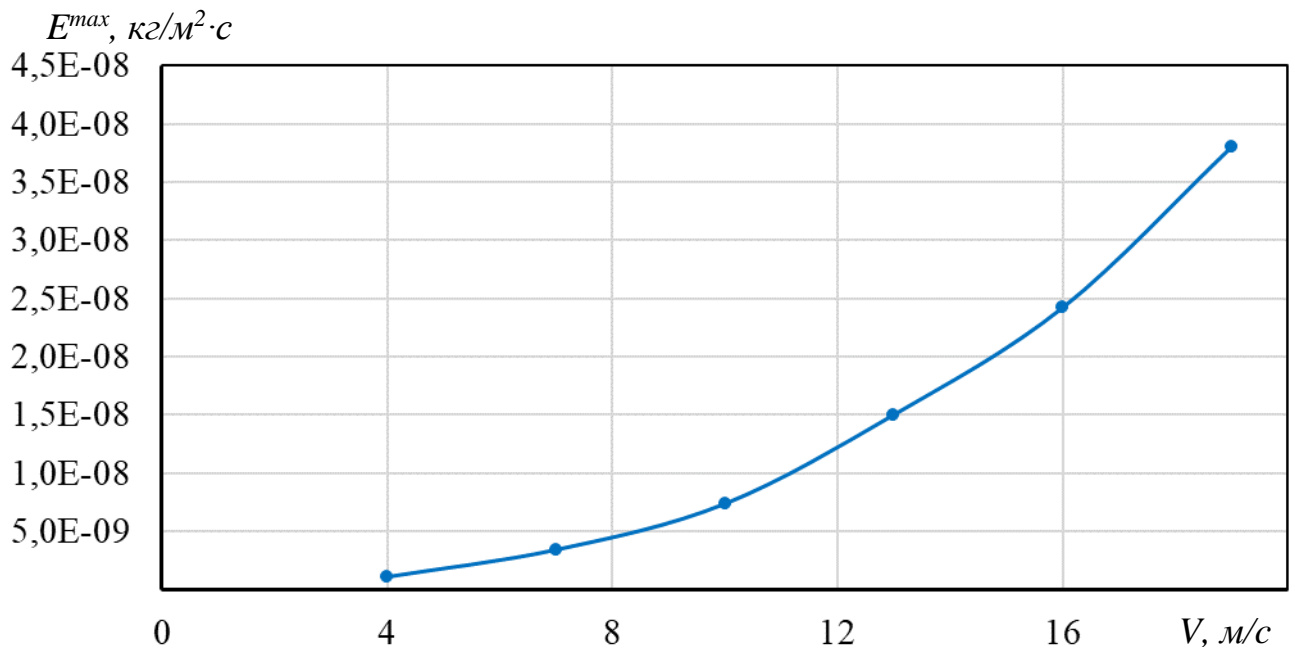
Щоб встановити вплив розміру дисперсних частинок на величину і місцезнаходження ерозійного зношування відводу, діаметр зерен піску  $d_p$  змінювався і приймався рівним 0,005 мм, 0,01 мм, 0,05 мм, 0,1 мм, 0,5 мм і 1,0 мм. Швидкість газового потоку на вході у відвід задавалась рівною 13 м/с, а витрата піску 0,001 кг/с.

Результати CFD моделювання (рисунок 4.28) показують, що діаметр дисперсних частинок має значний вплив на місцезнаходження поля максимального ерозійного зношування відводу. За малих діаметрів дисперсних частинок



а) –  $V=4$  м/с; б) –  $V=7$  м/с; в) –  $V=10$  м/с; г) –  $V=13$  м/с; д) –  $V=16$  м/с; е) –  $V=19$  м/с

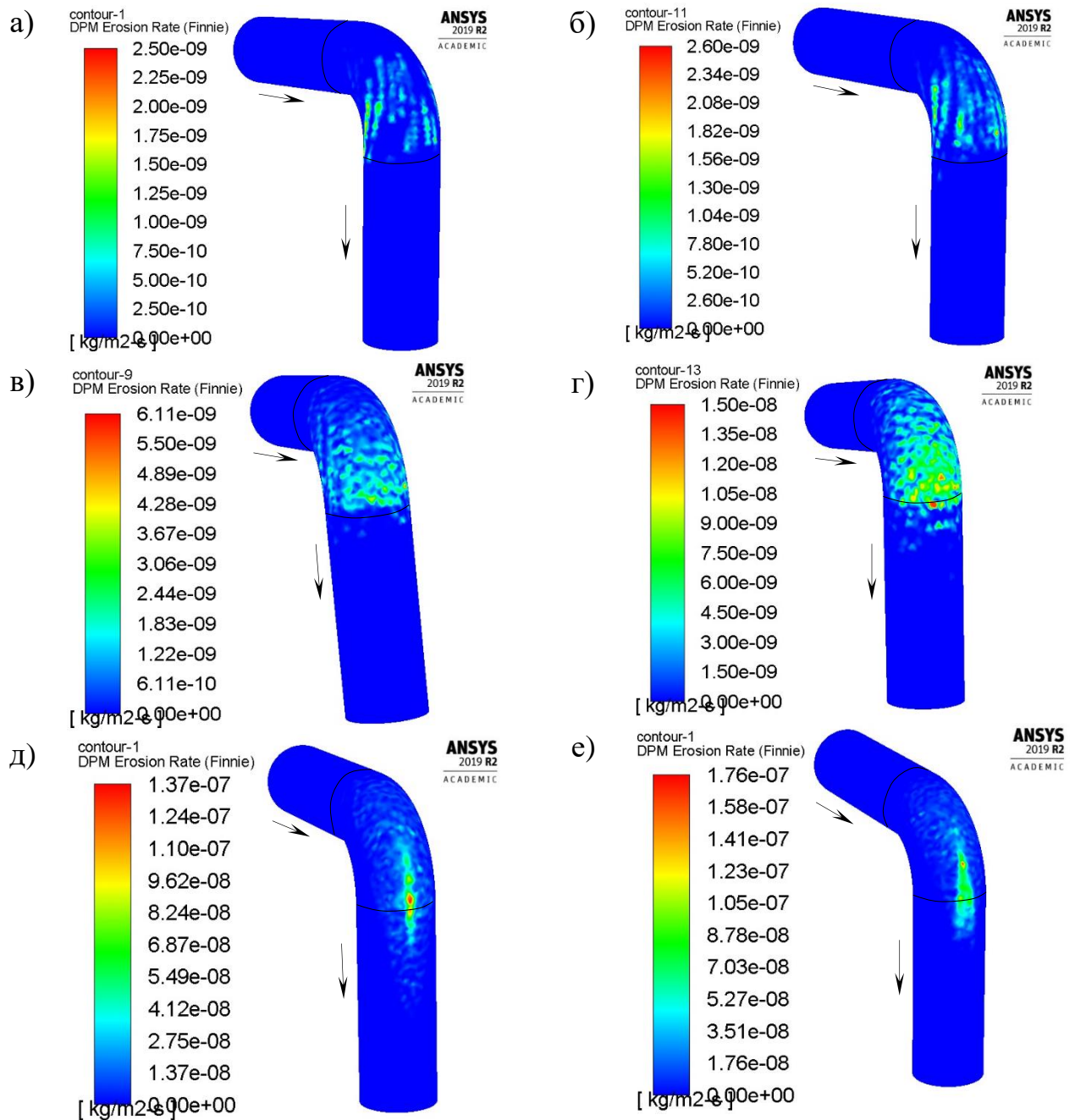
**Рисунок 4.26** – Поля швидкості ерозійного зношування на контурах відводів для різних швидкостей газового потоку на вході у відвід



**Рисунок 4.27** – Залежність максимальної швидкості ерозійного зношування від швидкості газового потоку на вході у відвід

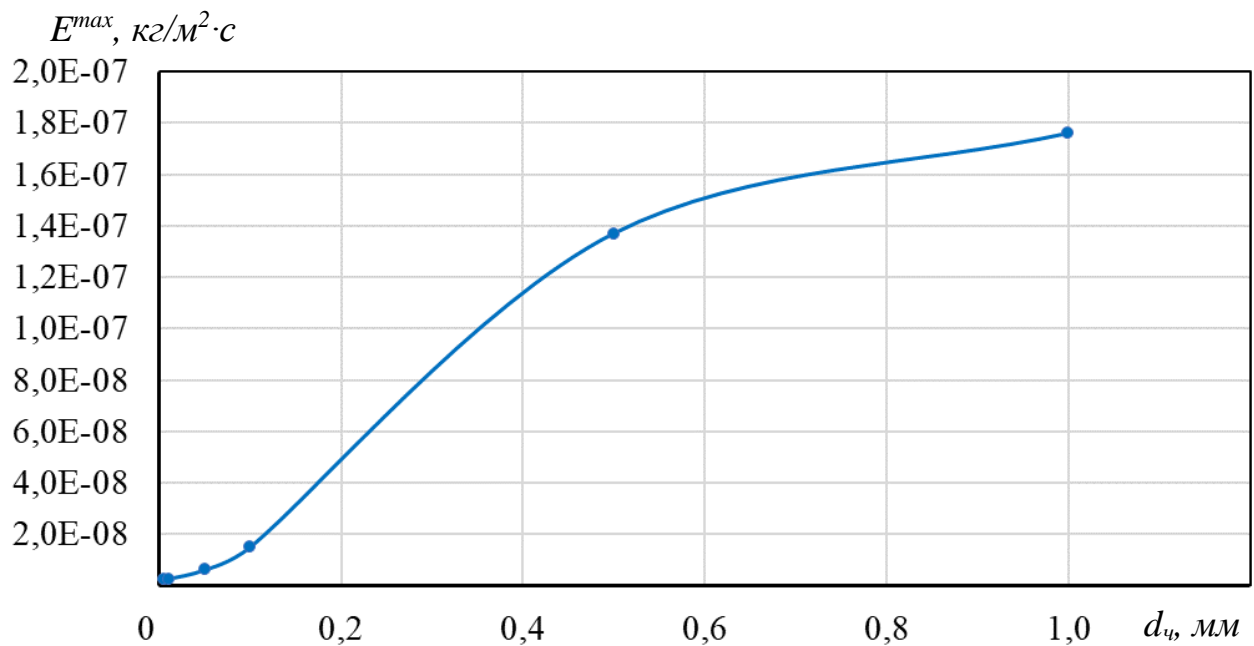
(0,005 мм та 0,01 мм) поля максимального ерозійного зношування є борозноподібними і з опуклого боку відводу простягаються між кутом  $45^\circ$  і  $80^\circ$  відводу в місці виходу з нього газового потоку. Зі збільшенням діаметра дисперсних частинок поле максимального ерозійного зношування набуває зосередженості та все більше опуклим боком відводу поширюється до місця виходу з нього газового потоку. При діаметрі дисперсних частинок 0,1 мм поле максимального ерозійного зношування поширюється і на приварену до відводу трубу. При великих діаметрах дисперсних частинок (0,5 мм та 1,0 мм) поле максимального ерозійного зношування стає видовженим (шнуроподібним) і простягається між кутом  $60^\circ$  і  $90^\circ$  відводу, поширюючись на частину привареної до відводу труби.

При малих (від 0,005 мм до 0,1 мм) і великих (від 0,5 мм до 1,0 мм) діаметрах дисперсних частинок значної зміни швидкості ерозійного зношування відводів не відбувається (рисунок 4.29). При збільшенні діаметра дисперсних частинок від 0,1 мм до 0,5 мм відбувається значне збільшення швидкості ерозійного зношування відводів – від  $1,5 \cdot 10^{-8}$  кг/м<sup>2</sup>·с до  $1,37 \cdot 10^{-7}$  кг/м<sup>2</sup>·с.



а) –  $d_p=0,005 \text{ мм}$ ; б) –  $d_p=0,01 \text{ мм}$ ; в) –  $d_p=0,05 \text{ мм}$ ; г) –  $d_p=0,1 \text{ мм}$ ; д) –  $d_p=0,5 \text{ мм}$ ;  
 е) –  $d_p=1,0 \text{ мм}$

**Рисунок 4.28** – Поля швидкості ерозійного зношування на контурах відводів для різних діаметрів дисперсних частинок

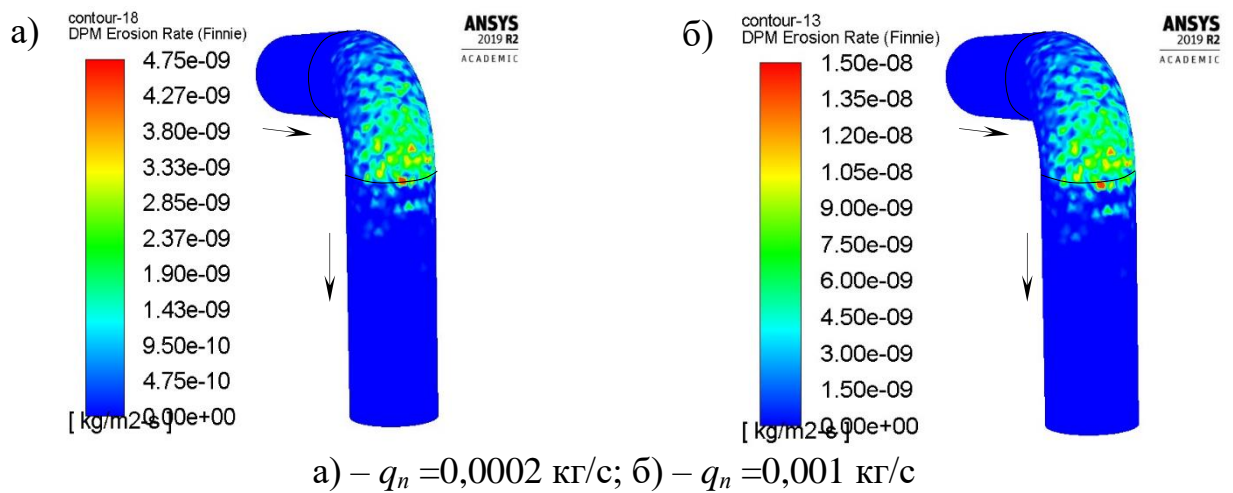


**Рисунок 4.29** – Залежність максимальної швидкості ерозійного зношування від діаметра дисперсних частинок

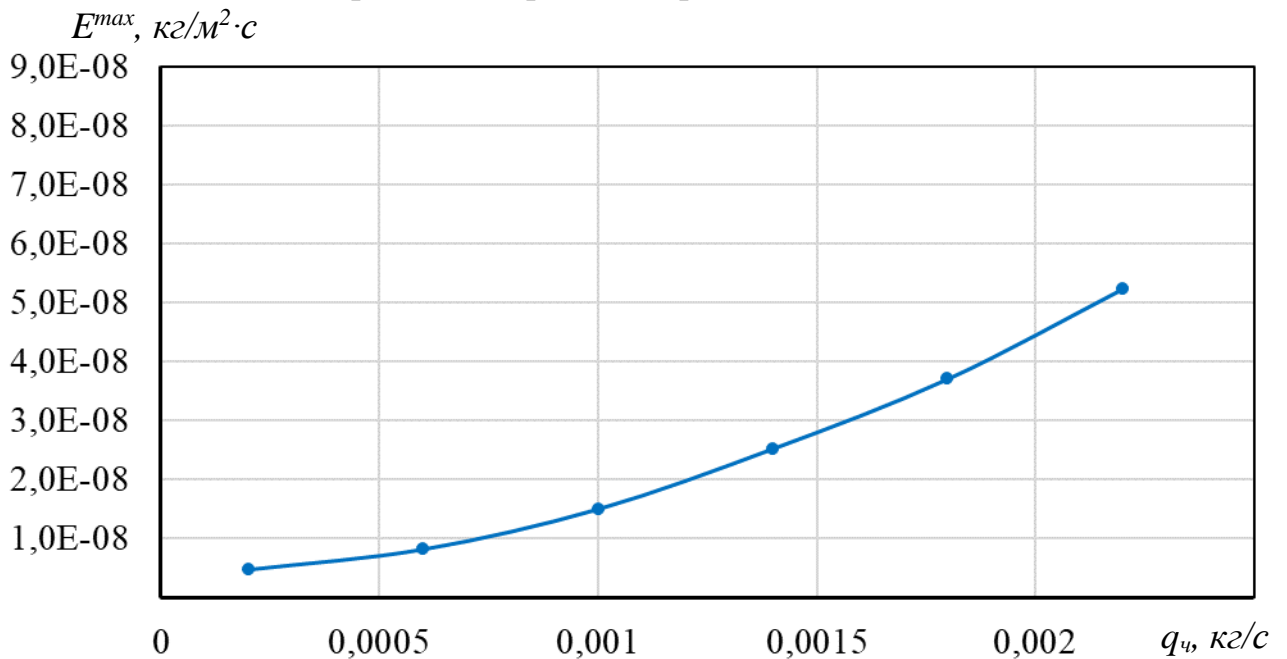
Щоб встановити вплив витрати дисперсних частинок  $q_{ч}$  на величину і місцезнаходження ерозійного зношування відводу, на вході вона змінювалась від 0,0002 кг/с до 0,0022 кг/с із кроком 0,0004 кг/с. Швидкість газового потоку на вході у відвід задавалась рівною 13 м/с, а діаметр зерен піску – 0,1 мм.

Результати CFD моделювання (рисунок 4.30) показують, що витрата дисперсних частинок не впливає на місцезнаходження поля ерозійного зношування відводу. Для усіх витрат воно було в одному і тому ж місці: з опуклого боку відводу в місці виходу з нього газового потоку (між кутом 60° і 90° відводу) та на початку привареної до відводу труби в напрямку руху продукту. Тому на рисунку 4.30 для прикладу було наведено поля ерозійного зношування відводів для витрат дисперсних частинок тільки 0,0002 кг/с та 0,001 кг/с.

При збільшенні витрати дисперсних частинок поступово збільшується швидкість ерозійного зношування відводів за наближеною до лінійної залежністю за всіх інших незмінних параметрів (рисунок 4.31). Якщо витрата дисперсних частинок збільшується від 0,0002 кг/с до 0,0022 кг/с, величина максимальної швидкості ерозійного зношування відводів збільшується від  $4,75 \cdot 10^{-9}$  кг/м<sup>2</sup>·с до  $5,22 \cdot 10^{-8}$  кг/м<sup>2</sup>·с. При малій витраті дисперсних частинок (до 0,0006 кг/с) швидкість



**Рисунок 4.30** – Поля швидкості ерозійного зношування на контурах відводів для різних витрат дисперсних частинок



**Рисунок 4.31** – Залежність максимальної швидкості ерозійного зношування від витрати дисперсних частинок

ерозійного зношування відводів є незначною і сильно не змінюється (рисунок 4.31). [68]

За отриманими результатами виведено емпіричну залежність для розрахунку швидкості ерозійного зношування відводів, яка враховує їх геометричні параметри, експлуатаційні параметри транспортування та діаметри і витрату дисперсних фаз. Швидкість ерозійного зношування відводу рівна

$$E = \frac{C\phi V^2 d_u^2 q_u}{D_n^{0,02} v_z^2 R_g^2}, \quad (4.3)$$

де  $C$  – коефіцієнт, який рівний  $4,2 \cdot 10^{-13}$ ;

$q_u$  – витрата дисперсних часодтинок.

#### 4.5 Експериментальні вимірювання товщини стінки фасонних елементів газопроводів

Для перевірки достовірності результатів моделювання ерозійного зношування фасонних елементів трубопроводів, а саме достовірності визначення місць їх ерозійного зношування – було виконано комплекс промислових експериментальних досліджень. Виконувалось зовнішнє ультразвукове обстеження відводів, трійників обв'язок компресорних станцій магістральних газопроводів (рисунок 4.32), газорозподільних станцій.



**Рисунок 4.32** – Ультразвукове обстеження відводів, трійників обв'язки компресорної станції магістрального газопроводу

Вимірювання товщини стінки фасонних елементів газопроводів виконувалось ультразвуковим дефектоскопом DiO 562 LC, серійний № 04-118, перетворювач типу П111-5.0-К6-003 і товщиноміром ультразвуковим УТ-31,

заводський № 446.

Переважна більшість місць зменшення товщини стінки досліджуваних фасонних елементів газопроводів відповідала результатам моделювання, наведеним в підрозділі 4.1. Місце ерозійного зношування відводів, в основному, знаходилось із опуклого боку відводу в місці виходу з нього газового потоку (між кутом  $60^\circ$  і  $90^\circ$  відводу) та на початку привареної до відводу труби. Місця ерозійного зношування трійників залежали від напрямків руху ними потоків і також більшість отриманих результатів відповідала результатам отриманим теоретично.

Для оцінювання швидкості ерозійного зношування стінки фасонних елементів трубопроводів вимірювання необхідно виконувати з певним інтервалом часу протягом не менше декількох років. Такі вимірювання виконувались на різноманітних технологічних об'єктах газотранспортної системи України. Для прикладу, розглянемо результати ультразвукового контролю фактичних товщин стінок елементів надземних технологічних трубопроводів обв'язки обладнання КС Бар магістрального газопроводу "Союз" у зонах найбільш імовірного ерозійного зношування. Дата початку експлуатації компресорної станції – 1979 рік.

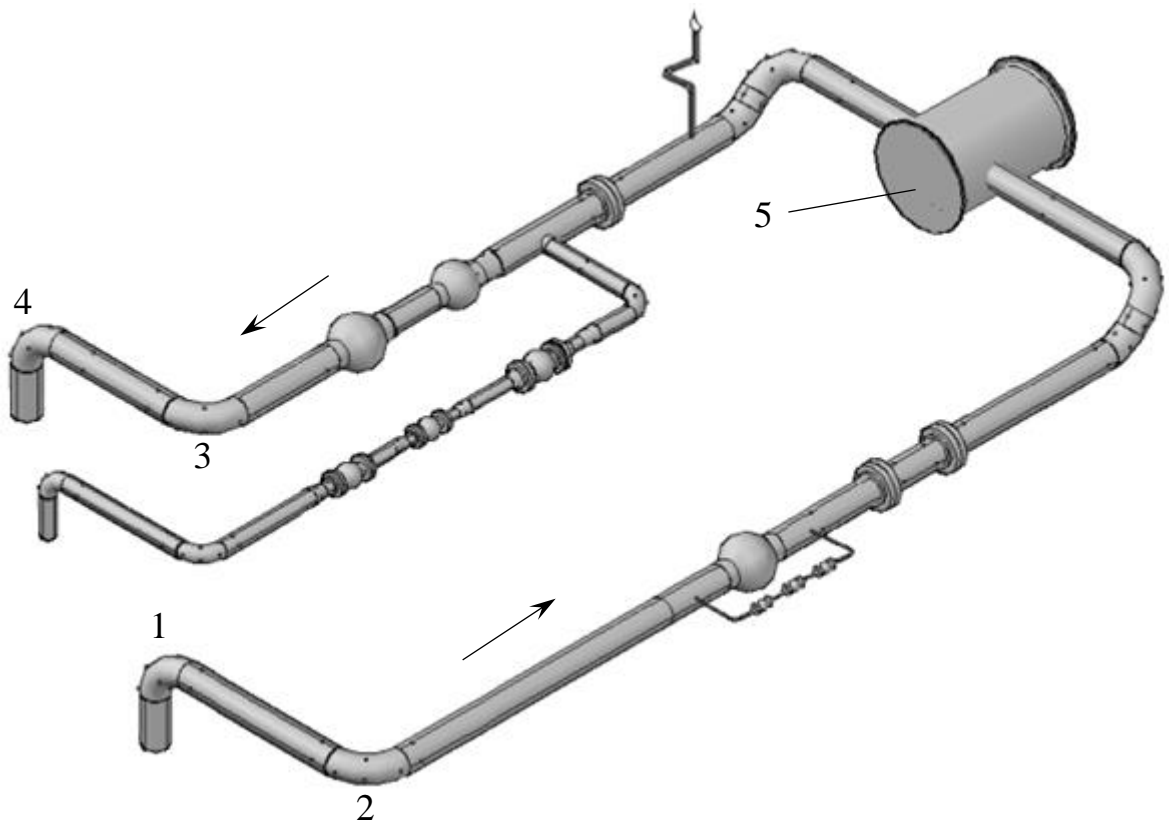
Виконувався порівняльний аналіз даних обстежень 03.03-08.03.2014 року та даних обстежень 08-19.07.2019 року.

Вимірювалась товщина стінки відводів трубопровідної технологічної обв'язки ГПА у зонах найбільш імовірного розвитку ерозійного зносу. Схема трубопровідної технологічної обв'язки ГПА з нумерацією відводів для вимірювання товщини стінки наведена на рисунку 4.33.

Значення мінімальної вимірної товщини стінки відводів у зонах імовірного ерозійного зношування технологічної трубопровідної обв'язки ГПА, виміряних у 2014 і 2019 році, наведено в таблиці 4.1. Також у таблиці 4.1 наведено різницю між мінімальним значенням товщини стінки відводів, вимірної в 2014 році  $\delta_{\min 1}$  та в 2019 році  $\delta_{\min 2}$  ( $\Delta\delta = \delta_{\min 1} - \delta_{\min 2}$ ). За цим значенням було розраховану середню швидкість стоншування стінки відводів  $v_{e,sp}$  (таблиця 4.1).

Найменша середня швидкість стоншування стінки відводу номінальним





1, 2, 3, 4 – досліджувані відводи; 5 – ГПА

**Рисунок 4.33** – Схема технологічної трубопровідної обв'язки ГПА

діаметром 700 мм технологічної трубопровідної обв'язки ГПА КС з 2014 р. до 2019 р. складає  $0,04 \frac{\text{мм}}{\text{рік}}$ , а найбільша –  $0,22 \frac{\text{мм}}{\text{рік}}$  (таблиця 4.1). Середня швидкість стоншування стінки відводів із 2014 р. до 2019 р. на вході ГПА складає  $0,16 \frac{\text{мм}}{\text{рік}}$ , а на виході –  $0,07 \frac{\text{мм}}{\text{рік}}$ . Величина ерозійного зношення відводів трубопроводів технологічної обв'язки ГПА є нерівномірною в часі і по ГПА. Результати моделювання (підрозділ 4.1) знаходяться в отриманому діапазоні швидкості стоншування стінки відводу. Середня швидкість стоншування стінки відводів з 1979 р. до 2014 р. є в декілька разів меншою, ніж з 2014 р. до 2019 р. Також на вході в ГПА ерозійне зношення відбувається більш інтенсивно, ніж на виході. Причинами цього можуть бути режимні параметри транспортування. Останніми роками значно зменшились обсяги транспортування природного газу

**Таблиця 4.1** – Результати ультразвукової товщинометрії відводів технологічної трубопровідної обв'язки ГПА КС Бар

№ відводу	Номинальний діаметр $DN, мм$	Номинальна товщина стінки $\delta_n, мм$	Мінімальна виміряна товщина стінки в 2014 р. $\delta_{мін1}, мм$	Мінімальна виміряна товщина стінки в 2019 р. $\delta_{мін2}, мм$	$\Delta\delta, мм$	Середня швидкість стоншування стінки з 2014 р. до 2019 р. $v_{e.cр}, \frac{мм}{рік}$	Середня швидкість стоншування стінки з 1979 р. до 2014 р. $v_{e.cр}, \frac{мм}{рік}$
<b>ГПА № 3</b>							
1	700	25	23,7	23,1	0,6	0,12	0,04
2	700	25	23,9	23,2	0,7	0,14	0,03
3	700	25	23,9	23,6	0,3	0,06	0,03
4	700	25	23,9	23,7	0,2	0,04	0,03
<b>ГПА № 4</b>							
1	700	25	23,6	22,6	1	0,20	0,04
2	700	25	22,9	21,8	1,1	0,22	0,06
3	700	25	23,8	23,4	0,4	0,08	0,03
4	700	25	23,6	23,1	0,5	0,10	0,04
<b>ГПА № 5</b>							
1	700	25	23,5	22,8	0,7	0,14	0,04
2	700	25	23,6	22,7	0,9	0,18	0,04
3	700	25	24,0	23,7	0,3	0,06	0,03
4	700	25	23,4	23,1	0,3	0,06	0,05
<b>ГПА № 6</b>							
1	700	25	23,5	22,7	0,8	0,16	0,04
2	700	25	23,6	22,9	0,7	0,14	0,04
3	700	25	23,5	23,1	0,4	0,08	0,04
4	700	25	23,4	23,1	0,3	0,06	0,05

газопроводами і КС деяких магістральних газопроводах працюють через одну. Тому на вході працюючих КС тиску є менший проектного, що призводить до суттєвого збільшення швидкості газового потоку і, як наслідок, збільшення швидкості ерозійного зношування (рисунок 4.28).

#### 4.6 Дослідження процесів ерозійно-корозійного зношення трійника тепломережі

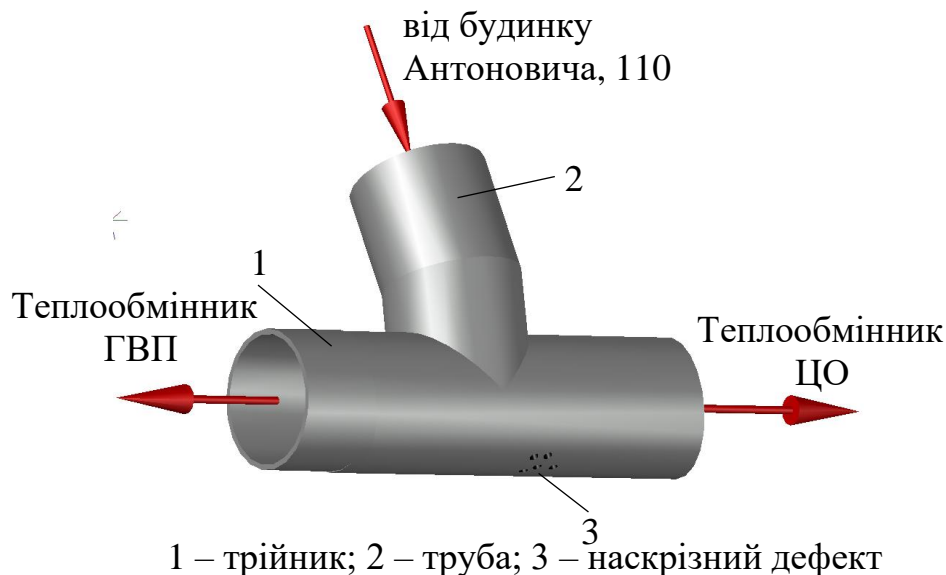
Незадовільний технічний стан трубопроводів комунікацій, зокрема їх фасонних елементів, зумовлює збільшення кількості аварій, що є особливо небезпечним у містах і є постійною потенційною загрозою для здоров'я та життя їх мешканців. Особливо загрозовою є ситуація з тепломережами. Так, столичні тепломережі перебувають у критичному стані через зношеність більше 80 % трубопроводів. У результаті доволі частих аварій тепломереж відбувається пошкодження автомашин, іноді і будівель, міська інфраструктура затоплюється кип'ятком, руйнується дорожнє покриття і виникають значні затори. Витоки з трубопроводів теплових мереж призводять до фонтанів кип'ятку, які з'являються миттєво, розмивання ґрунту під автодорогами та провалювання автомашин.

Основною причиною зношеності трубопроводів теплових мереж є внутрішня та зовнішня корозія. Інтенсивна внутрішня корозія збільшує концентрацію продуктів корозії в потоці теплоносія, що призводить до ерозійного зношення фасонних елементів теплових мереж, у яких відбувається зміна напрямку руху потоку. Такими елементами є відводи і трійники теплових мереж у яких до внутрішньотрубної корозії додається ерозійне зношення. Ці два процеси відбуваються одночасно і в комплексі значно зменшують залишковий ресурс фасонних елементів, спричиняють аварійні витoki. Прикладом цього є трійник тепломережі Києва, у якому потік гарячої води переважно більшість часу експлуатації з патрубку трійника перетікав у відгалуження. У результаті чого навпроти відгалуження виникли наскрізні дефекти (рисунок 4.34) і трійник був вирізаний із тепломережі. Трійником потік теплоносія рухався від будинку на вулиці Антоновича, 110 до ТЕЦ – 5 міста Київ. Трійник був розгалужувачем теплоносія до теплообмінника гарячого водопостачання (ГВП) і теплообмінника циркуляції опалення (ЦО) нового пластинчастого типу ТЕЦ – 5. В основному, потік гарячої води рухався від будинку на вулиці Антоновича до теплообмінника ЦО (рисунок 4.35).



**Рисунок 4.34** – Трійник тепломережі з наскрізними дефектами

Вода для транспортування теплової енергії використовувалась з ТЕЦ – 5 міста Києва. Температура теплоносія в трубопроводі складає від  $+65^{\circ}\text{C}$  до  $+90^{\circ}\text{C}$ . Жорсткість води теплоносія (котлова вода водогрійних котлів) складає не більше 0,3–1,5 ммоль/л. Тиск теплоносія в трубопроводі – від 0,6 МПа до 1,4 МПа.

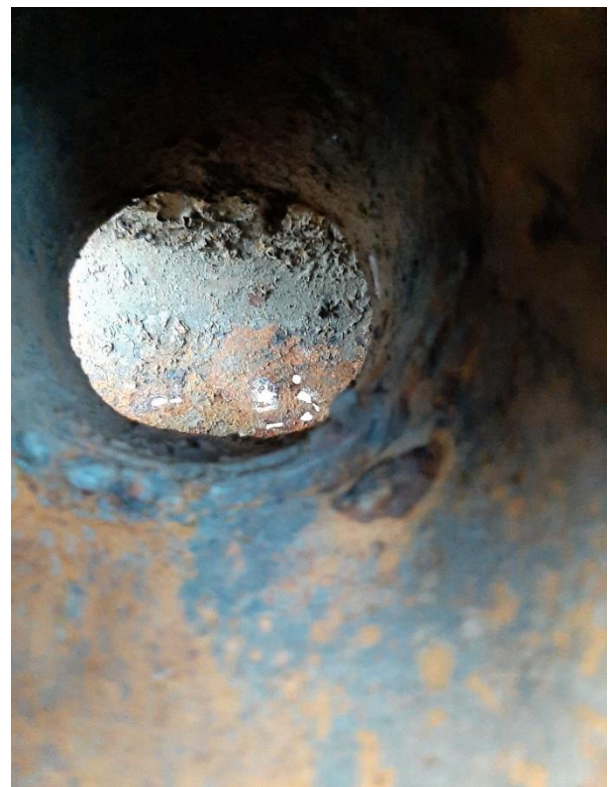


**Рисунок 4.35** – Геометрична модель дефектного трійника

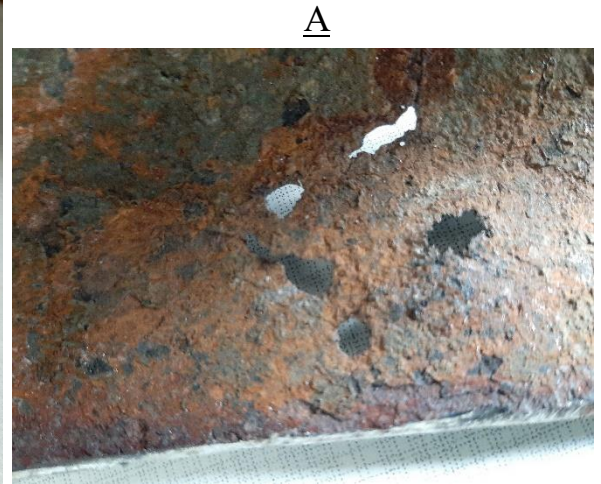
Трійник рівнопрохідний. Зовнішній діаметр трійника 100 мм, номінальна товщина стінки 3,5 мм. Довжина відгалуження трійника 20 мм. До відгалуження

трійника під кутом  $30^\circ$  приварена труба (рисунок 4.35). Матеріал трійника – сталь 20.

Під час детального візуального огляду внутрішньої поверхні цільного (рисунок 4.36) і поздовжньо розрізаного (рисунок 4.37) трійника в місці наскрізного дефекту було виявлено ознаки ерозійно-корозійного зношування, які ймовірно стали причиною аварії. Внутрішня поверхня трійника в місці аварійного дефекту гладка і має бурий колір, у той час як практично вся внутрішня поверхня має значну шорсткість і є сірого кольору. Контури дефектів плавно заокруглені. Тріщини візуально не виявлені. Напрямок потоку в трійнику можна визначити за місцем видалення його матеріалу, місцем наскрізного дефекту (рисунок 4.36). Місце вилучення матеріалу, наскрізного дефекту знаходиться в магістралі трійника напроти його відгалуження. При цьому воно дещо зміщене в одну з сторін магістралі трійника. Отже, потік теплоносія, в основному, з відгалуження трійника перетікав у одну сторону магістралі трійника.



**Рисунок 4.36** – Внутрішня поверхня трійника тепломережі з наскрізними дефектами



**Рисунок 4.37** – Поздовжньо розрізаний трійник тепломережі з наскрізними дефектами

Ерозійно-корозійні процеси значною мірою залежать від механічних властивостей сталі. Тому для визначення причини аварії, отримання розуміння процесу зносу металу стінки трійника тепломережі необхідно виконати експериментальні дослідження механічних властивостей сталі, металографію.

Твердість сталі вимірювалась за Брінеллем твердоміром динамічним, ТД-32, заводський номер 398, і твердоміром контактнo-резонансним, ТКР-35, заводський номер 096, у різних точках трійника з зовнішньої та внутрішньої сторони трійника (рисунок 4.38). Калібрування твердомірів виконувалось на мірах твердості МТБ-1. Середні значення твердості занесені в таблицю 4.2.

**Таблиця 4.2** – Результати вимірювання твердості сталі за Брінеллем трійника тепломережі

Марка твердоміра	Твердість за Брінеллем, НВ	
	зовнішня поверхня трійника	внутрішня поверхня трійника
ТД-32	171	113
ТКР-35	187	100



**Рисунок 4.38** – Вимірювання твердості сталі дефектного трійника

Твердість сталі за Брінеллем внутрішньої поверхні трійника є значно меншою твердості зовнішньої поверхні, що сприяло ерозійним процесам у трійнику.

З метою визначення механічних властивостей матеріалу сталі трійника були вирізані п'ять взірців. Випробування вирізаних взірців на розтяг було виконано на випробувальній машині. Виконувався запис діаграми навантаження – видовження кожного зразка та визначались механічні характеристики (границя плинності  $\sigma_{пл}$ , тимчасовий опір  $\sigma_{тим}$  і відносне видовження  $\delta_{від.вид}$ ). Механічні характеристики сталі досліджуваного трійника наведені в таблиці 4.3.

Сталь 20, з якої був виготовлений досліджуваний трійник, згідно з [298] має такі характеристики –  $\sigma_{пл} = 245 \text{ МПа}$ ,  $\sigma_{тим} = 410 \text{ МПа}$ ,  $\delta_{від.вид} = 25 \%$ .

Міцнісні характеристики взірців сталі трійника дещо менші зазначених у технічних умовах, що сприяє ерозійному зношуванню трійника. Відносне видовження досліджуваних взірців є також меншим, ніж у технічних умовах.

Металографічні дослідження виконуються з метою визначити мікроструктуру сталі трійника. Щоб виконати металографічні дослідження, були виготовлені шліфи. Взірці були вирізані в різних місцях трійника (у місцях

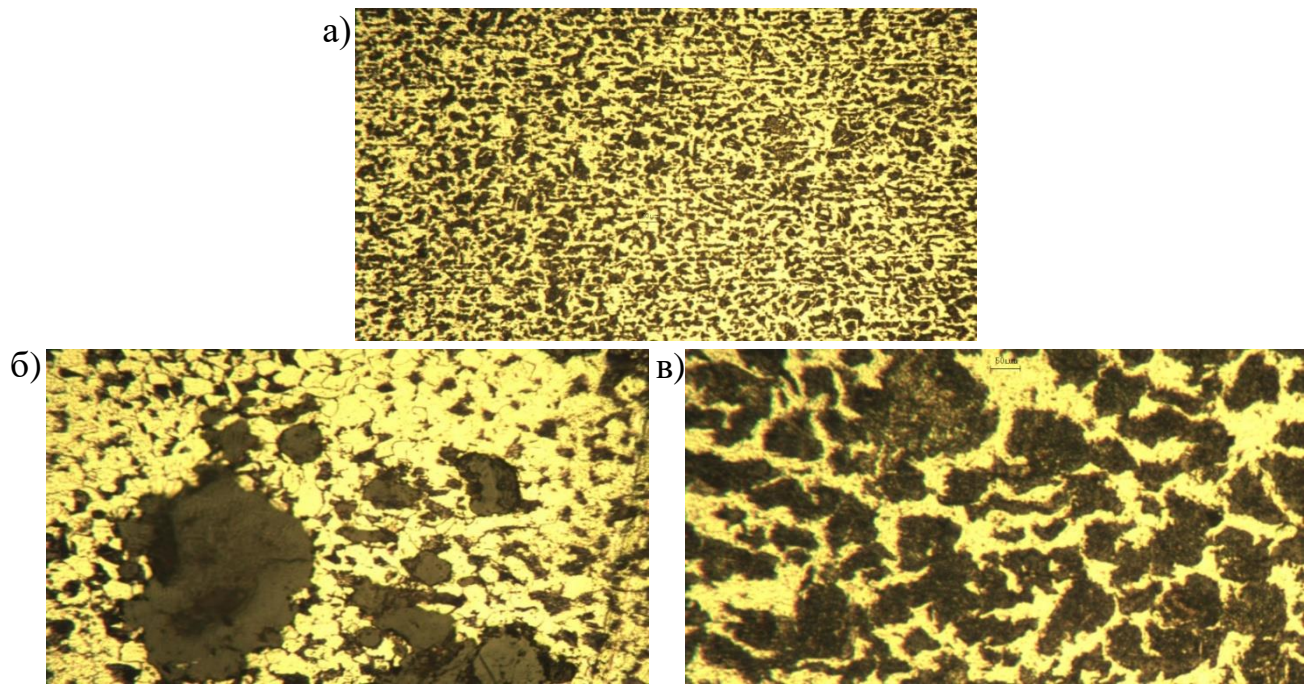
відсутності значного зношування стінки трійника та в місці наскрізних дефектів трійника) і очищені від корозійних відкладів. Металографічні дослідження структури виконувались оптичним мікроскопом із різними збільшеннями у 100, 200 і 400 разів.

**Таблиця 4.3** – Результати вимірювання механічних характеристик сталі трійника

№ взірця	$\sigma_{тум}$ , МПа	$\sigma_{пл}$ , МПа	$\delta_{від.вид}$ , %
1	397,2	209,3	16,4
2	386,3	218,4	13,2
3	390,4	214,7	13,9
4	382,3	202,3	15,8
5	385,2	214,5	14,6
Середнє	388,3	211,8	14,8

У мікроструктурі сталі трійника було виявлено дві фази – світла феритова і темна фаза перліту. Феритова фаза м'яка та пластична, а перлітова – тверда та крихка. Феритова фаза наявна в більшій кількості, ніж фаза Перліту. На взірцях, вирізаних у місцях відсутності значного зношування стінки трійника, мікроструктура була однорідною ферито-перлітною різнозернистою (рисунок 4.39, а). На взірцях, вирізаних у місці наскрізних дефектів трійника, виявлено корозійні виразки, які утворились на поверхні (рисунок 4.39, б), та видалення перлітних прошарків, окремих зерен і груп зерен фериту. Такі процеси зумовлені окисленням перлітних прошарків і їх видаленням внаслідок ерозійних процесів. Корозія, видалення перлітних прошарків і окремих зерен фериту призводять до розпушування поверхні і збільшення інтенсивності ерозійних процесів, зумовлюють утворення великої кількості округлих ямок різної величини. Такі процеси сприяють ерозії і збільшенню глибини ямок.

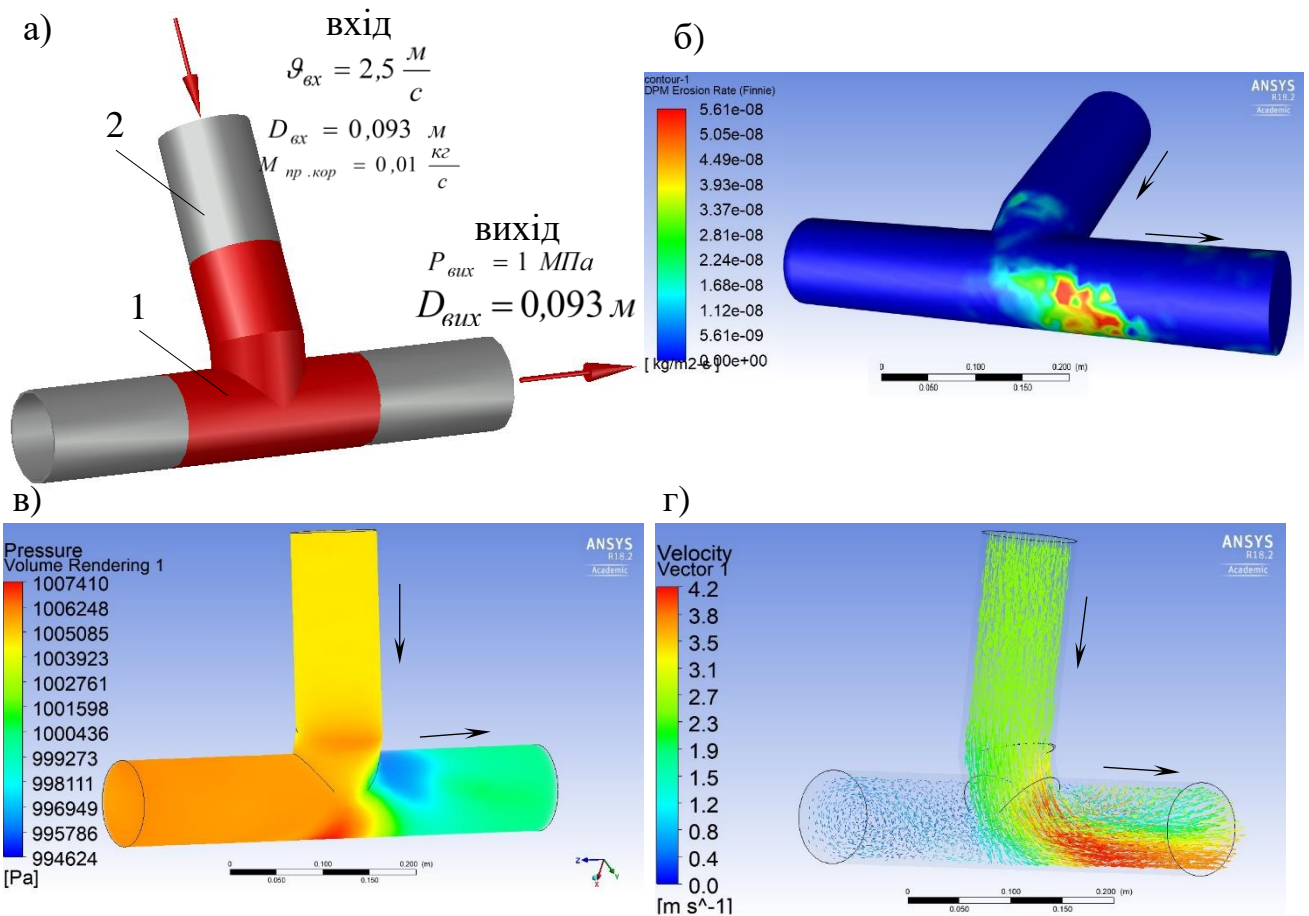




а) – внутрішня поверхня у місці відсутності значного зношування стінки (кратність 100); б) – внутрішня поверхня у місці наскрізних дефектів (кратність 200); в) – внутрішня поверхня у місці наскрізних дефектів (кратність 400)

**Рисунок 4.39** – Мікроструктура зразків сталі трійника

Також ерозійні процеси в досліджуваному трійнику тепломережі треба розглядати з урахуванням гідродинамічних процесів, які відбувались у його внутрішній порожнині до аварії. Гідродинамічні процеси у внутрішній порожнині трійника тепломережі були досліджені CFD моделюванням. Оскільки у внутрішній порожнині тепломереж відбувається інтенсивна внутрішньотрубна корозія, що призводить до збільшення концентрації продуктів корозії в потоці теплоносія, то вони були прийняті дисперсною фазою. Густина продуктів корозії приймалась рівною  $5240 \text{ кг/м}^3$ . Для дослідження гідродинамічних процесів у трійнику задавались граничні умови, наведені на рисунку 4.40, а. Результати CFD моделювання були візуалізовані в постпроцесорі програмного комплексу ANSYS CFX. Було побудовано поля швидкості ерозійного зношування на контурах трійника (рисунк 4.40, б), заливка тиску у внутрішній порожнині трійника (рисунк 4.40, в) та вектори швидкості у внутрішній порожнині трійника (рисунк 4.40, г). Місце поля максимальної швидкості ерозійного зношування трійника



1 – трійник 100×3,5; 2 – труба 100×3; а) – розрахункова схема; б) – поля швидкості ерозійного зношування на контурах; в) – заливка тиску у внутрішній порожнині; г) – вектори швидкості у внутрішній порожнині

**Рисунок 4.40** – Результати моделювань динаміки руху теплоносія з домішками продуктів внутрішньотрубної корозії трійником

(рисунок 4.40, б) співпадає з місцем наскрізних дефектів трійника рисунок 4.37, що підтверджує припущення про наявність ерозійних процесів у трійнику. Найбільша швидкість потоку теплоносія спостерігається в місці ерозійного зношування і складає 4,2 м/с, що посилює ерозійне зношування трійника (рисунок 4.40, б). У місці ерозійного зношування спостерігається незначне зниження тиску (рисунок 4.40, а), а отже, навантаження на стінку трійника дещо зменшується, і тому ерозійне зношування призвело до витoku, а не розриву стінки магістралі трійника. Моделювання були візуалізовані в постпроцесорі програмного комплексу ANSYS CFX. Було побудовано поля швидкості ерозійного зношування на контурах трійника (рисунок 4.40, б), заливка тиску у внутрішній порожнині трійника

(рисунок 4.40, в) і вектори швидкості у внутрішній порожнині трійника (рисунок 4.40, г). Місце поля максимальної швидкості ерозійного зношування трійника (рисунок 4.40, б) співпадає з місцем наскрізних дефектів трійника (рисунок 4.37), що підтверджує припущення про наявність ерозійних процесів у трійнику. Найбільша швидкість потоку теплоносія спостерігається в місці ерозійного зношування і складає 4,2 м/с, що посилює ерозійне зношування трійника (рисунок 4.40, б). У місці ерозійного зношування спостерігається незначне зниження тиску (рисунку 4.40, а), а отже, навантаження на стінку трійника дещо зменшується і тому ерозійне зношування призвело до витіку, а не розриву стінки магістралі трійника.

#### **Висновки до розділу 4**

1. Визначено закономірності впливу режимних параметрів транспортування, характеристик і концентрації дисперсних фаз, геометричних параметрів фасонних елементів трубопровідних систем на місцезнаходження й інтенсивність ерозійного зношування таких елементів. Дослідження виконано Лагранжевим підходом (модель DPM) із застосуванням моделі Фінні й експериментально. Експериментально виявлені місця ерозійного зношування фасонних елементів трубопроводів підтвердили достовірність моделювання.

2. Найбільший вплив на місцезнаходження ерозійного зношування відводів трубопровідних систем має радіус вигину відводу та діаметр дисперсних частинок. Із збільшенням радіуса вигину відводу поле максимального ерозійного зношування опуклим боком відводу все більше зміщується від місця виходу газового потоку з відводу до місця його входу в відвід. Зі збільшенням діаметра дисперсних частинок поле максимального ерозійного зношування набуває зосередженості та все більше опуклим боком відводу поширюється до місця виходу з нього газового потоку.

3. На інтенсивність ерозійного зношування відводів трубопровідних систем найбільше впливають швидкість двофазного потоку, діаметр відводу та діаметр дисперсних частинок. При збільшенні діаметра дисперсних частинок від 0,005 мм до 1,0 мм максимальна швидкість ерозійного зношування відводів збільшується в 70 разів. При збільшенні швидкості газового потоку від 4 м/с до 19 м/с максимальна

швидкість ерозійного зношування відводів збільшується в 35 разів. Відводи газопроводу з кутом вигину  $90^\circ$  ерозійно зношуються в 2,5 рази швидше порівняно з відводами з кутом вигину  $30^\circ$ , а відводи з радіусом вигину, рівним DN, – в 9,8 разів швидше, ніж з радіусом вигину  $3,5$  DN. Заміна відводу трубопроводу з кутом вигину  $90^\circ$  на два відводи з кутом вигину  $45^\circ$  дозволяє майже вдвічі зменшити інтенсивність ерозійного зношування стінок трубопроводу. Якщо при цьому збільшити радіус вигину відводу, то можна ще в декілька раз зменшити інтенсивність його ерозійного зношування. Отримано нову емпіричну залежність між інтенсивністю ерозійного зношування відводів трубопроводів та основними параметрами процесу.

4. У трійниках місцезнаходження та інтенсивність ерозійного зношування залежать від напрямків руху двофазного потоку трійником. Якщо потік рухається відгалуженням трійника і з нього перетікає в одну зі сторін магістралі трійника, то місце найінтенсивнішого ерозійного зношування трійника має грушоподібну форму і розміщується навпроти відгалуження трійника та витягнуту в сторону руху потоку магістраллю трійника. У трійниках, в яких потік рухається магістраллю трійника і з магістралі повністю або частково перетікає у відгалуження трійника найінтенсивніше ерозійне зношування спостерігається і в його магістралі (одразу за відгалуженням, у яке перетікає потік), і у відгалуженні (з боку його стінки, на яку набігає потік). У трійниках, в яких потік рухається відгалуженням трійника і з відгалуження розходить у дві сторони магістралі трійника, місце найінтенсивнішого ерозійного зношування трійника розміщене в магістралі трійника навпроти відгалуження трійника і має форму кільця, викривленого внутрішньою поверхнею магістралі трійника.

5. Аналіз даних ультразвукового вимірювання товщини стінок фасонних елементів трубопровідної обв'язки технологічних об'єктів газотранспортної системи України показав, що до 2014 року швидкість стоншування стінки відводів була в декілька разів меншою, ніж після 2014 року. Також на вході в ГПА компресорної станції магістрального газопроводу ерозійне зношування відбувається інтенсивніше, ніж на виході. Причинами цього можуть бути режимні

параметри транспортування. Останніми роками тиск на вході багатьох компресорних станцій є менший за проектний, що зумовлено зменшенням обсягів транспортування та роботою компресорних станцій через одну. Це призводить до збільшення швидкості газового потоку, і, як наслідок, збільшення швидкості ерозійного зношування фасонних елементів на вході працюючих компресорних станцій.

6. Експериментальні та теоретичні дослідження закономірностей процесів, які відбуваються у внутрішній порожнині фасонних елементів трубопроводів тепломереж показали, що причинами їх зношування є синергетичний вплив ерозії та внутрішньої корозії. Ерозія фасонних елементів тепломереж відбувається шляхом видалення окислених перлітних прошарків і окремих зерен фериту продуктами внутрішньотрубною корозією, які переносяться потоком теплоносія та іншими забрудненнями. Збільшенню інтенсивності ерозійних процесів сприяють внутрішньотрубна корозія, зменшення твердості внутрішньої поверхні та погіршення міцнісних характеристики сталі під час експлуатації.

Основні наукові результати розділу опубліковані в працях [66–76].

## РОЗДІЛ 5

### ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ФАСОННИХ ЕЛЕМЕНТІВ ТРУБОПРОВІДНИХ СИСТЕМ

Розроблено алгоритм комплексного чисельного моделювання напружено-деформованого стану фасонних елементів трубопровідних систем із урахуванням газодинамічних процесів, які відбуваються в їхній внутрішній порожнині, ерозійного зношування стінки та температурного перепаду. Визначено зони потенційного ризику втрати міцності фасонних елементів трубопроводів. Розроблено методика побудови геометричних моделей фасонних елементів трубопроводів зі складною тривимірною формою ерозійних дефектів стінки. Визначено закономірності впливу величини ерозійних дефектів на напружено-деформований стан фасонних елементів трубопроводів.

Задачу математичного моделювання напружено-деформованого стану ерозійно чи корозійно зношених відводів трубопровідних систем вирішено в тороїдальній системі координат. Для такої системи координат записано формули Кристофеля II роду, ненульові компоненти тензора деформацій та систему рівнянь рівноваги в рамках лінійної теорії крученості. Систему рівнянь рівноваги зведено до одного рівняння, яке є основним рівнянням задачі Ламе. Отримано формулу для розрахунку кільцевих напружень, які виникають у стінці ерозійно чи корозійно зношених відводів трубопроводів від дії внутрішнього тиску. Визначено закономірності впливу зміни товщини стінки відводів трубопроводів у місці їх ерозійного чи корозійного зношення на величину еквівалентних напружень.

Розроблено покроковий алгоритм визначення значення допустимої товщини стінки фасонних елементів у місці ерозійного зношування, алгоритм оцінювання міцності таких елементів.

## **5.1 Розроблення алгоритму моделювання напружено-деформованого стану фасонних елементів трубопроводів**

У фасонних елементах трубопровідних систем унаслідок зміни напрямку руху продукту відбувається турбулентний рух газового потоку, нерівномірний розподіл тиску, ударяння рідких і твердих частинок, які містяться в потоці природного газу, до стінки, що зумовлює ерозійне зношування. Все це впливає на напружений стан фасонних елементів, зменшує їх залишковий ресурс. До того ж дослідження напружено-деформованого стану фасонних елементів трубопроводів ускладнюються виникненням додаткових напружень, зумовлених складною геометрією фасонних елементів, температурним перепадом в їх стінках. Тому задачу дослідження напружено-деформованого стану фасонних елементів трубопроводів треба вирішувати в тривимірній постановці поєднавши газодинамічне, температурне моделювання з механічним, тобто необхідно виконати мультидисциплінарне моделювання.

Температурний перепад у стінці фасонних елементів зумовлює повздовжні температурні напруження. Величина температурних напружень залежить від величини температурного перепаду, який приймається рівним різниці між максимально або мінімально можливою температурою стінок трубопроводу під час експлуатації і найменшою або найбільшою температурою стінок труби, при якій фіксується розрахункова схема трубопроводу (після укладання трубопроводу в траншею, кріплення на опорах). Для підземних трубопроводів температурний перепад приймається  $\pm 40^{\circ}\text{C}$ , а для надземних  $\pm 50^{\circ}\text{C}$ . [80]

Серед вимог, які ставляться до фасонних елементів трубопроводів для забезпечення їх надійності, є контролювання під час експлуатації зміни форми та величини ерозійних дефектів стінки фасонних елементів, максимально точне оцінювання ступеня небезпеки ерозійно зношених фасонних елементів і прогнозування їх залишкового ресурсу. Для цього необхідно розробити методіку дослідження міцності фасонних елементів із ерозійним зносом із урахуванням надзвичайно складної тривимірної форми ерозійних дефектів і газодинамічних

процесів, які відбуваються у внутрішній порожнині відводів, температурного перепаду в їх стінках. Вирішення даної проблеми дозволить оцінити працездатність та визначити залишковий ресурс фасонних елементів з ерозійним зносом, попередити аварійні ситуації, а також визначити періодичність регламентних робіт із обстеження фасонних елементів газопроводів у місцях ерозійного зношування.

Вирішити задачі дослідження напружено-деформованого стану фасонних елементів трубопроводів із урахуванням їх геометрії, газодинамічних процесів, які відбуваються в цих елементах (підрозділ 2.2), ерозійного зношування їх стінки (підрозділ 4.1), температурного перепаду в стінках можна комплексним числовим тривимірним моделюванням в сучасному програмному комплексі ANSYS, який забезпечує можливість виконання багатодисциплінарного моделювання. За допомогою нового інтегруючого середовища розрахунків ANSYS Workbench в одному інтерфейсі об'єднують міцнісний, гідрогазодинамічний та температурний модулі. Крім того, сучасна платформа ANSYS Workbench дає змогу моделювати фізичні процеси з використанням побудованих в більшості CAD-пакетах тривимірних моделей. [79, 83]

Моделювання виконувалось у програмному комплексі скінченно-елементного аналізу ANSYS R18.2 Academic.

Алгоритм чисельного моделювання розглядуваної задачі складається з семи етапів:

- моделювання тривимірної геометрії стінок фасонних елементів та моделювання тривимірної геометрії їх внутрішньої порожнини;
- імпортування тривимірної геометрії внутрішньої порожнини фасонних елементів у гідрогазодинамічний модуль ANSYS Fluent програмного комплексу;
- моделювання газового потоку в фасонному елементі в гідрогазодинамічному модулі ANSYS Fluent (підрозділ 2.2);
- імпортування тривимірної геометрії стінки й отриманих результатів гідрогазодинамічного моделювання з модуля ANSYS Fluent у механічний модуль ANSYS Static Structural програмного комплексу;
- імпортування тривимірної геометрії стінки та моделювання

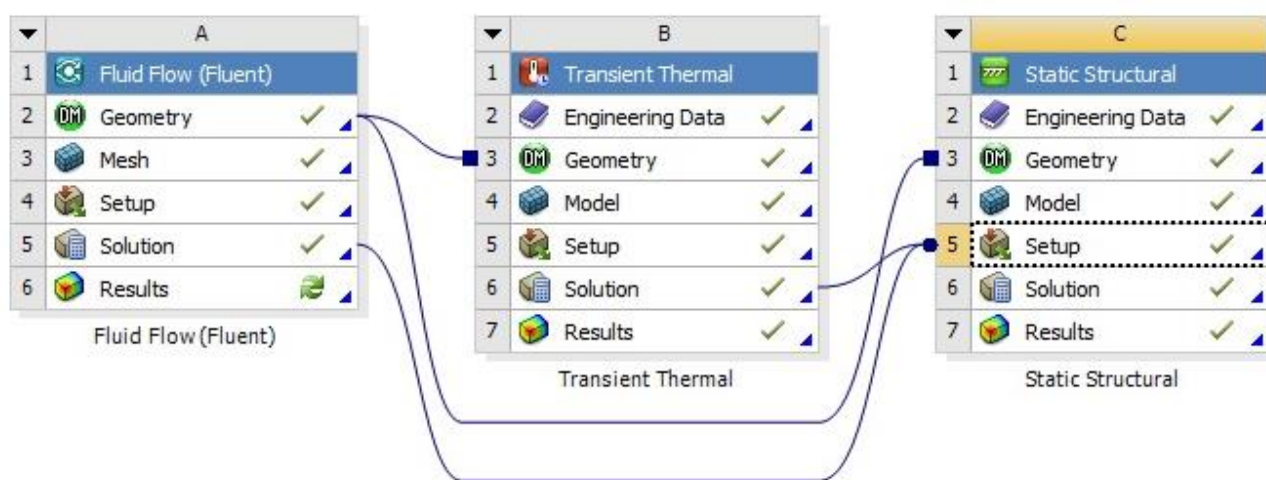


температурного перепаду в стінках фасонних елементів у модулі розрахунку теплових процесів Transient Thermal;

– імпортування отриманих результатів із модуля розрахунку теплових процесів Transient Thermal у механічний модуль ANSYS Static Structural програмного комплексу;

– моделювання напруженого стану фасонних елементів у механічному модулі ANSYS Static Structural.

Для чисельного моделювання розглядуваної задачі в середовищі розрахунків ANSYS Workbench задавалась розрахункова схема, наведена на рисунку 5.1.



**Рисунок 5.1** – Задана в середовищі розрахунків ANSYS Workbench розрахункова схема

## 5.2 Чисельне моделювання напружено-деформованого стану фасонних елементів трубопроводів

Моделювання напружено-деформованого стану фасонних елементів газопроводів у модулі ANSYS Static Structural виконується МСЕ. Основні ідеї МСЕ були закладені в [299] і полягають у тому, що будь-яку безперервну величину (таку як: температура, тиск і переміщення), можна апроксимувати дисперсною моделлю, побудованій на безлічі скінченно-безперервних функцій. У загальному випадку, безперервна величина наперед не відома, і потрібно визначити значення цієї величини в деяких внутрішніх точках області. Дисперсну модель дуже легко

побудувати, якщо спочатку припустити, що числові значення цієї величини в кожній внутрішній області відомі. Після цього можна перейти до загального випадку. Отже, побудову дисперсної моделі безперервної величини здійснюють таким чином:

- у даній області фіксується кінцева кількість точок. Ці точки називаються вузловими точками або вузлами;

- значення безперервної величини в кожній точці вважається змінною, яка має бути визначена;

- область визначення безперервної величини розбивається на скінченну кількість областей, які називаються елементами. Ці елементи мають загальні вузлові точки і в сукупності апроксимують форму області;

- безперервна величина апроксимується на кожному елементі поліномом, який визначається за допомогою вузлових значень цієї величини. Для кожного елемента визначається свій поліном, але поліноми підбираються так, щоб зберігалась безперервність величини вздовж меж елемента (його називають функцією елемента). Вибір форми елементів і їх функцій для конкретних завдань визначає точність наближеного рішення і залежить від винахідливості та майстерності інженера.

Функція деформацій, або вектор деформацій, виражається через функцію переміщень.

При розтягу відносно видовження стрижня

$$\{\varepsilon\} = \left\{ \frac{\partial f}{\partial z} \right\} = \frac{1}{l} \begin{vmatrix} -1 & 1 \end{vmatrix} \begin{Bmatrix} u_i \\ u_j \end{Bmatrix}. \quad (5.1)$$

Вираз  $\frac{1}{l} \begin{vmatrix} -1 & 1 \end{vmatrix}$  вважаємо матрицею, тоді

$$\{\varepsilon\} = [B] \{\delta\}^e, \quad (5.2)$$

де  $\{\varepsilon\}^e = \begin{Bmatrix} u_i \\ u_j \end{Bmatrix}$  – вектор переміщень вузлів елемента.

Функція напружень (вектор напружень) виражається через вектор деформацій

$$\{\sigma\} = |D|(\{\varepsilon\} - \{\varepsilon_0\}) + \{\sigma_0\}, \quad (5.3)$$

де  $|D|$  – матриця пружності (зв'язує між собою напруження та деформації);

$\{\varepsilon_0\}$  – вектор початкових деформацій;

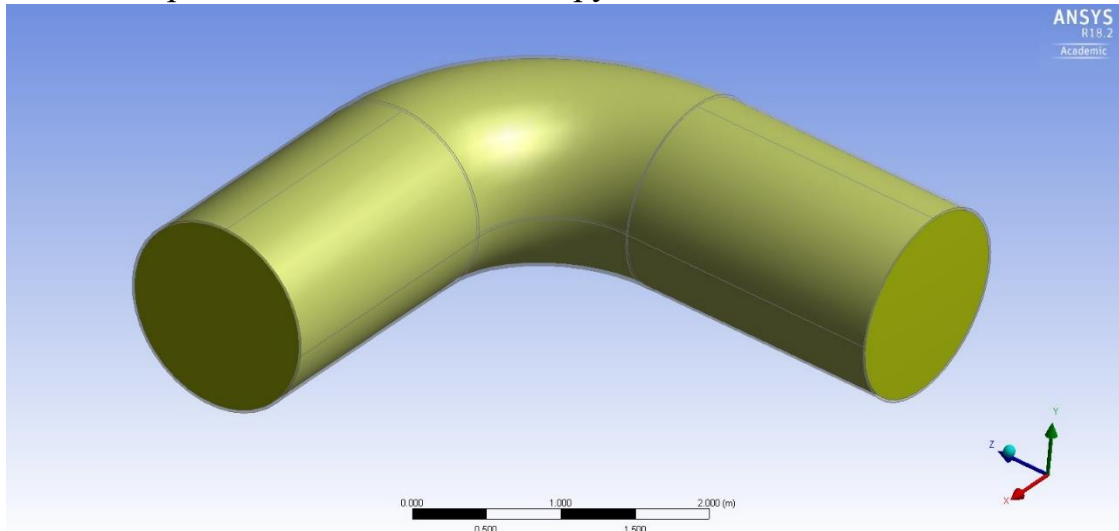
$\{\sigma_0\}$  – вектор початкових напружень. [299]

Для моделювання напружено-деформованого стану фасонних елементів із урахуванням усіх діючих навантажень потрібно розв'язати зв'язану задачу динаміки руху потоку газу фасонним елементом і напружень стінок. Для цього було побудовано дві окремі об'ємні геометричні моделі – для внутрішньої порожнини трубопроводу, якою рухається потік газу, та для стінки трубопроводу.

Для моделювання напружено-деформованого стану фасонних елементів із урахуванням усіх навантажень, які на них діють, потрібно розв'язати зв'язану задачу динаміки руху потоку газу відводом і напружень стінок труби. Для цього було побудовано дві окремі тривимірні геометричні моделі – для внутрішньої порожнини фасонного елемента, якою рухається потік газу, та для стінки фасонного елемента (рисунок 5.2). Тривимірна геометрія внутрішньої порожнини фасонного елемента імпортувалась у гідрогазодинамічний модуль ANSYS Fluent програмного комплексу, а тривимірна геометрія стінки – в механічний модуль ANSYS Static Structural.

Моделювання газового потоку в фасонних елементах газопроводів виконувалось в гідрогазодинамічному модулі ANSYS Fluent. Результати такого моделювання наведено в підрозділі 2.2. За результатами такого моделювання було виявлено, що тиск у фасонних елементах газопроводів розподілений нерівномірно. Такий нерівномірний розподіл тиску в фасонних

елементах газопроводів впливає на їх напружений стан.



**Рисунок 5.2** – Геометрична модель внутрішньої порожнини та стінки відводу з кутом вигину  $90^\circ$

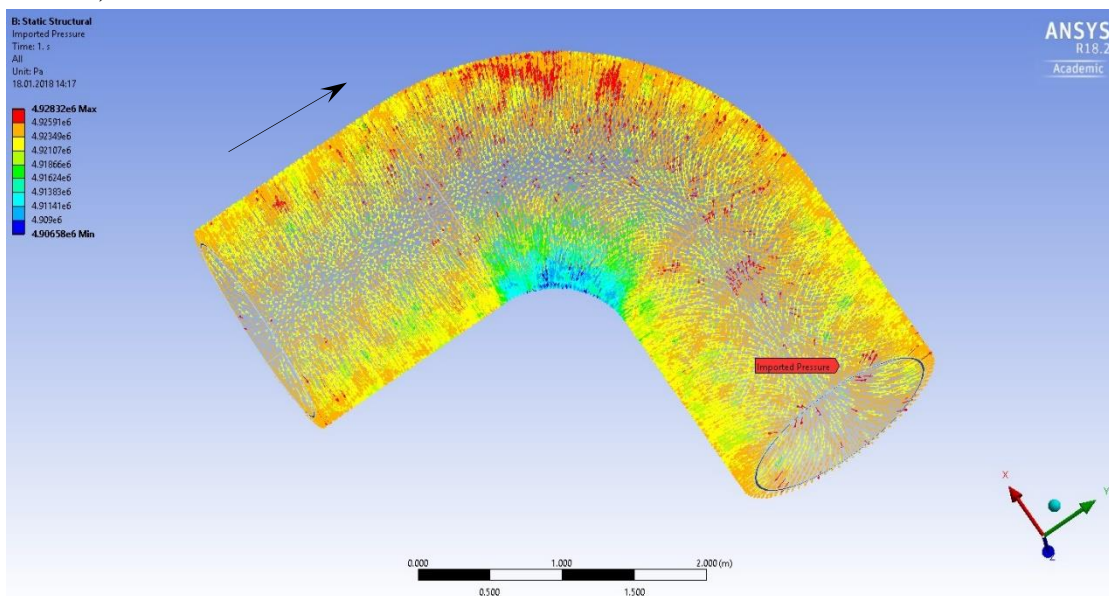
Моделювання температурного перепаду в стінках фасонних елементів газопроводів виконувалось у модулі розрахунку теплових процесів Transient Thermal. Задавались характеристики трубної сталі, температура стінки фасонних елементів у початковий момент часу ( $+20^\circ\text{C}$ ) і температура стінки фасонних елементів у кінцевий момент часу ( $-20^\circ\text{C}$ ).

Моделювання напруженого стану фасонних елементів газопроводу виконувалось у механічному модулі ANSYS Static Structural. У цей модуль імпортувалась тривимірна геометрія стінки фасонних елементів. У базі даних матеріалів програмного комплексу задавалась трубна сталь класу міцності K60 (границя міцності  $\sigma_{міц}=589 \text{ МПа}$ , границя плинності  $\sigma_n=441 \text{ МПа}$ ).

Для врахування впливу нерівномірного розподілу тиску у внутрішній порожнині фасонних елементів на його напружений стан результати моделювання розподілу тиску на внутрішній стінці фасонних елементів з гідрогазодинамічного модуля ANSYS Fluent (підрозділ 2.2) імпортувались у механічний модуль ANSYS Static Structural. Зв'язок трубопроводу з ґрунтом моделювався інтегрованою в ANSYS моделлю пружно-пластичного матеріалу Мора-Кулона. Прикладалось прискорення вільного падіння для врахування власної ваги. Щоб врахувати вплив температурного перепаду на напружений стан фасонних елементів, результати

моделювання температурного перепаду в стінках фасонних елементів із модуля Transient Thermal імпортувались у механічний модуль ANSYS Static Structural програмного комплексу.

Розглянемо відвід із кутом вигину  $90^\circ$  (рисунок 2.12, а). Результати моделювання розподілу тиску у відводі в гідрогазодинамічному модулі ANSYS Fluent наведені на рисунку 2.12, д, е. Ці результати з гідрогазодинамічного модуля ANSYS Fluent імпортувались у механічний модуль ANSYS Static Structural (рисунок 5.3).

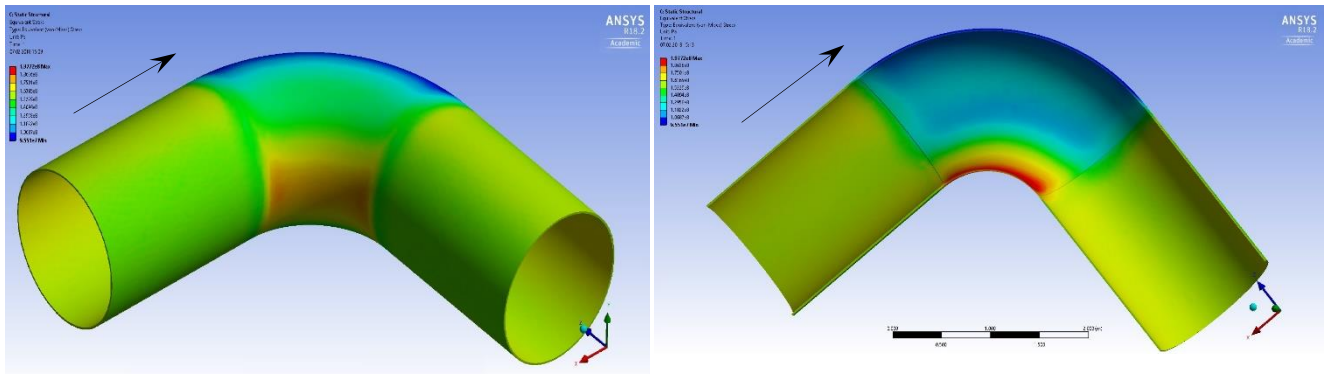


**Рисунок 5.3** – Імпортовані з ANSYS Fluent в ANSYS Static Structural результати моделювання розподілу тиску на внутрішній стінці відводу

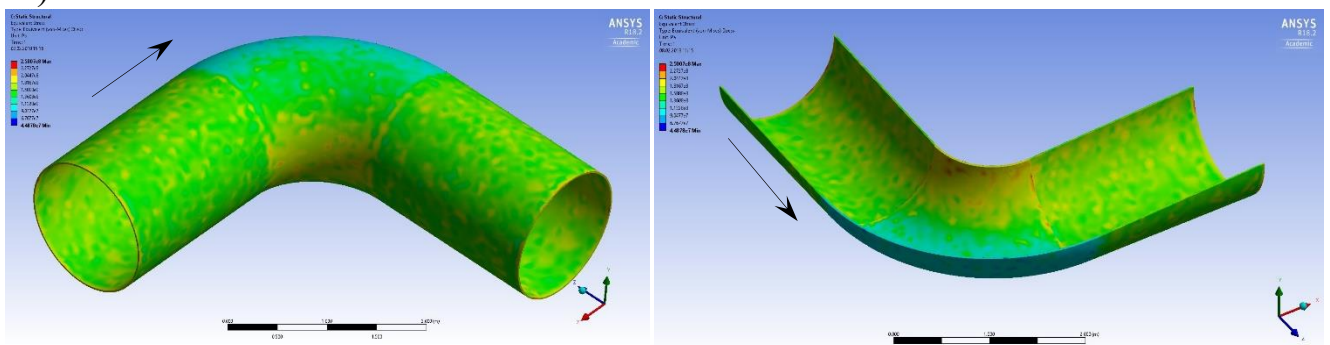
Результати моделювання напруженого стану відводу візуалізовувались побудовою тривимірних кольорових полів еквівалентних напружень за Мізесом у відводі від дії тільки внутрішнього тиску (рисунок 5.4, а) і від дії внутрішнього тиску та температурного перепаду (рисунок 5.4, б). Як видно з результатів, у стінці відводів відбувається нерівномірний розподіл еквівалентних напружень. Максимальні еквівалентні напруження зосереджені з ввігнутого боку відводу (найбільше значення складає 197,7 МПа при дії тільки внутрішнього тиску і 250 МПа при дії внутрішнього тиску та температурного перепаду), мінімальні – з опуклого (найменше значення складає 95,5 МПа при дії тільки внутрішнього тиску і 44,9 МПа при дії внутрішнього тиску та температурного перепаду). Отже,

мінімальний запас міцності відводів спостерігається з увігнутого боку. Також необхідно відзначити, що еквівалентні напруження з увігнутого боку відводу більші, ніж у прямолінійних ділянках трубопроводу. Найбільші еквівалентні напруження Мізеса з увігнутого боку відводу рівні 197,7 МПа при дії тільки внутрішнього тиску і 250 МПа при дії внутрішнього тиску та температурного перепаду. [81]

а)



б)



а) – від дії внутрішнього тиску; б) – від дії внутрішнього тиску та температурного перепаду

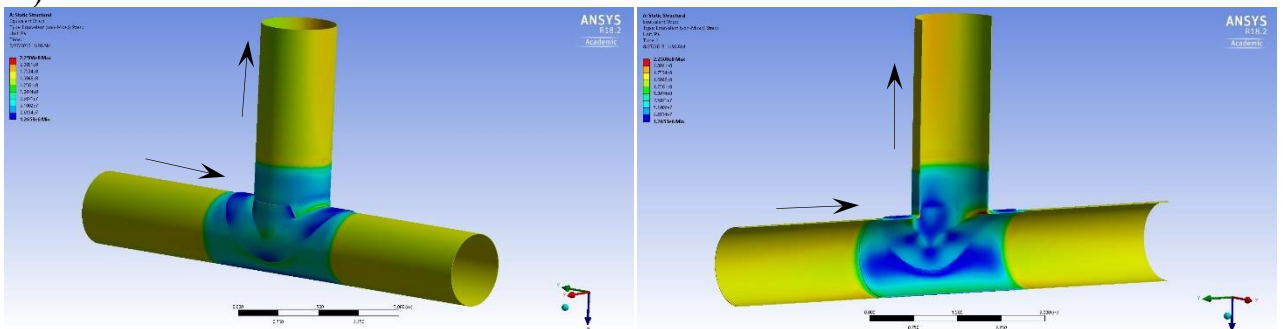
**Рисунок 5.4** – Розподіл еквівалентних напружень Мізеса у відводі

Розглянемо зварний трійник із підсилюючими накладками на магістралі та відводі (рисунок 2.13, а), у якому потік із магістралі трійника повністю перетікає у відгалуження трійника. Результати моделювання розподілу тиску в цьому трійнику в гідрогазодинамічному модулі ANSYS Fluent наведені на рисунку 2.13, д, е. Ці результати з гідрогазодинамічного модуля ANSYS Fluent імпортувались у механічний модуль ANSYS Static Structural.

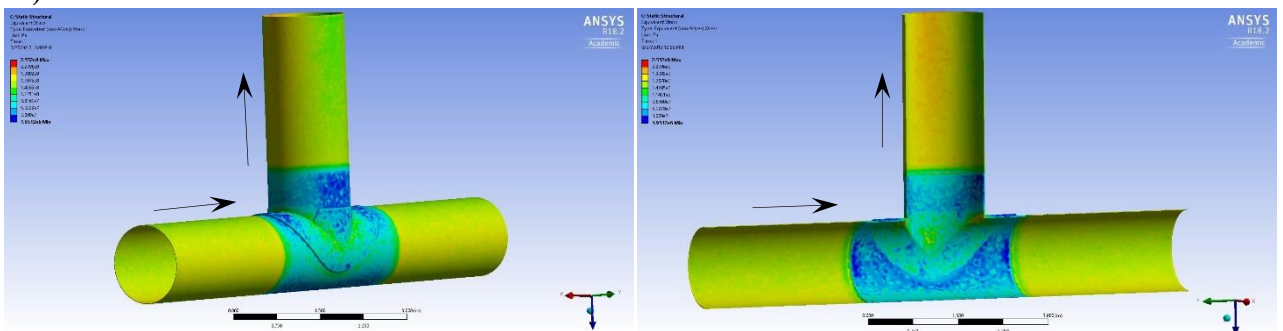
Результати моделювання напруженого стану трійника з підсилюючими накладками на магістралі та відгалуженні візуалізовувались побудовою

тривимірних кольорових полів еквівалентних напружень за Мізесом у трійнику від дії тільки внутрішнього тиску (рисунок 5.5, а) і від дії внутрішнього тиску та температурного перепаду (рисунок 5.5, б). Як видно з результатів, у стінці трійників відбувається нерівномірний розподіл еквівалентних напружень. Максимальні еквівалентні напруження у трійнику зосереджені в місці різкої зміни геометрії трійника в місці приєднання відгалуження до магістралі трійника, де немає підсилюючої накладки на відгалуженні трійника (найбільше значення складає 225,1 МПа при дії тільки внутрішнього тиску і 255,2 МПа при дії внутрішнього тиску та температурного перепаду). Отже, мінімальний запас міцності трійників спостерігається в місці приєднання відгалуження до магістралі трійника, де немає підсилюючої накладки на відгалуженні трійника.

а)



б)



а) – від дії внутрішнього тиску; б) – від дії внутрішнього тиску та температурного перепаду

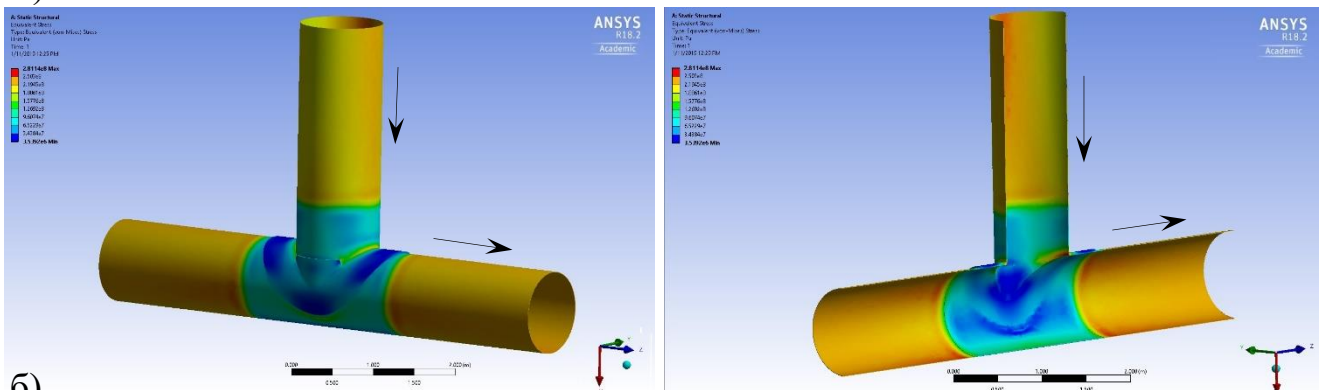
**Рисунок 5.5** – Розподіл еквівалентних напружень Мізеса в трійнику, в якому потік із магістралі трійника повністю перетікає у відгалуження трійника

Розглянемо зварний трійник із підсилюючими накладками в якому увесь потік із відгалуження трійника перетікає в одну сторону магістралі трійника. Результати моделювання розподілу тиску в цьому трійнику в

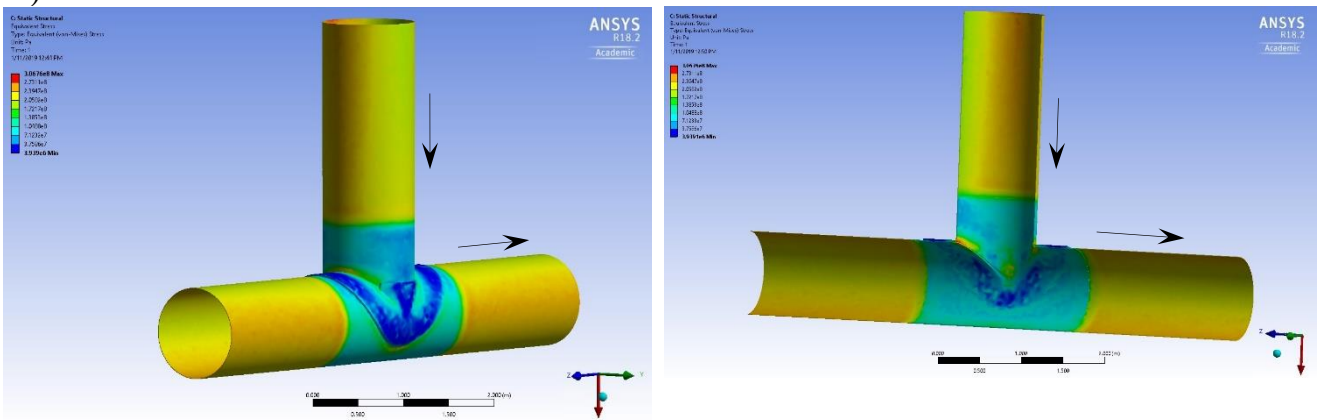
гідрогазодинамічному модулі ANSYS Fluent наведені на рисунку 2.15, д, е. Ці результати імпортувались з гідрогазодинамічного модуля ANSYS Fluent у механічний модуль ANSYS Static Structural.

Результати моделювання напруженого стану трійника візуалізовувались побудовою тривимірних кольорових полів еквівалентних напружень за Мізесом у трійнику від дії тільки внутрішнього тиску (рисунок 5.6, а) і від дії внутрішнього тиску та температурного перепаду (рисунок 5.6, б). Як видно з результатів, у стінці трійників відбувається нерівномірний розподіл еквівалентних напружень.

а)



б)



а) – від дії внутрішнього тиску; б) – від дії внутрішнього тиску та температурного перепаду

**Рисунок 5.6** – Розподіл еквівалентних напружень Мізеса в трійнику, в якому весь потік із відгалуження трійника перетікає в одну сторону магістралі трійника

Максимальні еквівалентні напруження в трійнику зосереджені в місці приєднання відгалуження до магістралі трійника, де немає підсилюючої накладки на відгалуженні трійника (найбільше значення складає 281,1 МПа при дії тільки внутрішнього тиску і 306,8 МПа при дії внутрішнього тиску та температурного



перепаду). Отже, мінімальний запас міцності трійників спостерігається в місці приєднання відгалуження до магістралі трійника, де немає підсилюючої накладки на відгалуженні трійника. [78]

### **5.3 Дослідження напружено-деформованого стану ерозійно зношених фасонних елементів трубопроводів**

У фасонних елементах трубопроводів відбувається ерозійне зношування стінки, що впливає на їх напружений стан. Серед вимог, які ставляться до фасонних елементів трубопроводів для забезпечення їх надійності, є контролювання під час експлуатації трубопроводу зміни форми та величини ерозійних дефектів їх стінки, максимально точно оцінювання ступеня небезпеки ерозійно зношених фасонних елементів. Для цього необхідно дослідити напружено-деформований стан ерозійно зношених фасонних елементів із урахуванням надзвичайно складної тривимірної форми ерозійних дефектів і газодинамічних процесів, які відбуваються в їх внутрішній порожнині, температурних впливів. Вирішення даної проблеми дозволить оцінити працездатність і визначити залишковий ресурс ерозійно зношених фасонних елементів, попередити аварійні ситуації, а також визначити періодичність регламентних робіт із обстеження ерозійно зношених фасонних елементів трубопроводів.

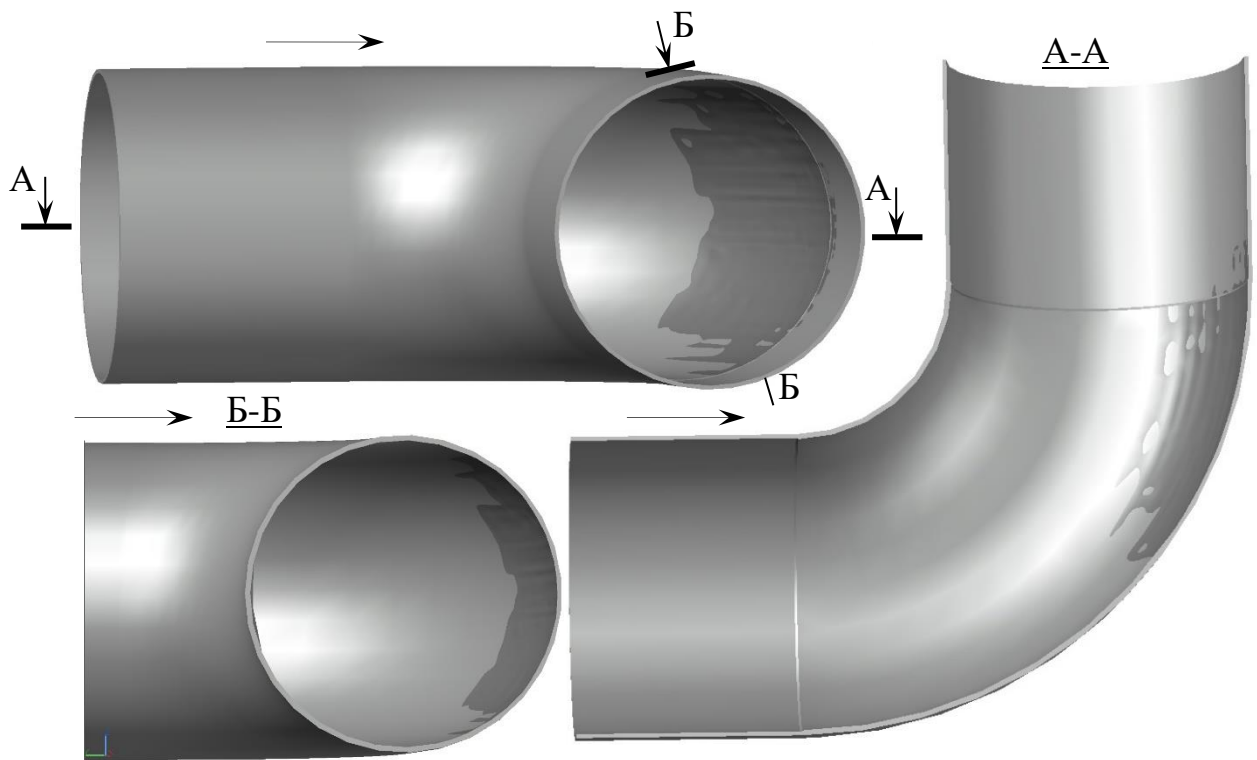
Моделювання ерозійного зношування фасонних елементів газопроводів виконувалось у гідрогазодинамічному модулі ANSYS Fluent. Результати такого моделювання наведено в підрозділі 5.1. За результатами моделювання було побудовано поля швидкості ерозійного зношування фасонних елементів на контурах.

Ерозійне зношування фасонних елементів відбувається з певною швидкістю, і форма ерозійних дефектів з часом змінюється. Величина ерозійних дефектів весь час збільшується. Для врахування впливу складної форми внутрішньої поверхні стінки фасонних елементів у місці ерозійного зношування та збільшення величини ерозійного зношування на напружений стан фасонних елементів треба побудувати

геометричні моделі фасонних елементів із ерозійними дефектами стінки, які будуть через певні проміжки часу. Стінка труби фасонних елементів у місці ерозійного зношування повинна “переміщуватись” відповідно до швидкості ерозійного зношування. Для цього з поля швидкості ерозійного зношування на контурах фасонних елементів (підрозділ 3.1) визначались величини швидкості ерозійного зношування фасонних елементів у багатьох їх точках і розраховувалась швидкість стоншення стінки в цих точках як відношення швидкості ерозійного зношування до густини металу. За швидкістю стоншення стінки визначались величини стоншення стінки фасонних елементів у багатьох точках через певний час, і в системі автоматизованого проектування та креслення AutoCad будувались геометричні моделі фасонних елементів зі складною тривимірною геометричною формою ерозійних дефектів стінки.

Розглянемо відвід з кутом вигину  $90^\circ$  (рисунок 4.2, а). Результати моделювання ерозійного зношування відводу в гідрогазодинамічному модулі ANSYS Fluent наведені на рисунку 4.2, в, г. За цими результатами будувались геометричні моделі відводу з складною тривимірною геометричною формою ерозійних дефектів стінки, які будуть з’являтися через 30, 42, 46 і 52 роки експлуатації газопроводу (рисунок 5.7). Максимальна глибина ерозійних дефектів стінки відводів через 30 років експлуатації складала 6, 9 мм; 42 роки – 9,6 мм; 46 років – 10,5 мм і 52 роки – 11,9 мм.

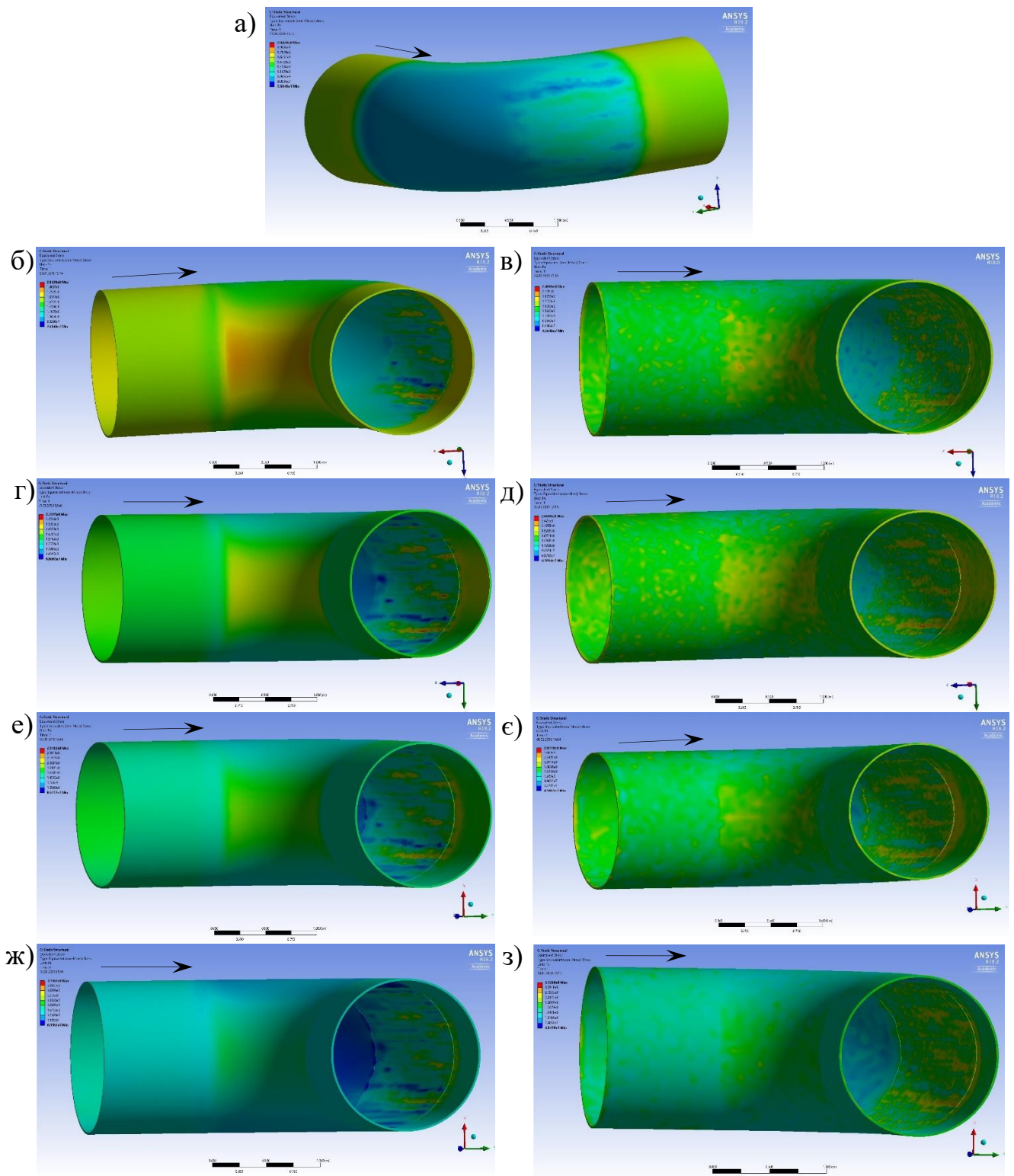
Моделювання напружено-деформованого стану відводу з ерозійним зношенням стінки виконувалось аналогічно наведеному вище моделюванню напружено-деформованого стану відводу без дефектів. Для такого моделювання побудовані в AutoCad геометричні моделі відводів зі складною тривимірною геометричною формою ерозійних дефектів стінки (рисунок 5.7) імпортувались у гідрогазодинамічний модуль ANSYS Fluent для моделювання руху ними газового потоку, в модуль розрахунку теплових процесів Transient Thermal для моделювання температурного перепаду в стінках відводу та в механічний модуль ANSYS Static Structural для моделювання їх напружено-деформованого стану.



**Рисунок 5.7** – Геометрична модель ерозійно зношеного відводу

Результати моделювання напружено-деформованого стану відводів із ерозійним зношенням стінки візуалізовувались побудовою тривимірних кольорових полів еквівалентних напружень за Мізесом на контурах відводу від дії тільки внутрішнього тиску (рисунок 5.8, а, б, г, е, ж) і від дії внутрішнього тиску і температурного перепаду (рисунок 5.8, в, д, є, з) для різної величини ерозійних дефектів.

Як видно з результатів, при максимальній глибині ерозійного дефекту стінки відводу 6,9 мм максимальні еквівалентні напруження зосереджені з ввігнутого боку відводу та в найглибших місцях ерозійного дефекту (рисунок 5.8, а, б, в), а при максимальній глибині ерозійних дефектів стінки 9,6 мм, 10,5 мм і 11,9 мм максимальні еквівалентні напруження зосереджені в найглибших місцях ерозійного дефекту (рисунок 5.8, г, д, е, є, ж, з). Величини максимальних еквівалентних напружень у відводі з ерозійними дефектами від дії тільки внутрішнього тиску та від дії внутрішнього тиску і температурного перепаду наведені в таблиці 5.1.



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

**Рисунок 5.8** – Розподіл еквівалентних напружень Мізеса в ерозійно зношеному відводі

**Таблиця 5.1** – Максимальні еквівалентні напруження у відводі з ерозійними дефектами

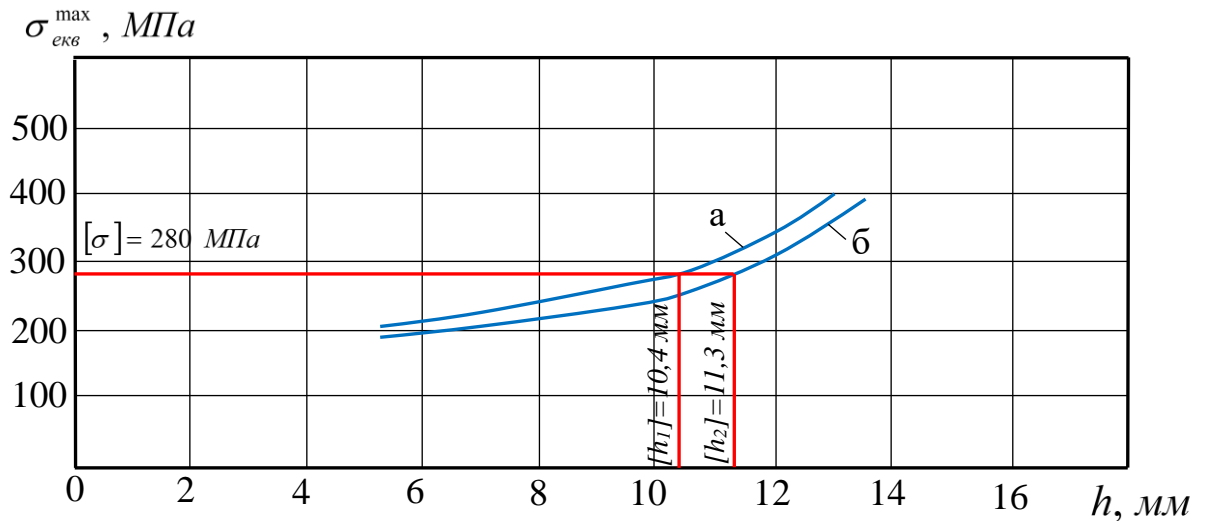
№	Максимальна глибина ерозійного дефекту, мм	Максимальні еквівалентні напруження, МПа	
		від дії внутрішнього тиску	від дії внутрішнього тиску та температурного перепаду
1	6,9	204,3	240,9
2	9,6	231,1	267,0
3	10,5	257,0	287,8
4	11,9	313,6	342,7

При максимальній глибині ерозійних дефектів стінки 9,6 мм, 10,5 мм і 11,9 мм еквівалентні напруження в найглибших місцях ерозійного дефекту більші, ніж з увігнутого боку відводу та в прямолінійних ділянках газопроводу.

За результатами моделювання напружено-деформованого стану ерозійно зношеного відводу з кутом вигину 90° було побудовано графічні залежності максимальних еквівалентних напружень  $\sigma_{екв}^{max}$  від максимальної глибини ерозійного дефекту стінки відводу  $h$  при дії тільки внутрішнього тиску (рисунок 5.9, а) і при дії внутрішнього тиску та температурного перепаду (рисунок 5.9, б).

Із графічної залежності (рисунок 5.9, а) була визначена така величина максимальної глибини ерозійного дефекту стінки відводу при дії тільки внутрішнього тиску, коли максимальні еквівалентні напруження у відводі рівні допустимому напруженню  $[\sigma]$ , яке розраховувалось за ГОСТ 32388 [300]. Для моделі, що розглядається, ця величина складає  $[h_1]=10,4$  мм. Її будемо називати допустимою максимальною глибиною ерозійного дефекту стінки відводу  $[h]$ . При експлуатуванні газопроводу в заданому у вихідних даних режимі і при максимальній глибині ерозійного дефекту стінки відводу, більшій 10,4 мм, може початись розвиватись пластична деформація металу і втрачатись несуча здатність стінки труби. При дії внутрішнього тиску та температурного перепаду (рисунок 5.9,

б) допустима максимальна глибина ерозійного дефекту стінки відводу складає  $[h_2]=11,3$  мм. Тому експлуатація даного газопроводу дозволяється, якщо при дії внутрішнього тиску та температурного перепаду максимальна глибина ерозійного дефекту не перевищує 11,3 мм.



а) – від дії внутрішнього тиску; б) – від дії внутрішнього тиску та температурного перепаду

**Рисунок 5.9** – Залежність максимальних еквівалентних напружень від максимальної глибини ерозійного дефекту стінки відводу

Допустима товщина стінки в місці ерозійного зношування відводу дорівнюватиме

$$[\delta] = \delta_{н.відв} - [h], \quad (5.4)$$

де  $\delta_{н.відв}$  – номінальна товщина стінки відводу.

Для моделі, що розглядається,  $[\delta_1]=13,6$  мм при дії тільки внутрішнього тиску та  $[\delta_2]=12,7$  мм при дії внутрішнього тиску та температурного перепаду.

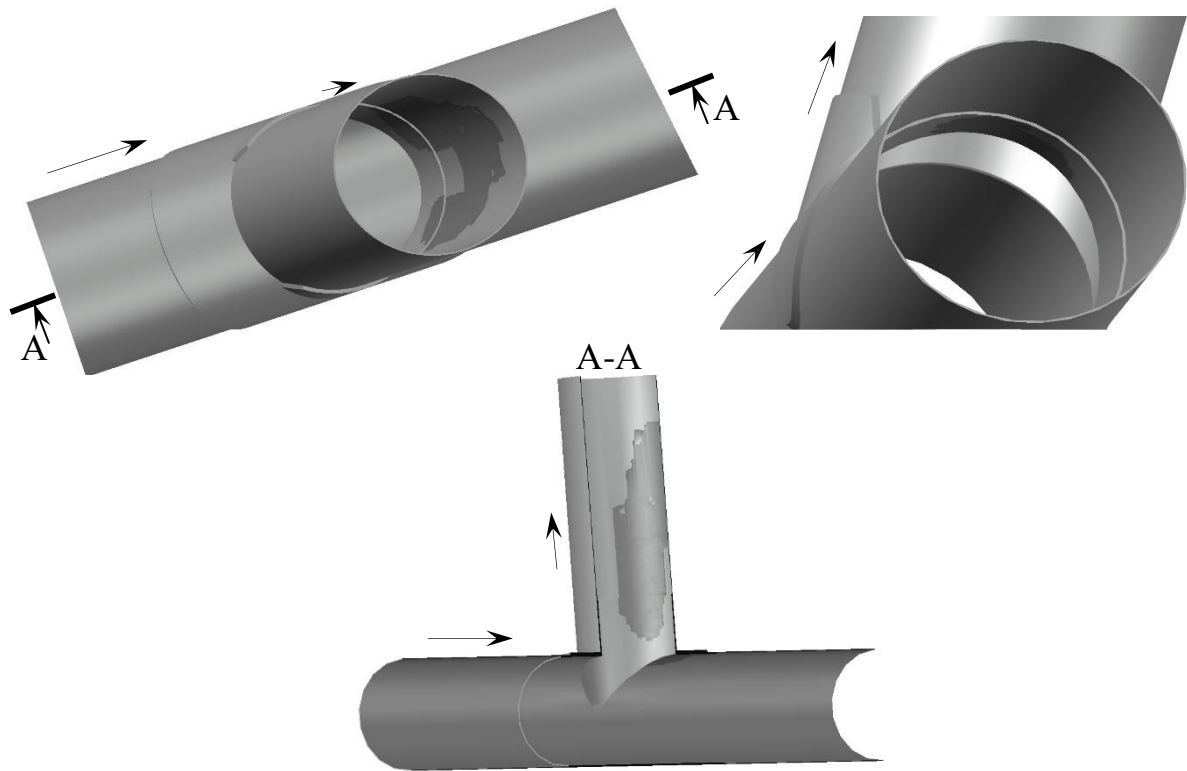
Розглянемо зварний трійник із підсилюючими накладками (рисунок 4.3, а), у якому потік рухається магістраллю трійника і з магістралі повністю перетікає у відгалуження трійника. Результати моделювання ерозійного зношування цього трійника в гідрогазодинамічному модулі ANSYS Fluent наведені на рисунку 4.3, в, г.

За цими результатами будувались геометричні моделі трійника зі складною тривимірною геометричною формою ерозійних дефектів стінки, які будуть через 30, 42, 46 і 52 роки експлуатації газопроводу (рисунок 5.10). Максимальна глибина ерозійних дефектів стінки трійника в верхній частині магістралі трійника з правого боку відгалуження (за напрямком руху газу магістраллю трійника) (рисунок 5.10) через 30 років експлуатації склала 4,7 мм; 42 роки – 6,6 мм; 46 років – 7,2 мм і 52 роки – 8,2 мм. Із правої сторони відгалуження трійника і прилеглої до нього труби (за напрямком руху газу магістраллю трійника) (рисунок 5.10) максимальна глибина ерозійних дефектів стінки трійника через 30 років експлуатації склала 4,1 мм; 42 роки – 5,7 мм; 46 років – 6,2 мм і 52 роки – 7,0 мм.

Геометричні моделі трійників зі складною тривимірною геометричною формою ерозійних дефектів стінки (рисунок 5.10) імпортувались у гідрогазодинамічний модуль ANSYS Fluent для моделювання руху ними газового потоку, у модуль розрахунку теплових процесів Transient Thermal для моделювання температурного перепаду в стінках трійника та в механічний модуль ANSYS Static Structural для моделювання їх напруженого стану.

Результати моделювання напруженого стану трійників, де газ рухається магістраллю трійника і з магістралі весь потік спрямовується у відгалуження трійника, з ерозійним зношенням стінки візуалізовувались побудовою тривимірних кольорових полів еквівалентних напружень за Мізесом на контурах трійника: від дії тільки внутрішнього тиску (рисунок 5.11, а, б, в, г) і від дії внутрішнього тиску та температурного перепаду (рисунок 5.12, а, б, в, г) – для різної величини ерозійних дефектів стінки.

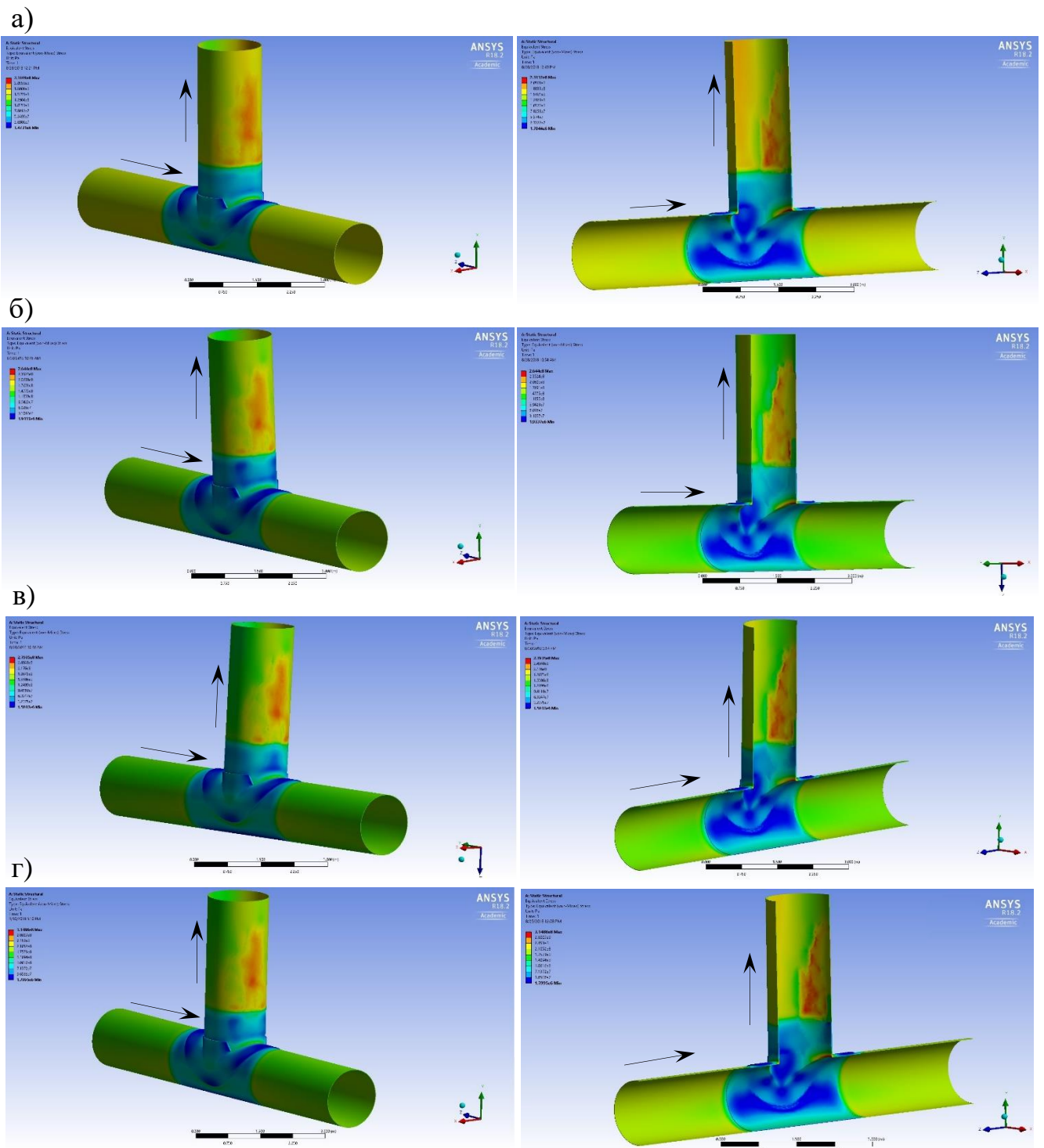
Як видно з результатів моделювання напруженого стану трійників з ерозійним зношенням стінки (рисунок 5.11, рисунок 5.12), ерозійні дефекти в верхній частині магістралі трійника з правої сторони відгалуження (за напрямком руху газу магістраллю трійника) (рисунок 5.10) не впливають на напружений стан трійника, оскільки трійник у цьому місці підсилений накладкою, а товщина стінки трійника є більшою, ніж товщина стінки приварених до нього ділянок трубопроводу. Також на напружений стан трійника не чинить суттєвий вплив



**Рисунок 5.10** – Геометрична модель ерозійно зношеного трійника в якому потік із магістралі повністю перетікає у відгалуження трійника

ерозійне зношування відгалуження трійника (рисунок 5.10), оскільки товщина його стінки також є більшою, ніж товщина стінки привареної до нього труби. Ерозійне зношування привареної до відгалуження трійника труби (рисунок 5.10) спричинює зміни її напруженого стану (рисунок 5.11, рисунок 5.12). Максимальні еквівалентні напруження в цій трубі зосереджені у найглибших місцях ерозійного дефекту з внутрішньої сторони труби і простягаються вздовж твірної труби з зовнішньої її сторони в середній частині ерозійного дефекту (рисунок 5.11, рисунок 5.12). Величини максимальних еквівалентних напружень у привареній до відгалуження трійника трубі в місці ерозійних дефектів стінки від дії тільки внутрішнього тиску та від дії внутрішнього тиску і температурного перепаду наведені в таблиці 5.2. Як видно з результатів моделювання напруженого стану трійників з ерозійним зношенням стінки (рисунок 5.11, рисунок 5.12), ерозійні дефекти в верхній частині магістралі трійника з правої сторони відгалуження (за напрямком руху газу магістраллю трійника) (рисунок 5.10) не впливають на напружений стан трійника, оскільки трійник в цьому місці підсилений накладкою, а товщина стінки трійника

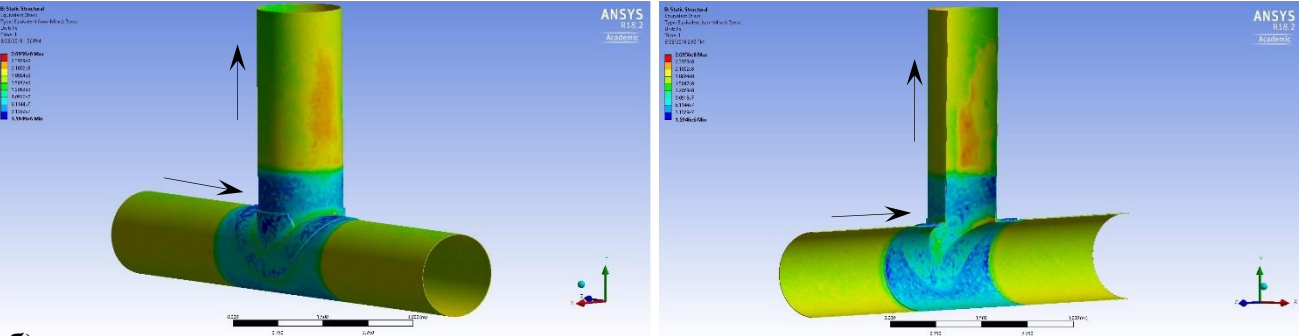




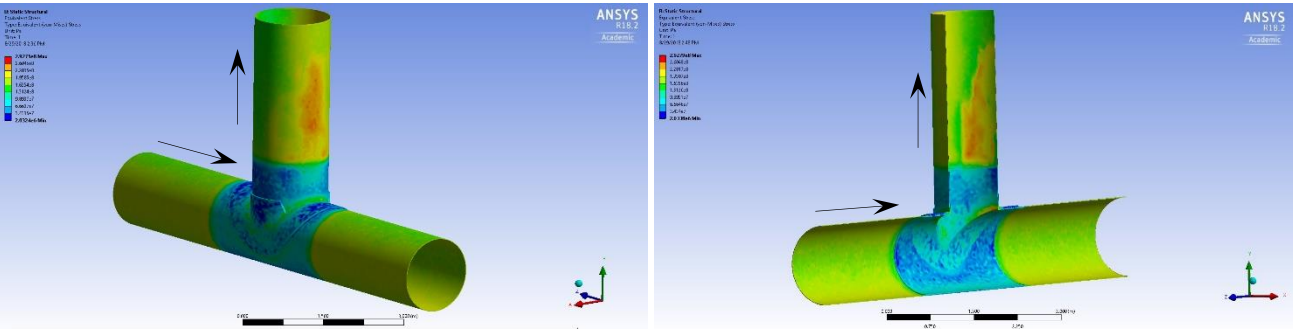
а) – максимальна глибина ерозійного дефекту стінки 4,1 мм; б) – максимальна глибина ерозійного дефекту стінки 5,7 мм; в) – максимальна глибина ерозійного дефекту стінки 6,2 мм; г) – максимальна глибина ерозійного дефекту стінки 7,0 мм

**Рисунок 5.11** – Розподіл еквівалентних напружень Мізеса від дії внутрішнього тиску у трійнику з ерозійним зношенням стінки, в якому потік із магістралі повністю перетікає у відгалуження трійника

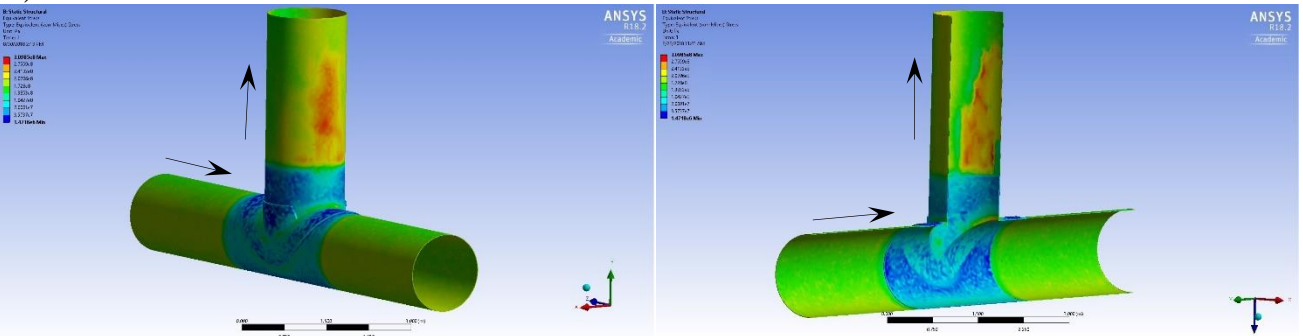
a)



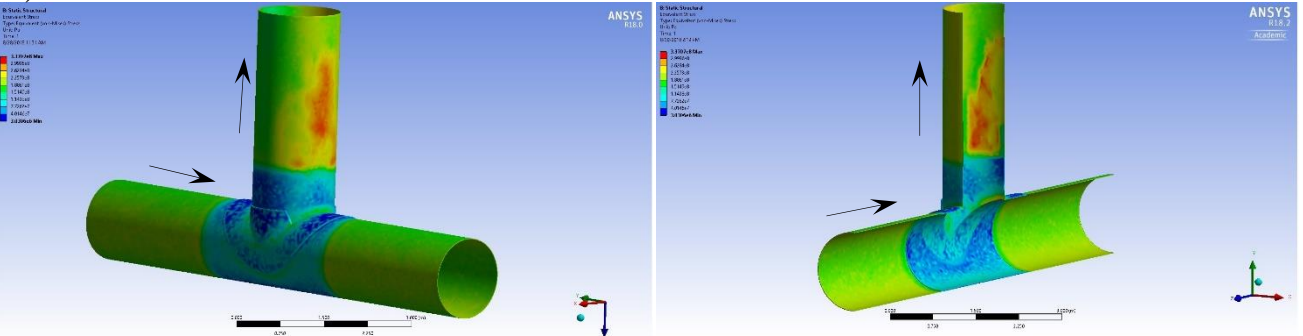
б)



в)



г)



а) – максимальна глибина ерозійного дефекту стінки 4,1 мм; б) – максимальна глибина ерозійного дефекту стінки 5,7 мм; в) – максимальна глибина ерозійного дефекту стінки 6,2 мм; г) – максимальна глибина ерозійного дефекту стінки 7,0 мм

**Рисунок 5.12** – Розподіл еквівалентних напружень Мізеса від дії внутрішнього тиску та температурного перепаду в трійнику з ерозійним зношенням стінки, в якому потік із магістралі повністю перетікає у відвід трійника

є більшою, ніж товщина стінки приварених до нього ділянок трубопроводу. Також на напружений стан трійника не чинить суттєвий вплив ерозійне зношування відгалуження трійника (рисунок 5.10), оскільки його товщина стінки також є більшою, ніж товщина стінки привареної до нього труби. Ерозійне зношування привареної до відгалуження трійника труби (рисунок 5.10) призводить до зміни її напруженого стану (рисунок 5.11, рисунок 5.12). Максимальні еквівалентні напруження в цій трубі зосереджені у найглибших місцях ерозійного дефекту з внутрішньої сторони труби і простягаються вздовж твірної труби з зовнішньої її сторони в середній частині ерозійного дефекту (рисунок 5.11, рисунок 5.12). Величини максимальних еквівалентних напружень у привареній до відгалуження трійника трубі в місці ерозійних дефектів стінки від дії тільки внутрішнього тиску та від дії внутрішнього тиску і температурного перепаду наведені в таблиці 5.2.

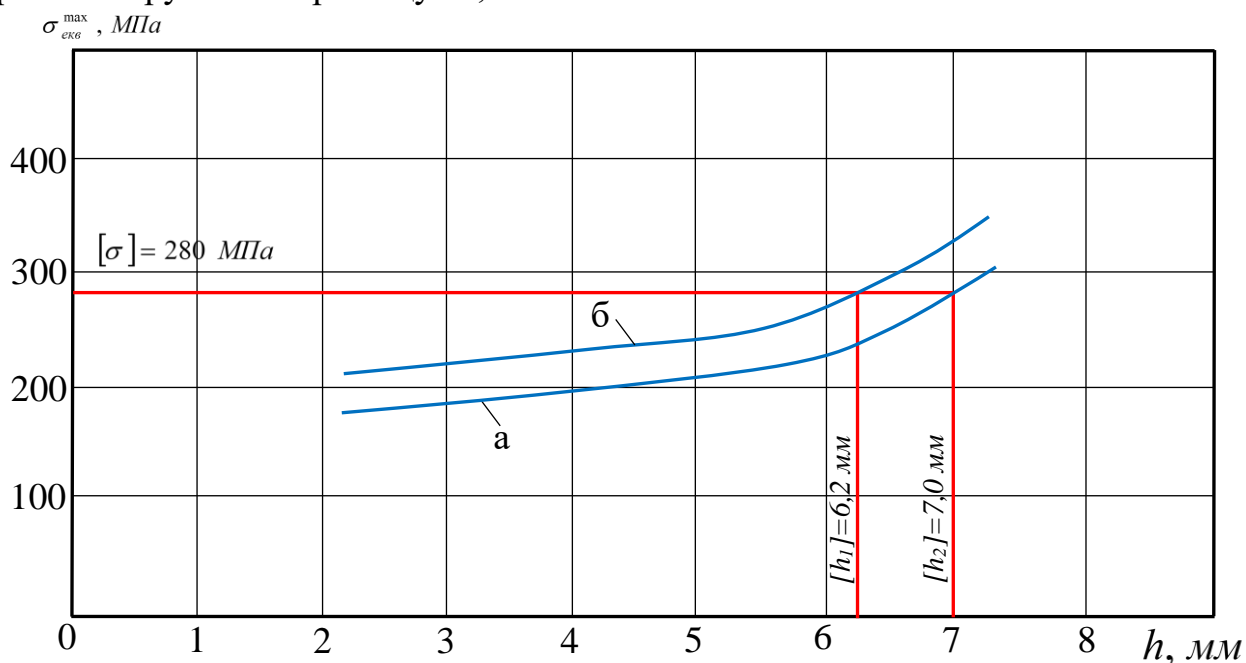
**Таблиця 5.2** – Максимальні еквівалентні напруження у привареній до відгалуження трійника трубі в місці ерозійних дефектів стінки

№	Максимальна глибина ерозійного дефекту, мм	Максимальні еквівалентні напруження, МПа	
		від дії внутрішнього тиску	від дії внутрішнього тиску та температурного перепаду
1	4,1	206	232
2	5,7	222	254
3	6,2	245	280
4	7,0	279	325

За результатами моделювання напружено-деформованого стану ерозійно зношеного зварного трійника з підсилюючими накладками, в якому потік із магістралі повністю перетікає у відгалуження трійника (рисунок 5.11, рисунок 5.12) було побудовано графічні залежності максимальних еквівалентних напружень  $\sigma_{екв}^{max}$  від максимальної глибини ерозійного дефекту стінки трійника  $h$  при дії тільки внутрішнього тиску (рисунок 5.13, а) та при дії внутрішнього тиску

та температурного перепаду (рисунок 5.13, б).

Із графічної залежності (рисунок 5.13, а) була визначена така величина максимальної глибини ерозійного дефекту при дії тільки внутрішнього тиску, коли максимальні еквівалентні напруження рівні допустимому напруженню  $[\sigma]$ , яке розраховувалось за ГОСТ 32388 [300]. Для моделі, що розглядається, ця величина складає  $[h_1]=6,2$  мм. При експлуатуванні газопроводу в заданому у вихідних даних режимі і при максимальній глибині ерозійного дефекту стінки привареної до відгалуження трійника труби більше 6,2 мм може почати розвиватись пластична деформація металу та втрачатись несуча здатність стінки труби. При дії внутрішнього тиску та температурного перепаду (рисунок 5.13, б) допустима максимальна глибина ерозійного дефекту стінки, привареної до відгалуження трійника труби, складає  $[h_2]=7,0$  мм. Тому експлуатація даного газопроводу дозволяється, якщо при дії внутрішнього тиску та температурного перепаду максимальна глибина ерозійного дефекту стінки привареної до відгалуження трійника труби не перевищує 7,0 мм.



а) – від дії внутрішнього тиску; б) – від дії внутрішнього тиску та температурного перепаду

**Рисунок 5.13** – Залежність максимальних еквівалентних напружень від максимальної глибини ерозійного дефекту стінки, привареної до відгалуження трійника труби

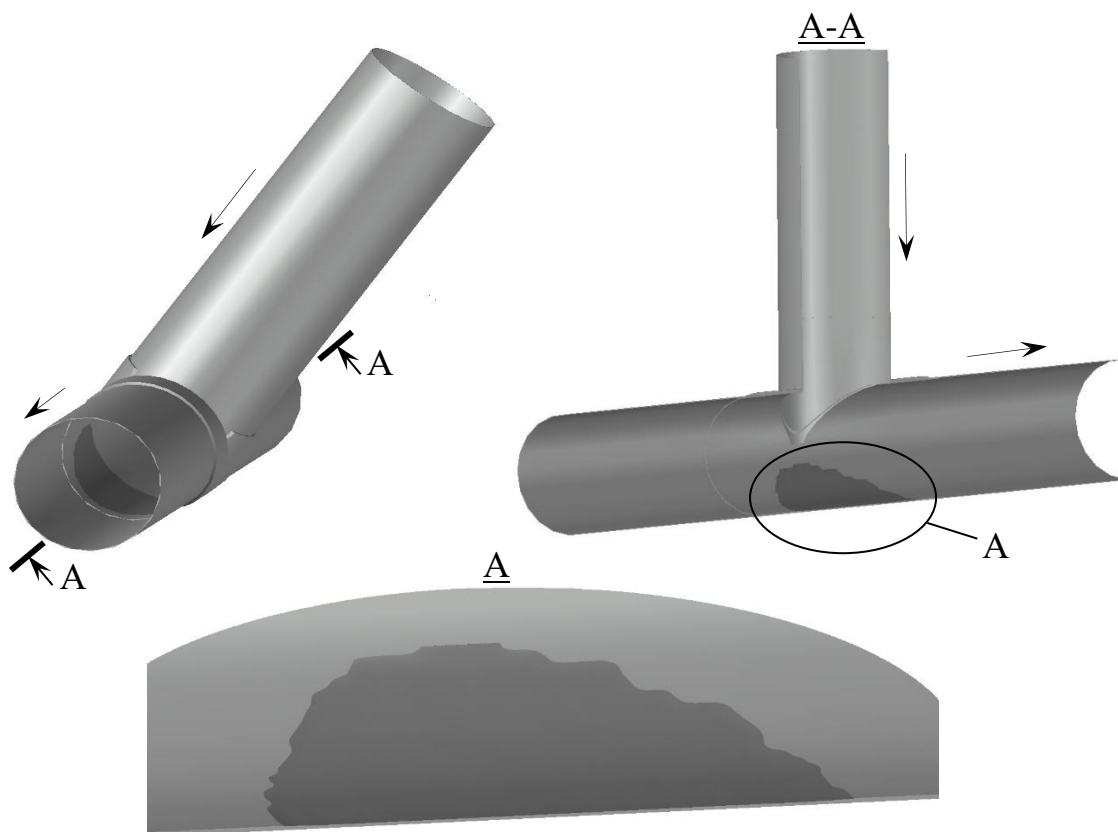
Для моделі, що розглядається, розрахована за (5.4) допустима товщина стінки в місці ерозійного зношування привареної до відгалуження трійника труби дорівнюватиме  $[\delta_1]=125$  мм при дії тільки внутрішнього тиску і  $[\delta_2]=11,7$  мм при дії внутрішнього тиску та температурного перепаду.

Розглянемо зварний трійник із підсилюючими накладками, в якому потік із відгалуження повністю перетікає в одну сторону магістралі трійника (рисунок 4.5, а). Результати моделювання ерозійного зношування цього трійника в гідрогазодинамічному модулі ANSYS Fluent наведені на рисунку 4.5, в, г.

За цими результатами будувались геометричні моделі трійника з складною тривимірною геометричною формою ерозійних дефектів стінки, які будуть через 68, 76, 80 і 84 роки експлуатації газопроводу (рисунок 5.14). Максимальна глибина ерозійних дефектів стінки магістралі трійника навпроти відгалуження (рисунок 5.14) через 68 років експлуатації склала 6,4 мм; 76 років – 7,1 мм; 80 років – 7,5 мм і 84 роки – 7,9 мм. Геометричні моделі трійників з складною тривимірною геометричною формою ерозійних дефектів стінки (рисунок 5.14) імпортувались у гідрогазодинамічний модуль ANSYS Fluent для моделювання руху ними газового потоку, в модуль розрахунку теплових процесів Transient Thermal для моделювання температурного перепаду в стінках трійника та в механічний модуль ANSYS Static Structural для моделювання їх напруженого стану.

Результати моделювання напруженого стану трійників, у яких потік із відгалуження трійника повністю перетікає в одну сторону магістралі трійника з ерозійним зношенням стінки, візуалізовувались побудовою тривимірних кольорових полів еквівалентних напружень за Мізесом на контурах трійника: від дії тільки внутрішнього тиску (рисунок 5.15, а, б, в, г) і від дії внутрішнього тиску і температурного перепаду (рисунок 5.16, а, б, в, г) – для різної величини ерозійних дефектів стінки.

Як видно з результатів моделювання напруженого стану трійників з ерозійним зношенням стінки (рисунок 5.15, рисунок 5.16), ерозійні дефекти стінки магістралі трійника навпроти відгалуження (рисунок 5.14) призводять до зміни напруженого стану трійника. За результатами моделювання встановлено, що до 62



**Рисунок 5.14** – Геометрична модель ерозійно зношеного трійника, в якому потік із відводу трійника повністю перетікає в одну сторону магістралі трійника

років експлуатації трійника еквівалентні напруження в місці ерозійного зношення трійника є такими ж, як на початку його ерозійного зношення. При подальшій експлуатації трійника еквівалентні напруження в місці його ерозійного дефекту зростають. Максимальні еквівалентні напруження в місці ерозійного дефекту трійника зосереджені в найглибших місцях ерозійного дефекту з внутрішньої сторони магістралі трійника і від дії тільки внутрішнього тиску через 68 років експлуатації трійника складають 180 МПа, через 76 років – 198 МПа, через 80 років – 218 МПа, а через 84 роки – 249 МПа. Від дії внутрішнього тиску та температурного перепаду максимальні еквівалентні напруження в місці ерозійного дефекту трійника через 68 років експлуатації трійника складають 201 МПа, через 76 років – 222 МПа, через 80 років – 244 МПа, а через 84 роки – 272 МПа. Із зовнішньої сторони магістралі трійника в місці ерозійного дефекту відбувається незначне збільшення еквівалентних напружень.

За результатами моделювання виявлено, що максимальні еквівалентні

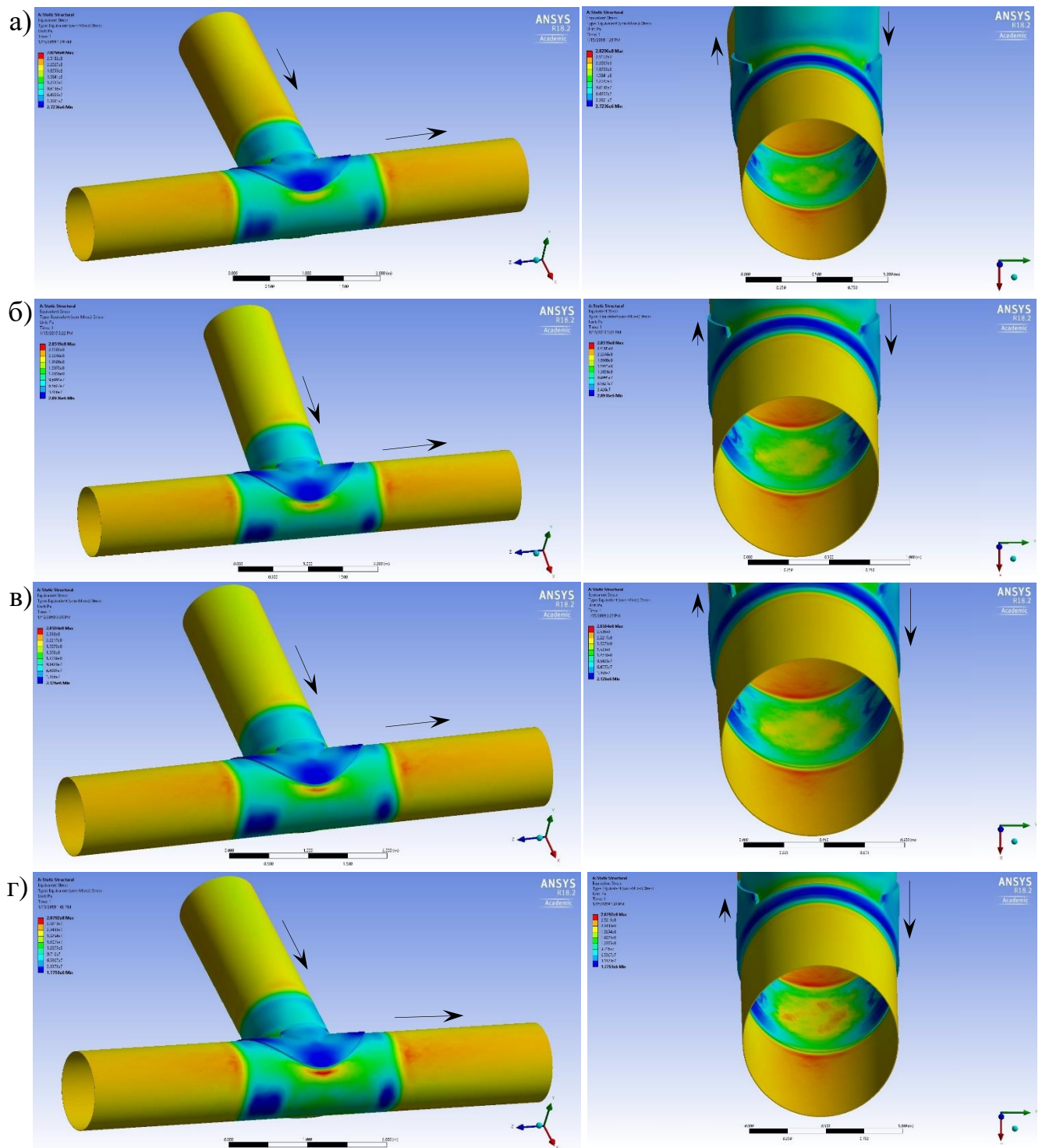
напруження Мізеса в трійнику, зумовлені ерозійним зношенням стінки його магістралі від дії тільки внутрішнього тиску та від дії внутрішнього тиску і температурного перепаду (рисунок 5.15, рисунок 5.16), – зосереджені з зовнішньої сторони магістралі трійника біля підсилюючої накладки, розміщеної на магістралі трійника. Зона максимальних еквівалентних напружень має дугоподібну форму й огинає нижню частину розміщеної на магістралі трійника підсилюючої накладки з двох боків магістралі трійника. Концентрація напружень у цьому місці зумовлена збільшенням деформацій непідсиленої частини магістралі трійника, причиною чого є зменшення товщини стінки магістралі трійника в місці ерозійного зношування.

У міру збільшення розмірів ерозійного дефекту напруження з зовнішньої сторони магістралі трійника біля підсилюючої накладки, розміщеної на його магістралі, зростають (рисунок 5.15, рисунок 5.16). Величини максимальних еквівалентних напружень у цьому місці, зумовлені ерозійним дефектом стінки магістралі трійника від дії тільки внутрішнього тиску та від дії внутрішнього тиску та температурного перепаду, наведені в таблиці 5.3.

За результатами моделювання напружено-деформованого стану зварного трійника з підсилюючими накладками, в якому весь потік із відгалуження трійника

**Таблиця 5.3** – Максимальні еквівалентні напруження у магістралі трійника, зумовлені ерозійним дефектом його стінки

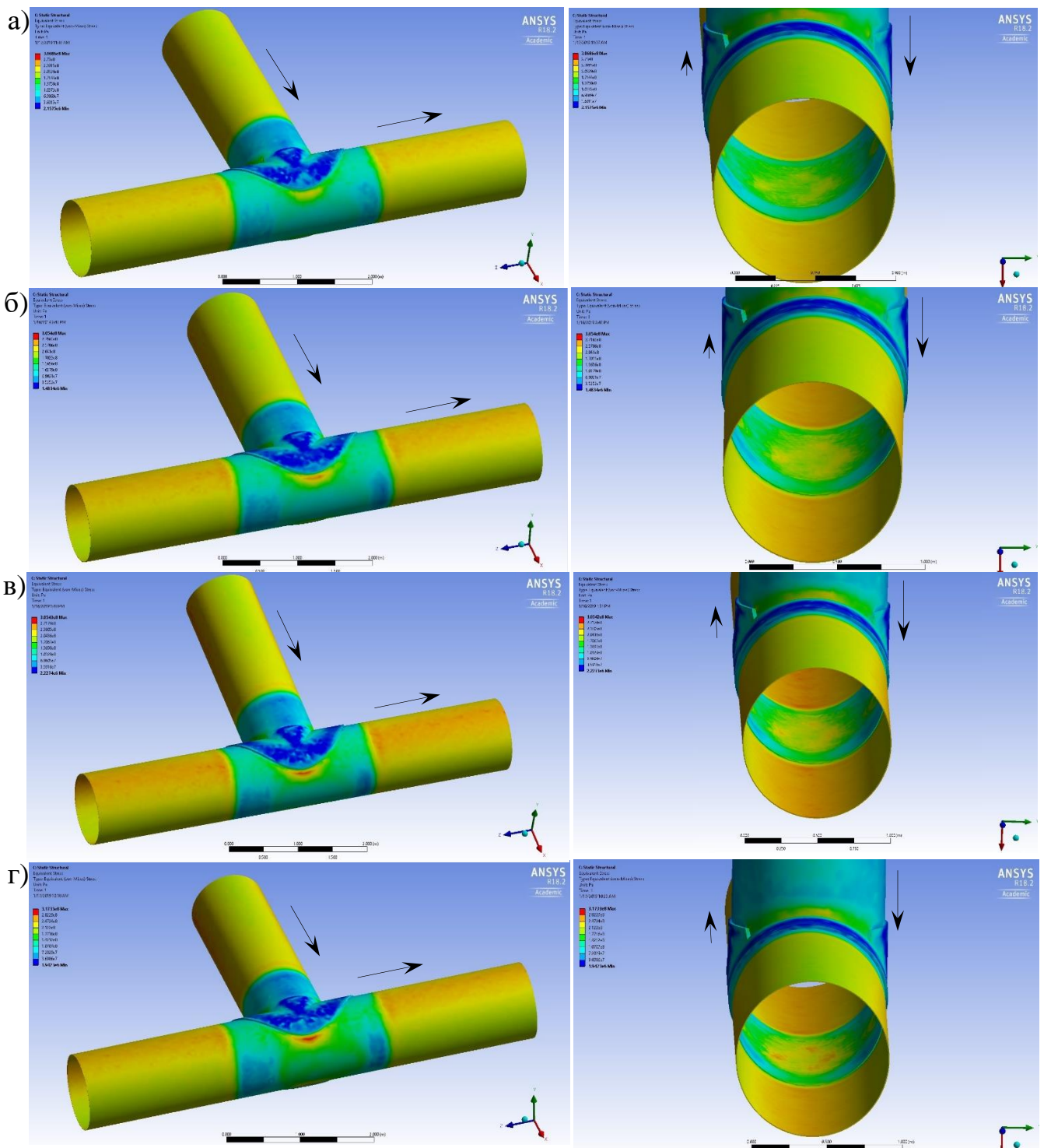
№	Максимальна глибина ерозійного дефекту, мм	Максимальні еквівалентні напруження, МПа	
		від дії внутрішнього тиску	від дії внутрішнього тиску та температурного перепаду
1	6,4	215	231
2	7,1	236	255
3	7,5	256	281
4	7,9	287	317



а) – максимальна глибина ерозійного дефекту стінки 6,4 мм; б) – максимальна глибина ерозійного дефекту стінки 7,1 мм; в) – максимальна глибина ерозійного дефекту стінки 7,5 мм; г) – максимальна глибина ерозійного дефекту 7,9 мм

**Рисунок 5.15** – Розподіл еквівалентних напружень Мізеса від дії внутрішнього тиску в трійнику з ерозійним зношенням стінки, в якому потік із відгалуження трійника повністю перетікає в одну сторону магістралі трійника

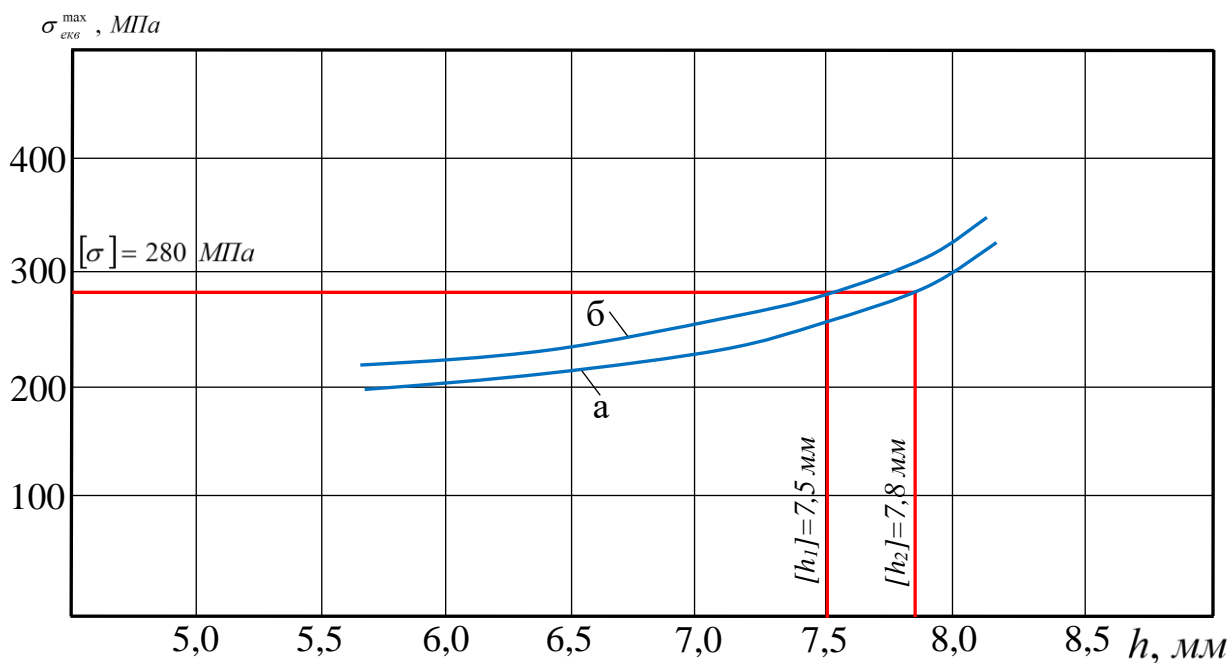




а) – максимальна глибина ерозійного дефекту стінки 6,4 мм; б) – максимальна глибина ерозійного дефекту стінки 7,1 мм; в) – максимальна глибина ерозійного дефекту стінки 7,5 мм; г) – максимальна глибина ерозійного дефекту 7,9 мм

**Рисунок 5.16** – Розподіл еквівалентних напружень Мізеса від дії внутрішнього тиску та температурного перепаду в трійнику з ерозійним зношенням стінки, в якому потік із відгалуження трійника повністю перетікає в одну сторону магістралі трійника

перетікає в одну сторону магістралі трійника (рисунок 5.15, рисунок 5.16), було побудовано графічні залежності максимальних еквівалентних напружень  $\sigma_{екв}^{max}$  від максимальної глибини ерозійного дефекту стінки трійника  $h$  при дії тільки внутрішнього тиску (рисунок 5.17, а) і при дії внутрішнього тиску та температурного перепаду (рисунок 5.17, б).



а) – від дії внутрішнього тиску; б) – від дії внутрішнього тиску і температурного перепаду

**Рисунок 5.17** – Залежність максимальних еквівалентних напружень у стінці магістралі трійника зумовлених його ерозійним зношенням від максимальної глибини ерозійного дефекту стінки магістралі трійника

Із графічної залежності (рисунок 5.17, а) була визначена така величина максимальної глибини ерозійного дефекту при дії тільки внутрішнього тиску, коли максимальні еквівалентні напруження рівні допустимому напруженню  $[\sigma]$ . Для моделі, розглядається, ця величина складає  $[h_1]=7,5$  мм. При експлуатуванні газопроводу в заданому у вихідних даних режимі і при максимальній глибині ерозійного дефекту стінки магістралі трійника більше 7,5 мм можуть почати розвиватись пластичні деформації металу і втрачатись несуча здатність стінки

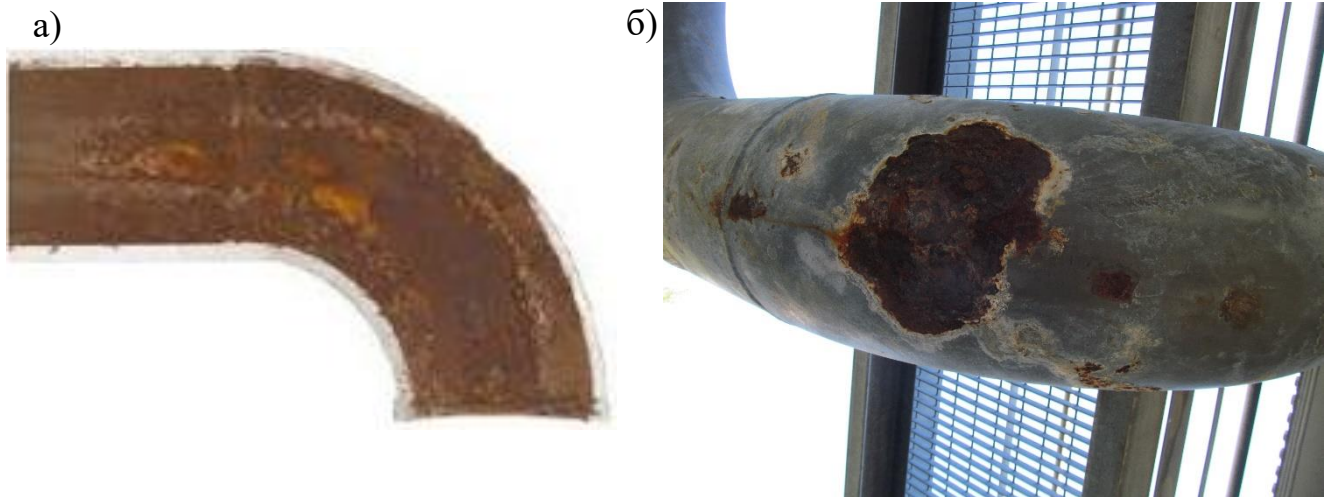
труби. При дії внутрішнього тиску та температурного перепаду (рисунок 5.17, б) допустима максимальна глибина ерозійного дефекту стінки магістралі трійника складає  $[h_2]=7,8$  мм. Тому експлуатація даного газопроводу дозволяється якщо при дії внутрішнього тиску та температурного перепаду максимальна глибина ерозійного дефекту стінки магістралі трійника не перевищує 7,8 мм.

Для моделі, що розглядається, розрахована за (5.5) допустима товщина стінки в місці ерозійного зношування магістралі трійника дорівнюватиме  $[\delta_1]=12,5$  мм при дії тільки внутрішнього тиску і  $[\delta_2]=12,2$  мм при дії внутрішнього тиску і температурного перепаду. [66]

#### **5.4 Математичне моделювання напружено-деформованого стану ерозійно-корозійно зношених відводів трубопроводних систем**

У відводах трубопроводів змінюється напрям руху потоку на кут  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $90^\circ$ , відбувається ударяння частинок, які містяться в потоці, до стінки відводу, що зумовлює ерозійне зношування (рисунок 5.18, а). Також під дією агресивних забруднень, які містяться в потоці транспортованого продукту, відбувається корозійне зношування внутрішньої стінки, а під дією агресивних компонентів, які містяться в довкіллі, – корозійне зношування зовнішньої стінки. Особливо часто відводи з корозійними дефектами стінки почали виявляти в обв'язках на виході компресорних станцій, які не експлуатувалися протягом тривалого часу. Надземні трубопроводи на виході нагнітачів до систем охолодження газу футеровані скловатою і, якщо газопровід не експлуатується, скловата змочується дощовою водою, що призводить до інтенсивного корозійного зношування стінки труб, зокрема відводів, яких є в великій кількості в обв'язках (рисунок 5.18, б). Зовнішні та внутрішні дефекти відводів трубопроводів впливають на їх напружено-деформований стан.

Щоб дослідити напружено-деформований стан ерозійно та корозійно зношених відводів трубопроводів, треба виявити та математично описати фактори силового впливу, які діють під час експлуатації трубопроводів.



а) – ерозія; б) – корозія

**Рисунок 5.18** – Дефекти відводів трубопроводів

Численні публікації, як правило, стосуються або оцінювання зміни напружено-деформованого стану ділянок трубопроводів за даними про переміщення точок поверхні під дією силових факторів невідомої природи [108, 301–305], або визначення кільцевих напружень у стінці ерозійно зношених ділянок трубопроводів, зумовлених дією внутрішнього тиску [220, 221, 304, 306, 307] чи еквівалентних напружень комп'ютерним моделюванням МСЕ. Питання комплексного оцінювання зміни напружено-деформованого стану під дією комплексу силових факторів різної природи вимагають більш детального їх вивчення, урахування кривизни осі квазіпрямолінійних та тороподібних ділянок трубопроводу (відводів гарячого гнuttя), ерозійного та корозійного зношення, яке зумовлює зменшення товщини стінки.

Для опису зміни напружено-деформованого стану трубопроводів за даними переміщення точок поверхні використовується методика, що отримала теоретичне обґрунтування в роботах [301, 302], згідно з якого для координат радіус-вектора  $\vec{r}$  будь-якої точки досліджуваної ділянки одержується подання

$$\vec{r}(s, \varphi, r, t, p_i) = \vec{r}_l(s, \varphi, r, t, p_i) + \rho(s, \varphi, r, t, p_i) (\cos \omega(s, \varphi, r, t, p_i) \vec{b}_l + \sin \omega(s, \varphi, r, t, p_i) \vec{n}_l) + \psi(s, \varphi, r, t, p_i) \cdot \vec{\tau}_l - \frac{D}{2} \vec{n}_l, \quad (5.5)$$

де  $s, \varphi, r$  – компоненти пов’язаної з тілом квазіциліндричної системи координат ( $s$  – повздожні координати,  $0 \leq s \leq l$ );

$\varphi$  – полярний кут у перерізі  $0 \leq \varphi \leq 2\pi$ ;

$r$  – радіальна компонента,  $R_B \leq r \leq R_3$ );

$l$  – довжина ділянки;

$R_B, R_3$  – внутрішній та зовнішній радіуси труби відповідно;

$t$  – час;

$p_i$  – коефіцієнти, що враховують тип зовнішніх навантажень (внутрішній тиск, кручення, повздожні переміщення, температурні градієнти тощо);

$\vec{r}_l$  – радіус-вектор точки на верхній твірній ділянки трубопроводу (для побудови  $\vec{r}_l$  за даними про переміщення точок верхньої твірної використовуються інтерполяційні згладжуючі сплайни [301, 302] із урахуванням точності вимірювання координат геодезичними [305, 308] методами або методами внутрішньотрубної інспекції [221, 309, 310]);

$\vec{n}_l, \vec{b}_l, \vec{\tau}_l$  – вектори нормалі, бінормалі та дотичної до поверхні твірної [311, 312];

$\rho(s, \varphi, r, t, p_i), \omega(s, \varphi, r, t, p_i), \psi(s, \varphi, r, t, p_i)$  – функції, що характеризують відповідно радіальні, полярні та повздожні переміщення точок досліджуваної ділянки (для прямолінійної ділянки трубопроводу приймається, що  $\rho(s, \varphi, r, t, p_i) = r, \omega(s, \varphi, r, t, p_i) = \varphi, \psi(s, \varphi, r, t, p_i) = 0$ ). Для більш складних деформацій вказані функції або задаються з урахуванням способу деформування, або ж приймається, що вони є лінійними комбінаціями компонентів  $s, \varphi, r$ , а коефіцієнти розкладу визначаються за методом мінімальних нев’язок [301].

За відомим поданням (5.5) визначаються наступні величини:

– компоненти векторів локального базису в початковий і контрольний моменти часу [313]

$$\vec{f}_i = \frac{\partial \vec{r}}{\partial x_i}; \quad x_1 = s; \quad x_2 = \varphi; \quad x_3 = r; \quad (5.6)$$

– компоненти метричного тензора в початковий та контрольний моменти часу [305]

$$g_{ij} = \frac{\partial \vec{r}}{\partial x_i} \frac{\partial \vec{r}}{\partial x_j} = \vec{f}_i \vec{f}_j; \quad (5.7)$$

– компоненти тензора деформацій [311]

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} (g_{ij} - g_{ij}^0), \quad (5.8)$$

де  $g_{ij}$ ,  $g_{ij}^0$  – компоненти метричного тензора в початковий і контрольний моменти часу;

– компоненти тензора напружень  $\sigma_{ij}$  у рамках моделі ізотропного тіла [313]

$$\sigma^{ij} = \lambda_1(\varepsilon) g^{ij} + 2\mu \varepsilon^{ij}, \quad (5.9)$$

де  $\sigma^{ij}$ ,  $g^{ij}$ ,  $\varepsilon^{ij}$  – контраваріантні компоненти тензорів напруження, метричного та тензора деформації відповідно.

Компоненти  $g^{ij}$  визначаються множенням матриці, оберненої до  $\{g^{ij}\}$ , визначеної за (5.7). Для інших контраваріантних компонент [310] відоме співвідношення між коваріантними та контраваріантними компонентами тензорів [311]

$$\begin{cases} \sigma^{ij} = \sum_{k,l=1}^3 g^{ik} g^{jl} \sigma_{kl}, \\ \varepsilon^{ij} = \sum_{k,l=1}^3 g^{ik} g^{jl} \varepsilon_{kl}, \end{cases} \quad (5.10)$$

При анізотропному тілі [313] компоненти тензора напружень визначаються наступним чином

$$\sigma_{ij} = \sum_{k,l=1}^3 c_{ijkl} \varepsilon_{kl}, \quad (5.11)$$

де  $c_{ijkl}$  – компоненти матриці круглих модулів.

Модель (5.7) – (5.11) дозволяє оцінити зміну напружено-деформованого стану при зміні координат точок внутрішньої поверхні трубопроводу.

В місцях криволінійних ділянок трубопроводів, тороподібних відводів трубопровід зазнає особливо значного ерозійного зношування, в результаті чого зменшується товщина стінки.

При моделюванні напруженого стану ділянок трубопроводу зі змінною формою поперечного перерізу (ерозійним чи корозійним зношенням стінки) задача оцінювання напружено-деформованого стану розв'язується в циліндричній системі координат з наступними допущеннями

$$\begin{cases} x = r \cos \varphi & 0 \leq \varphi \leq 2\pi \\ y = r \sin \varphi & R_{B.g} \leq r \leq R_{3.g}, \\ z = s & 0 \leq s \leq L \end{cases} \quad (5.12)$$

для яких символи Кристофеля II роду [311] мають тільки дві ненульові компоненти:

$\Gamma_{22}^1 = -r$ ;  $\Gamma_{12}^2 = \Gamma_{21}^2 = \frac{1}{r}$ . При цьому для компонент вектора переміщень робиться допущення

$$\begin{cases} \omega_1 = \omega(r, \theta) \\ \omega_2 = v(r, \theta) . \\ \omega_3 = 0 \end{cases} \quad (5.13)$$

Ненульові компоненти тензора деформацій будуть такими

$$\begin{cases} \varepsilon_{11} = \frac{\partial \omega}{\partial r}; \varepsilon_{22} = \frac{\partial v}{\partial \theta} + \omega r; \varepsilon_{33} = 0; \varepsilon_{13} = 0 \\ \varepsilon_{12} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial v}{\partial r} + \frac{\partial \omega}{\partial \theta} - 2v \frac{1}{r} \right); \varepsilon_{23} = 0 \end{cases} \quad (5.14)$$

У такому випадку система рівнянь рівноваги в рамках лінійної теорії крученості для визначення компонент  $\omega$ ,  $v$  набуває такого виду

$$\begin{cases} (\lambda + 2\mu) \left( \frac{\partial^2 \omega}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \omega}{\partial r} - \frac{\omega}{r^2} \right) - \lambda \left[ \frac{\partial v}{\partial \theta} \frac{2}{r^3} - \frac{1}{r} \frac{\partial^2 v}{\partial r^2} \right] + \\ + \mu \left[ \frac{\partial^2 v}{\partial r \partial \theta} \frac{1}{r^2} + 2 \frac{\partial^2 \omega}{\partial \theta^2} \frac{1}{r^2} - \frac{4}{r^3} \frac{\partial \omega}{\partial \theta} - 2 \frac{\partial v}{\partial \theta} \frac{1}{r^4} \right] = 0 \\ - 4\mu \left[ \frac{1}{2} \left( \frac{\partial v}{\partial r} + \frac{\partial \omega}{\partial \theta} - 2 \frac{v}{r} \right) \frac{1}{r^3} \right] + \frac{2\mu}{r^2} \left[ \frac{1}{2} \left( \frac{\partial^2 v}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 \omega}{\partial \theta^2} - 2 \frac{\partial v}{\partial r} \frac{1}{r} - \frac{2v}{r^2} \right) \right] + \\ + 2\mu \left( \frac{1}{2} \frac{\partial^2 v}{\partial r \partial \theta} + \frac{\partial^2 \omega}{\partial r \partial \theta} - \frac{2}{r} \frac{\partial v}{\partial r} \right) \frac{1}{r^2} + \frac{3\mu}{r^3} \left( \frac{\partial v}{\partial r} + \frac{\partial \omega}{\partial \theta} - \frac{2v}{r} \right) = 0 \end{cases} \quad (5.15)$$

З граничними умовами

$$\begin{cases} \sigma^{22} \Big|_{r=R_{B,\delta}} = P \\ \sigma^{22} \Big|_{r=R_{3,\delta}} = P_3 \end{cases}, \quad (5.16)$$

де  $P$ ,  $P_3$  – внутрішній і зовнішній тиск відповідно.

Аналогічно для тороподібних відводів трубопроводу вводиться система координат за наступними співвідношеннями

$$\begin{cases} x = (R_\delta + r \cos \varphi) \cos \theta \\ y = (R_\delta + r \cos \varphi) \sin \theta, \\ z = r \sin \varphi \end{cases} \quad (5.17)$$

де  $R_\delta$  – радіус вигину відводу;



$\theta$  – кут навкруги осі  $z$  тора.

Формули Кристофеля II роду визначаються таким чином

$$\begin{cases} \Gamma_{33}^1 = \cos \theta (R_g - r \cos \theta); \Gamma_{22}^1 = -r; \Gamma_{12}^2 = \Gamma_{21}^2 = \frac{1}{r} \\ \Gamma_{33}^2 = -\frac{\sin \theta (R_g - r \cos \theta)}{r}; \Gamma_{13}^3 = -\frac{\cos \theta}{R_g - r \cos \theta} \\ \Gamma_{23}^3 = \frac{r \sin \theta}{R_g - r \cos \theta} \end{cases} \quad (5.18)$$

Ненульові компоненти тензора деформацій  $\epsilon$

$$\begin{cases} \epsilon_{11} = \frac{\partial u}{\partial r}; \epsilon_{22} = \frac{\partial v}{\partial \theta} + ur \\ \epsilon_{33} = -u \cos \theta (R_g - r \cos \theta) + v \frac{\sin \theta (R_g - r \cos \theta)}{r} \\ \epsilon_{12} = \frac{1}{2} \frac{\partial v}{\partial r} + \frac{1}{2} \frac{\partial u}{\partial \theta} - \frac{v}{r} \end{cases} \quad (5.19)$$

у допущенні

$$\begin{cases} u = u(r, \theta) \\ v = v(r, \theta) \\ \omega = 0 \end{cases} \quad (5.20)$$

У такому випадку система рівнянь рівноваги відносно компонент  $u(r, \theta); v(r, \theta)$  записується наступним чином

$$\left\{ \begin{aligned}
& (\lambda + 2\mu) \left[ \frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{\partial u}{\partial r} \frac{1}{r} - \frac{u}{r^2} \right] + \frac{\partial^2 u}{\partial \theta^2} \mu \frac{1}{r^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial r \partial \theta} \left( \lambda \frac{1}{r^2} + \mu \frac{1}{r^2} \right) + (\lambda + 2\mu) \frac{\partial u}{\partial r} \frac{\cos \theta}{(R_g - r \cos \theta)} + \\
& + \mu \frac{\partial u}{\partial \theta} \frac{\sin \theta}{r(R_g - r \cos \theta)} + \frac{\partial v}{\partial r} (\lambda + 2\mu) \frac{\sin \theta}{r(R_g - r \cos \theta)} - 2 \frac{\partial v}{\partial \theta} (\lambda + 2\mu) \cdot \frac{1}{r^3} + \\
& + u \left( -\frac{1}{r^2} (\lambda + 2\mu) - (\lambda + 2\mu) \frac{\cos^2 \theta}{(R_g - r \cos \theta)^2} \right) + v \left[ (\lambda + 2\mu) \frac{\sin \theta \cos \theta}{r(R_g - r \cos \theta)^2} - \frac{\sin \theta (\lambda + 2\mu)}{r^2 (R_g + r \cos \theta)} \right] = 0 \quad (5.21) \\
& \frac{\partial^2 u}{\partial r \partial \theta} (\lambda + \mu) \frac{1}{r^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial r^2} \mu \frac{1}{r^2} + (\lambda + 2\mu) \frac{\partial^2 v}{\partial \theta^2} \frac{1}{r^4} + \frac{\partial u}{\partial \theta} \left( 3\mu \frac{1}{r^3} + \lambda \frac{1}{r^3} - \frac{(\lambda + \mu) \cos \theta}{r^2 (R_g + r \cos \theta)} \right) + \\
& + \frac{\partial v}{\partial r} \left( -\mu \frac{1}{r^3} - \mu \frac{1}{r^2} \frac{\cos \theta}{R_g - r \cos \theta} \right) + (\lambda + 2\mu) \frac{\partial v}{\partial \theta} \frac{\sin \theta}{r^3 (R_g - r \cos \theta)} + u \left( (\lambda + \mu) \frac{1}{r^2} \frac{R_g \sin \theta}{(R_g - r \cos \theta)^2} \right) + \\
& + \frac{v (\lambda + 2\mu)}{r^3} \frac{R_g \cos \theta - r}{(R_g - r \cos \theta)^2} = 0
\end{aligned} \right.$$

із граничними умовами аналогічними (5.16). Чисельний розв'язок систем (5.15) і (5.21) вимагає значних обчислювальних зусиль, проте для практичного їх розв'язання можна прийняти допущення, що для тороподібних відводів при  $R_g \rightarrow \infty$

$v \ll u; \frac{\partial v}{\partial \theta}; \frac{\partial^2 v}{\partial \theta^2}; \frac{\partial u}{\partial \theta}; \frac{\partial^2 u}{\partial \theta^2}; \frac{\partial^2 u}{\partial \theta \partial r}; \frac{\partial^2 v}{\partial \theta \partial r} \ll u; \frac{\partial u}{\partial r}; \frac{\partial^2 u}{\partial r^2}$ . Це дає змогу зробити висновок

про те, що система (5.21) вироджується в одне рівняння (перший додаток системи (5.21), перше рівняння)

$$\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{\partial u}{\partial r} \frac{1}{r} - \frac{u}{r^2} = 0, \quad (5.22)$$

яке є основним рівнянням задачі Ламе [313].

Приймаючи до уваги наведену вище гіпотезу, що при зменшенні товщини стінки трубопроводу в результаті ерозійного чи корозійного зношування поперечний переріз мало відрізняється від кільцевого, розрахунок номінальних кільцевих напружень, які виникають у стінці відводу від дії внутрішнього тиску, можна виконати за формулою

$$\sigma_{\kappa\zeta}^n = \frac{P R_{B.g}(\theta)}{\delta(\theta)}, \quad (5.23)$$

де  $\delta(\theta)$  – залежна від кута  $\theta$  товщина стінки відводу трубопроводу (рисунок 5.19)

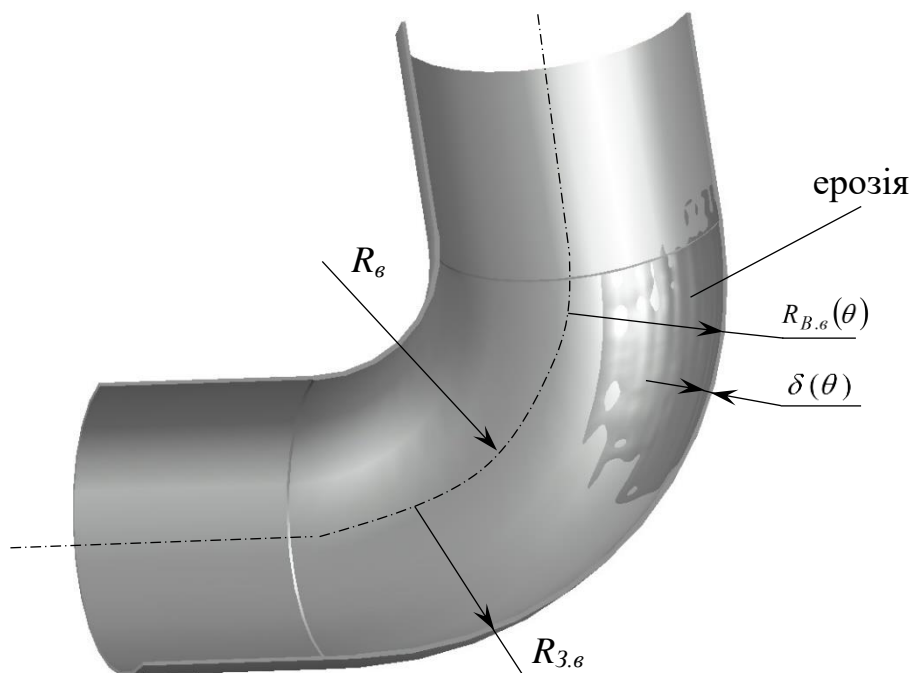
$$\delta(\theta) = R_{3.6} - R_{B.6}(\theta), \quad (5.24)$$

де  $R_{B.6}(\theta)$  – внутрішній радіус відводу трубопроводу, який зазнає змін у результаті ерозійного чи корозійного зношування стінки (рисунок 5.19). Якщо відбувається корозія зовнішньої стінки відводу, тоді

$$\delta(\theta) = R_{3.6}(\theta) - R_{B.6}, \quad (5.25)$$

де  $R_{3.6}(\theta)$  – зовнішній радіус відводу трубопроводу, який зазнає змін у результаті корозійного зношування;

$R_{B.6}$  – внутрішній радіус відводу трубопроводу. [77]



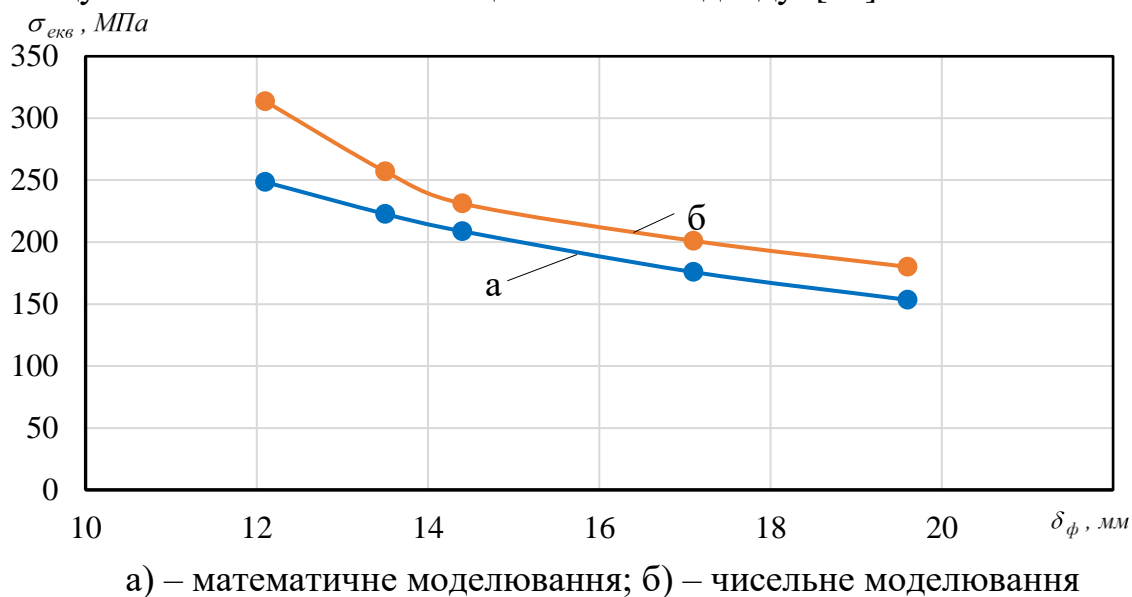
**Рисунок 5.19** – Розрахункова схема ерозійно зношеного відводу

Формула (5.23) є інтегральним осередненням більш загальної формули [313]

$$\sigma_{\kappa\zeta}^H = \frac{R_{B.6}^2(\theta)P}{R_{3.6}^2 - R_{B.6}^2(\theta)} \left( 1 + \frac{R_{3.6}^2}{r^2} \right) - \frac{R_{3.6}^2 P_3}{R_{3.6}^2 - R_{B.6}^2(\theta)} \left( 1 + \frac{R_{B.6}^2(\theta)}{r^2} \right). \quad (5.26)$$

Оскільки  $P \gg P_3$ , то можна прийняти, що  $P_3 = 0$ .

За результатами математичного та чисельного (таблиця 5.1) моделювання визначено максимальні еквівалентні напруження в стінці ерозійно зношених відводів трубопровідних систем під дією внутрішнього тиску для різних глибин ерозійного дефекту. Побудовано графічні залежності цих напружень від фактичної товщини стінки відводу в місці максимального ерозійного зношування (рисунок 5.20). Як бачимо, більше, ніж 90 %-ва збіжність одержаних за допомогою математичного та чисельного моделювання результатів спостерігається тоді, коли фактична товщина стінки відводу в місці максимального ерозійного зношування перевищує 14 мм. Оскільки при виведенні (5.23) прийнято допущення, що поперечний переріз відводу в місці ерозійного зношування мало відрізняється від кільцевого, то математичне моделювання можна застосовувати у випадку, якщо фактична товщина стінки відводу в місці максимального ерозійного зношування перевищує 70 % номінальної товщини стінки відводу. [82]



**Рисунок 5.20** – Залежність максимальних еквівалентних напружень від фактичної товщини стінки відводу в місці максимального ерозійного зношування

### 5.5 Розроблення алгоритму оцінювання міцності фасонних елементів трубопровідних систем

Основним критерієм працездатності фасонних елементів трубопровідних

систем є міцність. Оцінювання міцності фасонних елементів трубопровідних систем слід виконувати, якщо:

- виявлено невідповідність технічного стану фасонного елемента вимогам НД;

- мінімальна товщина стінки фасонного елемента менша розрахункової товщини стінки, визначеної згідно з вимог СНиП 2.05.06 [246], але більша за допустиму товщину, визначену за методикою наведеною в підрозділі 5.3, а виміряні значення механічних властивостей металу не відповідають допустимим значенням цих параметрів для марок сталей елементів;

- мінімальна товщина стінки фасонного елемента менша за допустиму товщину стінку, і немає можливості виконати негайний ремонт, заміну дефектного елемента (виконується для прийняття тимчасового рішення про продовження строку експлуатації елемента).

Оцінювання міцності фасонних елементів трубопроводів доцільно виконувати з урахуванням усіх основних чинників, які визначають їх надійність (конструкційних, технологічних, експлуатаційних), за такою послідовністю:

- збір і аналіз загальних вихідних даних, визначення геометричних параметрів елементів (у тому числі, товщини стінки), їх конструкційних особливостей (паспортні дані, сертифікати якості, візуально-інструментальний контроль), конструктивної схеми ділянки трубопроводу з елементом (план, профіль);

- визначення механічних властивостей металу фасонних елементів, зварних з'єднань, їх втомних властивостей (рекомендовано);

- поелементне вимірювання напружень засобами неруйнівного контролю;

- вибір розрахункової схеми відповідно до заданих конструктивних елементів;

- визначення статичних навантажень і впливів;

- аналіз визначених неруйнівним контролем дефектів стінки фасонних елементів, їх геометричної форми;

- розрахунок нормативних напружень у фасонних елементах із урахуванням

експлуатаційних навантажень і впливів, наявних у стінці фасонних елементів дефектів, геометричної форми дефектів, механічних властивостей металу, їх деградування з часом;

– спільний перехресний аналіз результатів вимірювань і розрахунків напружень у фасонних елементах;

– перевіряння статичної міцності фасонних елементів трубопроводів;

– остаточні висновки щодо об'єктивності оцінювання міцності фасонних елементів;

– аналіз і визначення причин підвищеного рівня напружень, визначення можливості подальшого експлуатування фасонного елемента;

– визначення способів зниження напружень у фасонних елементах чисельним моделювання. [84–86]

Якщо фактична товщина стінки відводу трубопроводу в місці максимального ерозійного чи корозійного зношування перевищує 70 % номінальної товщини стінки відводу, то номінальні кільцеві напруження, які виникають у стінці відводу від дії внутрішнього тиску, рекомендовано визначити за (5.23). Тоді еквівалентні напруження можна визначити за енергетичною теорією міцності [87].

Якщо фактична товщина стінки відводу трубопроводу в місці максимального ерозійного чи корозійного зношування є меншою від 70 % номінальної товщини стінки, то еквівалентні напруження в стінці такого відводу рекомендовано розраховувати чисельним методом. Також чисельним методом рекомендовано розраховувати еквівалентні напруження в стінці трійників з ерозійними чи корозійними дефектами. При цьому геометрична форма та місцезнаходження ерозійних чи корозійних дефектів повинні максимально відповідати фактичним даним.

Умова забезпечення статичної міцності фасонних елементів трубопроводів згідно з ВСН 185 [38] така:

$$\sigma_{екв} \leq \frac{1,155}{k_1 k_n} R_1^H, \quad (5.27)$$

де  $k_1$  – коефіцієнт надійності за матеріалом;

$k_n$  – коефіцієнт надійності за призначенням трубопроводу;

$R_1^H$  – нормативний опір розтягу (стиску) металу фасонного елемента, рівний тимчасовому опору розриву  $\sigma_{тим}$ , який приймається за державними стандартами або технічними умовами.

Якщо для фасонного елемента з дефектом стінки (ерозійне або корозійне зношування) умова забезпечення статичної міцності (5.27) не виконується, то фасонний елемент треба визначити як недопустимий для подальшої експлуатації та прийняти рішення щодо його ремонту або заміни. Якщо ж умова (5.27) виконується, то необхідно визначити залишковий ресурс фасонного елемента з дефектом. При цьому треба враховувати механізм накопичення та розвитку дефектів.

Залишковий (технологічний) ресурс є одним із критеріїв, кількісним показником надійності, який виражає одну з властивостей надійності, а саме: довговічність [187]. Для оцінювання залишкового ресурсу ерозійно зношених фасонних елементів треба за результатами обстеження визначити фактичну максимальну глибину ерозійного дефекту стінки фасонного елемента. Тоді за наведеною у підрозділі 5.3 методикою, визначити величину допустимої максимальної глибини ерозійного дефекту стінки фасонного елемента.

Залишковий ресурс фасонного елемента з ерозійним зношенням стінки можна визначити за формулою

$$\tau_{зал} = \frac{[h] - h_{\phi}}{v_e}, \quad (5.28)$$

де  $[h]$  – допустима максимальна глибина ерозійного дефекту стінки фасонного елемента, яка визначається за графічними залежностями, наведеними на рисунку

5.9, рисунку 5.13, рисунку 5.17;

$h_\phi$  – фактична максимальна глибина ерозійного дефекту стінки фасонного елемента, яка визначається під час обстеження фасонного елемента;

$v_e$  – максимальна швидкість стоншування стінки фасонного елемента. [66, 75]

Максимальна швидкість стоншування стінки фасонного елемента  $v_e$ , рівна відношенню максимальної швидкості ерозійного зношування стінки, яка визначається з полів швидкості ерозійного зношування на контурах фасонного елемента (підрозділ 4.1), до густини металу труби.

### **Висновки до розділу 5**

1. Нерівномірне ерозійне зношення фасонних елементів трубопроводів призводить до нерівномірно складного перерозподілу напружень у місці ерозійного дефекту. Визначено закономірності впливу величини ерозійних дефектів на напружено-деформований стан фасонних елементів трубопроводів. Встановлено, що існує певний запас по товщині стінки з опуклого боку відводів у місці ерозійного зношування його стінки, що зумовлено його геометричною формою. Також такий запас є в трійників, що зумовлено більшою їх товщиною стінки ніж прилеглих ділянок трубопроводу, та наявністю накладок у місцях максимального ерозійного зношування.

2. У відводах трубопровідних систем при незначній глибині ерозійних дефектів стінки максимальні еквівалентні напруження зосереджені з ввігнутого боку відводу. Якщо ж глибина ерозійних дефектів є значною, то максимальні еквівалентні напруження зосереджені у найглибших місцях ерозійних дефектів. У трійниках, у яких увесь потік із магістралі перетікає у відгалуження, максимальні еквівалентні напруження, зумовлені ерозійним зношуванням, виникають у найглибших місцях ерозійних дефектів привареної до відгалуження трійника труби. У трійниках, в яких потік із відгалуження перетікає в одну зі сторін магістралі, максимальні еквівалентні напруження, зумовлені ерозійним зношенням, зосереджені з зовнішньої сторони магістралі трійника біля



підсилюючої накладки, розміщеної на магістралі трійника. Зона максимальних еквівалентних напружень має дугоподібну форму й огинає нижню частину розміщеної на магістралі трійника підсилюючої накладки з двох боків магістралі трійника.

3. Розроблено методику комплексного тривимірного чисельного моделювання напружено-деформованого стану елементів трубопровідних систем складної геометричної форми з урахуванням газодинамічних процесів, які відбуваються в їх внутрішній порожнині, складної тривимірної геометричної форми ерозійних дефектів стінки та температурного перепаду. Визначено зони потенційного ризику втрати міцності фасонних елементів трубопроводів. Так, у відводах трубопроводів такою зоною є ввігнутий бік, а у трійниках – місце різкої зміни геометрії в місці приєднання відгалуження до магістралі трійника, де немає підсилюючої накладки на відгалуженні. Рівень напружень у цих зонах на 35 % – 45 % (для відводів), 65 % – 75 % (для трійників) порівняно з прилеглими зонами.

4. Розроблено методику побудови геометричних моделей фасонних елементів трубопроводів зі складною тривимірною геометричною формою ерозійних дефектів стінки. Методика дозволяє переміщувати стінку фасонних елементів відповідно до швидкості їх ерозійного зношування. Розроблено науково-методичні підходи, покроковий алгоритм оцінювання міцності ерозійно зношених фасонних елементів трубопроводів.

5. Математичним моделюванням напружено-деформованого стану ерозійно чи корозійно зношених відводів трубопроводів одержано формулу для розрахунку номінальних кільцевих напружень, які виникають у їх стінці від дії внутрішнього тиску. Перевагою одержаної формули є її простота порівняно з методикою чисельного моделювання напруженого стану ерозійно зношених відводів трубопровідних систем. Обмежує застосування одержаної формули допущення, що в місці ерозійного зношування відводів їх поперечний переріз мало відрізняється від кільцевого, а тому було встановлено, що її можна застосовувати тоді, коли фактична товщина стінки тороподібного відводу трубопроводу в місці максимального ерозійного зношування перевищує 70 % номінальної товщини

стілки відводу. При більших величинах ерозійних дефектів для оцінювання напруженого стану ерозійно зношених відводів трубопровідних систем треба застосовувати чисельне моделювання.

Основні наукові результати розділу опубліковані в працях [75–87].

## РОЗДІЛ 6

### РОЗРОБЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ БЕЗТРАНШЕЙНОГО РЕМОНТУ ВІДВОДІВ ТРУБОПРОВОДІВ

Запропоновано ремонт ерозійно чи корозійно зношених відводів трубопроводів у важкодоступних місцях виконувати безтраншейним способом протягуванням поршнем рукава чи гнучкої композитної труби. Можливість виконання таких робіт підтверджена теоретично й експериментально. Виведено формули для визначення усіх сил опору, які діють на рухому систему, визначено закономірності зміни тиску на виході компресора. Визначено закономірності зміни тиску необхідного для подолання сили тертя (зумовленої притисканням рукава через зміну напрямку протягування) між рукавом і внутрішньою стінкою трубопроводу в місці дефектного відводу.

Експериментально визначено сили опору, які діють на рухому систему, закономірності зміни тиску на початку трубопроводу в часі під час протягування поршнем рукава трубопроводом, який містить відвід. Експериментальні результати порівняно з результатами теоретичних досліджень.

Розроблено техніку та технології ремонту відводів трубопроводів у важкодоступних місцях протягуванням поршнем рукава чи гнучких композитних труб. Приведено результати промислової апробації та впровадження розроблених технологій у виробництво.

#### **6.1 Теоретичні дослідження процесу протягуванням поршнем рукава трубопроводом, який містить відвід**

Виконати ремонт ерозійно чи корозійно зношених фасонних елементів трубопроводу надзвичайно складно через складну їх геометричну форму.

Для ремонту ерозійно чи корозійно зношених відвід трубопроводів запропоновано ідею виконувати роботи безтраншейним способом [93–96, 102] шляхом протягування поршнем рукава в сталевий трубопровід із дефектними

відводами. Щоб визначити, чи можливо реалізувати таку ідею, підібрати обладнання для виконання робіт, потрібно визначити усі сили, які діють на рухому систему під час протягування поршнем рукава трубопроводами, що містять відводи, та величину втрат тиску в сталевому трубопроводі. Очевидно, що сила тяги залежить від кута вигину відводу, в який протягується рукав, оскільки відбувається зміна напрямку дії сили, в результаті чого рукав притискається до внутрішньої стінки трубопроводу в місці відводу. Тому ці геометричні параметри треба враховувати в балансі сил. Щоб підібрати обладнання для виконання робіт, а саме: компресор – потрібно знати величину максимальної необхідної сили для протягування рукава в трубопровід із ерозійно зношеним відводом. Тому будемо розглядати випадок, коли рукав повністю протягнутий.

Процес руху очисних і діагностичних поршнів трубопроводами різноманітного призначення досліджували Грудз В. Я. [314–317], Грудз Я. В. [314, 315, 318], Minami K. [319], Saeidbakhsh M. [320], Short G. [321], Tolmasquim S. [322].

Дорошенко Я.В., Поляруш К. А. досліджували динаміку протягування поршнем трубопроводу рукава прямолінійними ділянками трубопроводу [88, 91, 92, 97–101]. Досліджень процесів протягування рукава трубопроводами, які містять відводи, не виконувалось.

Розрахункова схема протягування поршнем рукава трубопроводом, який містить дефектний відвід, наведена на рисунку 6.1. Сила опору, яка діє на рухому систему під час протягування рукава трубопроводом з дефектним відводом, залежить від кількох сил опору

$$F_{оп} = f(F_{Т.м.н}, F_{Тр}, F_{То.б}, F_{В.В}), \quad (6.1)$$

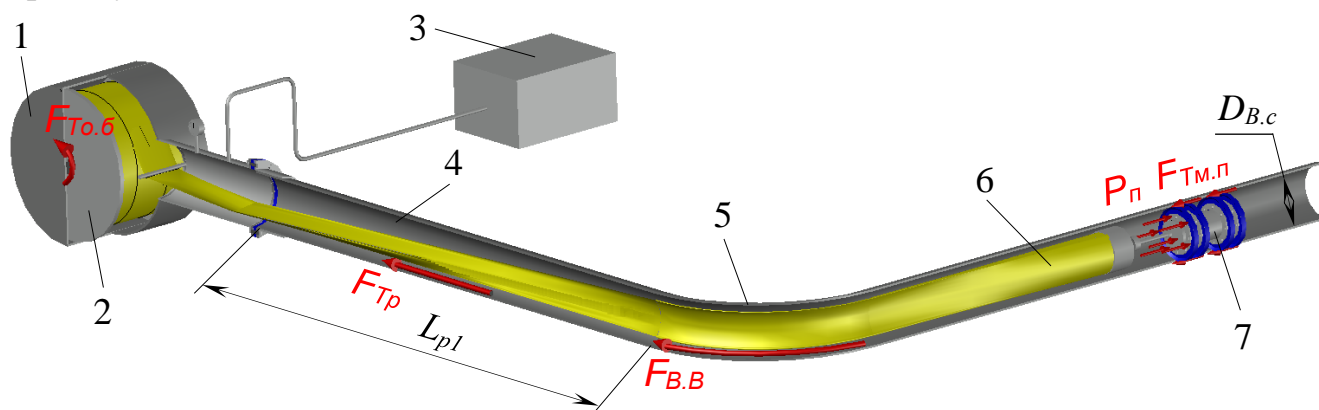
де  $F_{Т.м.н}$  – сила тертя між манжетами поршня та стінкою трубопроводу, в який протягується рукав;

$F_{Тр}$  – сила тертя між протягваним поршнем рукавом і сталевією трубою;

$F_{То.б}$  – сила тертя між осердям барабана, на який намотано рукав, і

циліндричними виступами в бокових поверхнях герметичної циліндричної камери, на яких обертається барабан;

$F_{B.B}$  – сила тертя, зумовлена притисканням натягнутого рукава до внутрішньої стінки трубопроводу в місці відводу, яке спричинено зміною напрямку протягування.



- 1 – герметична циліндрична камера; 2 – барабан; 3 – компресор; 4 – зношений сталевий трубопровід; 5 – дефектний відвід; 6 – протягуваний рукав; 7 – поршень

**Рисунок 6.1** – Розрахункова схема протягування поршнем рукава трубопроводом, який містить дефектний відвід

Згідно з [88] сила тертя між манжетами поршня та стінкою трубопроводу

$$F_{T_{M.n}} = n_{M.n} f_{M.n} E h_m D_{B.c} \frac{D_{M.n} - D_{B.c}}{D_{M.n}}, \quad (6.2)$$

де  $n_{M.n}$  – кількість манжет поршня;

$f_{M.n}$  – коефіцієнт тертя між гумовими манжетами поршня та стінкою сталевого трубопроводу.  $f_{M.n}$  залежить від швидкості руху поршня, типу каучуку, чистоти поверхні та її площі, сили притискання манжет до стінок трубопроводу і знаходиться в діапазоні 0,5...0,7;

$E$  – модуль пружності гуми, з якої виготовлені манжети поршня ( $E = 2 \text{ МПа}$ );

$h_m$  – товщина гумової манжети поршня;

$D_{B.c}$  – внутрішній діаметр сталевго трубопроводу, в який поршнем протягується рукав;

$D_{M.n}$  – діаметр манжет не запасованого в реконструйований трубопровід поршня.

Сила тертя між протягуваним поршнем рукавом і сталевю трубою

$$F_{Tp} = f_p q_p L_p, \quad (6.3)$$

де  $f_p$  – коефіцієнт тертя між протягуваним поршнем рукавом та сталевим трубопроводом;

$q_p$  – вага погонного метра протягуваного поршнем рукава;

$L_p$  – довжина рукава.

Сила тертя між осердям барабана, на який намотано рукав, та циліндричними виступами в бокових поверхнях герметичної циліндричної камери, на яких обертається барабан

$$F_{To.б} = \frac{q_б f_{ков} r_{в.б}}{R_б}, \quad (6.4)$$

де  $q_б$  – вага барабана, на який намотано протягуваний рукав;

$f_{ков}$  – коефіцієнт тертя ковзання між осердям барабана, на який намотано рукав, та циліндричними виступами в бокових поверхнях герметичної циліндричної камери, на яких обертається барабан;

$r_{в.б}$  – радіус циліндричних виступів у бокових поверхнях герметичної циліндричної камери;

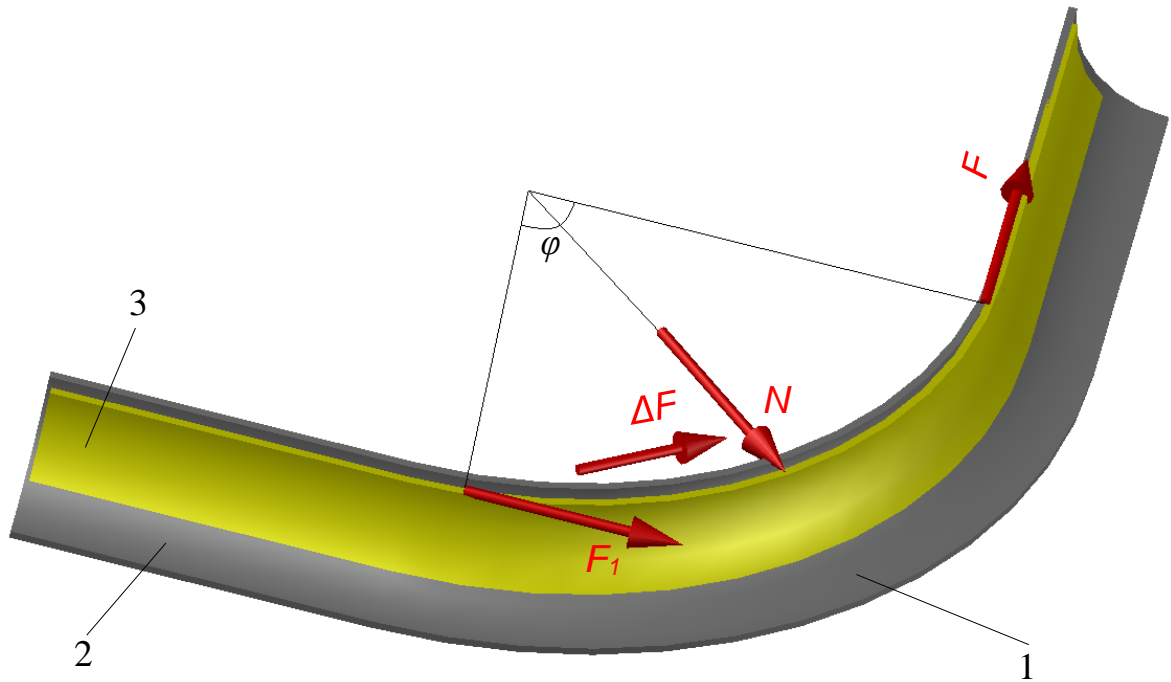
$R_б$  – радіус осердя барабана, на який намотано рукав.

Сила тертя зумовлена притисканням натягнутого рукава до внутрішньої стінки трубопроводу в місці відводу

$$F_{B.B} = f_p N, \quad (6.5)$$

де  $N$  – сила реакції.

На рисунку 6.2 наведено розрахункову схему протягування рукава ерозійно зношеним відводом. Перед входом рукава в відвід у рукаві діє сила натягу  $F_1$ , а після виходу з відводу –  $F$ . У середній частині відводу діє сила реакції  $N$ .



1 – відвід; 2 – сталевая труба; 3 – рукав

**Рисунок 6.2** – Розрахункова схема протягування рукава відводом

При рівновазі частини рукава у відводі обмеженого кутом вигину відводу  $\varphi$  можна отримати нормальну силу притискання рукава до стінки відводу записавши рівняння рівноваги сил уздовж бісектриси кута вигину відводу

$$N = 2F \sin \frac{\varphi}{2} + \Delta F \sin \frac{\varphi}{2}, \quad (6.6)$$

де  $F$  – сила натягу рукава в місці його виходу з відводу;

$\Delta F$  – збільшення сили натягу рукава, спричинене його притисканням до внутрішньої стінки відводу в результаті зміни напрямку протягування (рисунок 6.2).

Збільшення сили натягу рукава спричинене його притисканням до внутрішньої стінки відводу в результаті зміни напрямку протягування

$$\Delta F = 2f_p F \sin \frac{\varphi}{2}. \quad (6.7)$$

Сила натягу рукав перед його входом у відвід рівна

$$F_1 = F - \Delta F. \quad (6.8)$$

Також ця сила дорівнює

$$F_1 = F_{Tp1} + F_{To.6}, \quad (6.9)$$

де  $F_{Tp1}$  – сила тертя між протягваним поршнем рукавом і сталевією трубою до входу рукава у відвід

$$F_{Tp1} = f_p q_p L_{p1}, \quad (6.10)$$

де  $L_{p1}$  – довжина протягнутого поршнем рукава до входу рукава у відвід (рисунок 6.1).

Тоді, підставивши (6.7), (6.9) у (6.8), отримаємо

$$F = \frac{F_{Tp1} + F_{To.6}}{1 - 2f_p \sin \frac{\varphi}{2}}. \quad (6.10)$$

Коли всі значення компонентів визначені, сила тертя, зумовлена притисканням натягнутого рукава до внутрішньої стінки трубопроводу в місці відводу, рівна



$$F_{B.B} = 2f_p \frac{f_p q_p L_{p1} + \frac{q_{\bar{o}} f_{\text{коб}} r_{\bar{v}, \bar{o}}}{R_{\bar{o}}}}{1 - 2f_p \sin \frac{\varphi}{2}} \sin \frac{\varphi}{2} \left( 1 + f_p \sin \frac{\varphi}{2} \right). \quad (6.11)$$

Технологічний процес протягування поршнем рукава описується другим законом Ньютона:

$$m_n \frac{dV_n}{dt} = \sum_{i=1}^n F_n, \quad (6.12)$$

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 під час протягування поршнем

рукава у сталевий трубопровід із ерозійно зношеним відводом (рисунк 6.1).

При рівномірному протягуванні поршнем рукава дефектним відводом трубопроводу

$$\sum_{i=1}^n F_n = P_{II} \frac{\pi D_{B.c}^2}{4} - F_{T_{M.n}} - F_{T_p} - F_{T_{o,\bar{o}}} - F_{B.B} = 0, \quad (6.13)$$

де  $P_{II}$  – тиск повітря в запоршневому просторі, який визначається силами опору, що діють на рухому систему.

Підставивши (6.2), (6.3), (6.4), (6.11) у (6.13), отримаємо:

$$P_{II} \frac{\pi D_{B.c}^2}{4} - n_{M.n} f_{M.n} E h_M D_{B.c} \frac{D_{M.n} - D_{B.c}}{D_{M.n}} - f_p q_p L_p - \frac{q_{\bar{o}} f_{\text{коб}} r_{\bar{v}, \bar{o}}}{R_{\bar{o}}}$$

$$-2f_p \frac{f_p q_p L_{p1} + \frac{q_{\delta} f_{\text{ков}} r_{\delta \delta}}{R_{\delta}}}{1 - 2f_p \sin \frac{\varphi}{2}} \sin \frac{\varphi}{2} \left( 1 + f_p \sin \frac{\varphi}{2} \right) = 0. \quad (6.14)$$

Тоді потрібен тиск повітря в запоршневому просторі, щоб поршень протягував рукав трубопроводом, який містить дефектний відвід

$$P_{II} = \frac{4 \left( n_{M.n} f_{M.n} E h_M D_{B.c} \frac{D_{M.n} - D_{B.c}}{D_{M.n}} + f_p q_p L_p + \frac{q_{\delta} f_{\text{ков}} r_{\delta \delta}}{R_{\delta}} \right)}{\pi D_{B.c}^2} + \frac{2f_p \frac{f_p q_p L_{p1} + \frac{q_{\delta} f_{\text{ков}} r_{\delta \delta}}{R_{\delta}}}{1 - 2f_p \sin \frac{\varphi}{2}} \sin \frac{\varphi}{2} \left( 1 + f_p \sin \frac{\varphi}{2} \right)}{\pi D_{B.c}^2}. \quad (6.15)$$

Для реалізації ідеї ремонту ерозійно зношених відводів протягуванням поршнем рукава треба підібрати компресор для виконання робіт. Для того, щоб підібрати компресор для протягування рукава всією довжиною трубопроводу, який містить дефектний відвід, необхідно визначити, яким має бути тиск на виході компресора. Такий тиск рівний

$$P_{\text{комп}} = P_{II} + \Delta P_L, \quad (6.16)$$

де  $\Delta P_L$  – втрат тиску вздовж сталевго трубопроводу від компресора до рухомого поршня, яким протягується рукав.

Втрати тиску вздовж прямолінійного сталевго трубопроводу від компресора до рухомого поршня, яким протягується рукав, були визначені в [100] CFD моделюванням, і вони дорівнюють

$$\Delta P_{L.p} = 1,203 L_p^2 + 56,527 L_p + 342,31. \quad (6.17)$$

Тоді, підставивши (6.17) і (6.15) у (6.16), отримуємо рівняння для розрахунку необхідного тиску на виході компресора, щоб поршень протягнув рукав усією довжиною трубопроводу, який містить дефектний відвід:

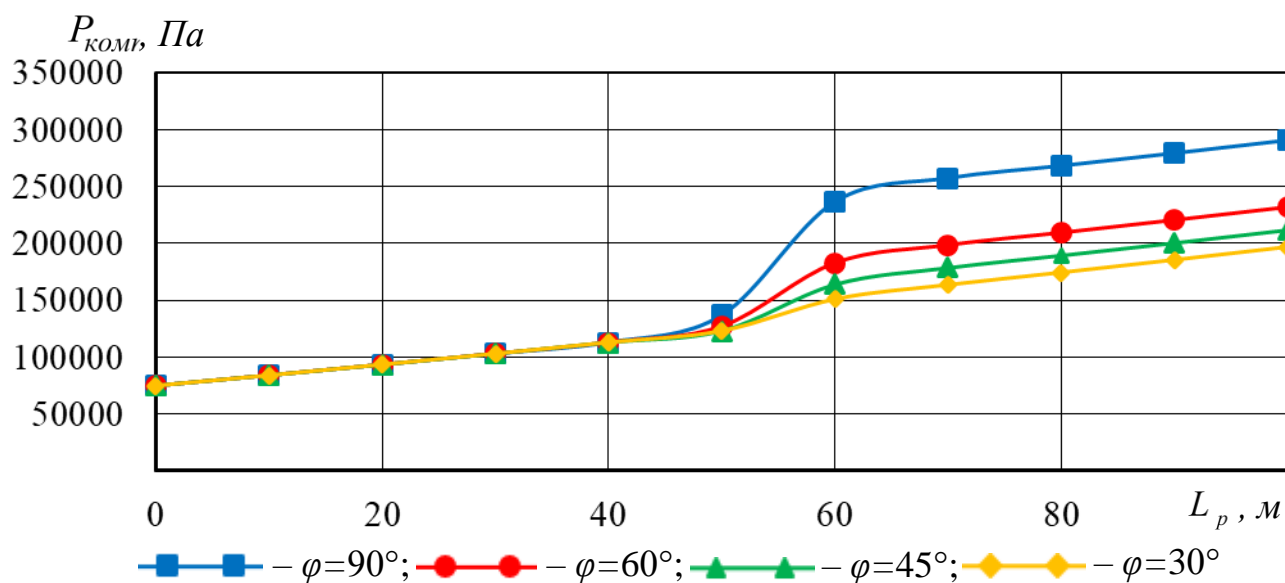
$$P_{\text{комп}} = \frac{4 \left( n_{M,n} f_{M,n} E h_M D_{e.c} \frac{D_{M,n} - D_{B.c}}{D_{M,n}} + f_p q_p L_p + \frac{q_{\bar{o}} f_{\text{ков}} r_{e.\bar{o}}}{R_{\bar{o}}} \right)}{\pi D_{B.c}^2} + \frac{2 f_p \frac{f_p q_p L_{p1} + \frac{q_{\bar{o}} f_{\text{ков}} r_{e.\bar{o}}}{R_{\bar{o}}}}{1 - 2 f_p \sin \frac{\varphi}{2}} \sin \frac{\varphi}{2} \left( 1 + f_p \sin \frac{\varphi}{2} \right)}{\pi D_{B.c}^2} + 1,203 L_p^2 + 56,527 L_p + 342,31. \quad (6.18)$$

За (6.18) розраховано потрібний тиск на виході компресора для протягування рукава всією довжиною трубопроводу, який містить дефектний відвід. При цьому змінювалась довжина трубопроводу, яким здійснюється протягування рукава  $L_p$  від 0 до 100 м, кут вигину відводу  $\varphi$  від  $30^\circ$  до  $90^\circ$ . Місце розміщення ерозійно зношеного відводу приймалось по середині трубопроводу, в який протягується рукав ( $L_{p1}$  приймався рівним 50 м).

Вихідні дані до розрахунку наступні: внутрішній діаметр сталевго трубопроводу  $D_{B.c} = 0,049$  м; кількість манжет поршня  $n_{M,n} = 4$ ; коефіцієнт тертя ковзання гумових манжет поршня до стінок сталевго трубопроводу  $f_{M,n} = 0,6$ ; модуль пружності гуми  $E = 2$  МПа; товщина манжети поршня  $h_M = 0,01$  м; діаметр манжет поршня до його запасування в трубопровід  $D_{M,n} = 0,051$  м; коефіцієнт тертя ковзання рукава до сталі  $f_p = 0,4$ ; вага погонного метра рукава  $q_p = 4,1 \frac{H}{M}$ ; вага барабана  $q_{\bar{o}} = 600$  Н; коефіцієнт тертя виступів барабана в пазах  $f_{\text{ков}} = 0,2$ ; радіус циліндричних виступів у бокових поверхнях герметичної циліндричної камери  $r_{e.\bar{o}} = 0,04$  м; радіус осердя барабана  $R_{\bar{o}} = 0,1$  м. Результати розрахунків подані в таблиці 6.1 та наведені на рисунку 6.3.

**Таблиця 6.1** – Результати розрахунків необхідного тиску на виході компресора для протягування поршнем рукава трубопроводом, який містить дефектний відвід

$L_p, м$	$\varphi, ^\circ$			
	30	45	60	90
$P_{комп}, Па$				
0	74746	74746	74746	74746
10	83921	83921	83921	83921
20	93336	93336	93336	93336
30	102992	102992	102992	102992
40	112888	112888	112888	112888
50	123025	123025	127025	137025
60	150972	163954	182733	236876
70	163590	178573	198351	257494
80	174449	189431	209210	268353
90	185548	200531	220309	279452
100	196888	211871	231649	290792

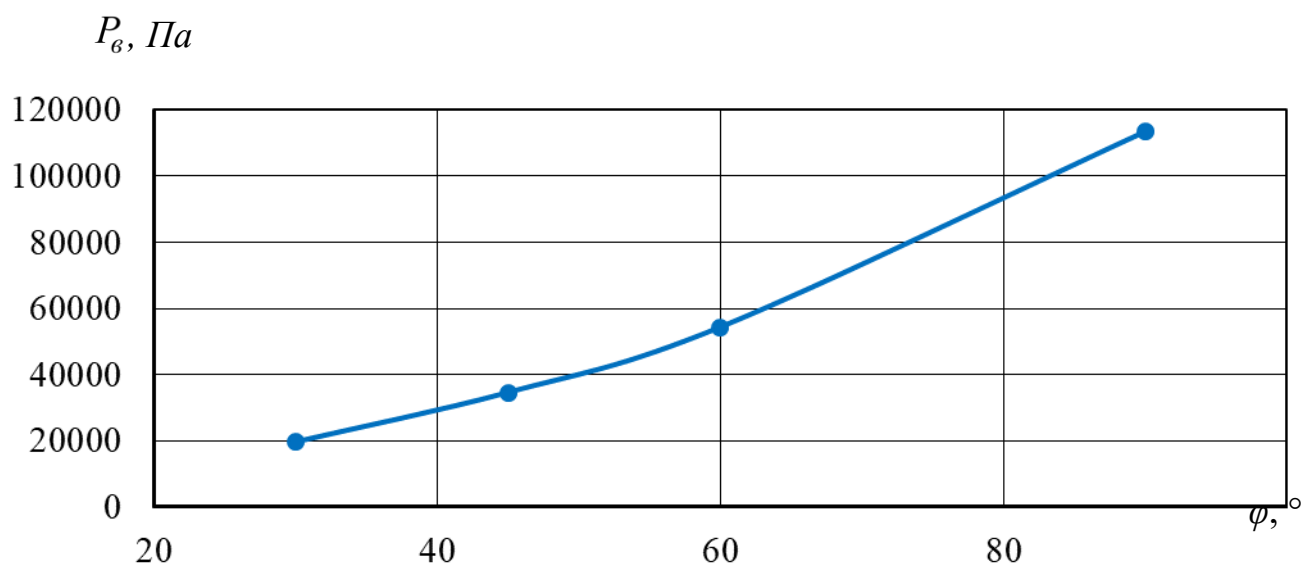


**Рисунок 6.3** – Залежність тиску на виході компресора від довжини протягнутого поршнем рукава трубопроводом, який містить дефектний відвід

Як бачимо, для протягування поршнем рукава трубопроводом довжиною 100 м, який по середині містить дефектний відвід, потрібен незначний тиск – до 0,3 МПа (якщо кут вигину відводу максимально можливий – 90°), а отже, ідею

ремонт ерозійно чи корозійно зношених відводів протягуванням поршнем рукава можливо реалізувати. Зі зменшенням кута вигину відводу необхідний тиск на виході компресора для протягування рукава зменшується і для кута вигину  $30^\circ$  складає  $0,2$  МПа.

Також було розраховано необхідний тиск для подолання сили тертя рукава до внутрішньої стінки трубопроводу в місці зміни напрямку його протягування поршнем. Кут вигину відводу змінювався від  $30^\circ$  до  $90^\circ$ . Результати розрахунку наведені на рисунку 6.4 і в таблиці 6.2. Для відводу внутрішнім діаметром  $49$  мм із кутом вигину  $90^\circ$  найбільший тиск потрібний для подолання досліджуваної сили тертя склав  $0,11$  МПа (що не є високим тиском). Необхідний тиск для протягування поршнем рукава дефектним відводом з кутом вигину  $30^\circ$  у  $6$  разів менший, ніж відводом із кутом вигину  $90^\circ$ . Тому протягнути поршнем рукав можна в трубопровід, який містить декілька відводів, що на сьогодні не можливо виконати жодним із існуючих методів безтраншейної реконструкції.



**Рисунок 6.4** – Залежність необхідного тиску для подолання сили тертя рукава до внутрішньої стінки трубопроводу в місці зміни напрямку його протягування від кута вигину відводу

**Таблиця 6.2** – Результати розрахунків необхідного тиску для протягування поршнем рукава дефектним відводом

$\varphi, ^\circ$	30	45	60	90
$P_6, \text{Па}$	19580	34562	54340	113483

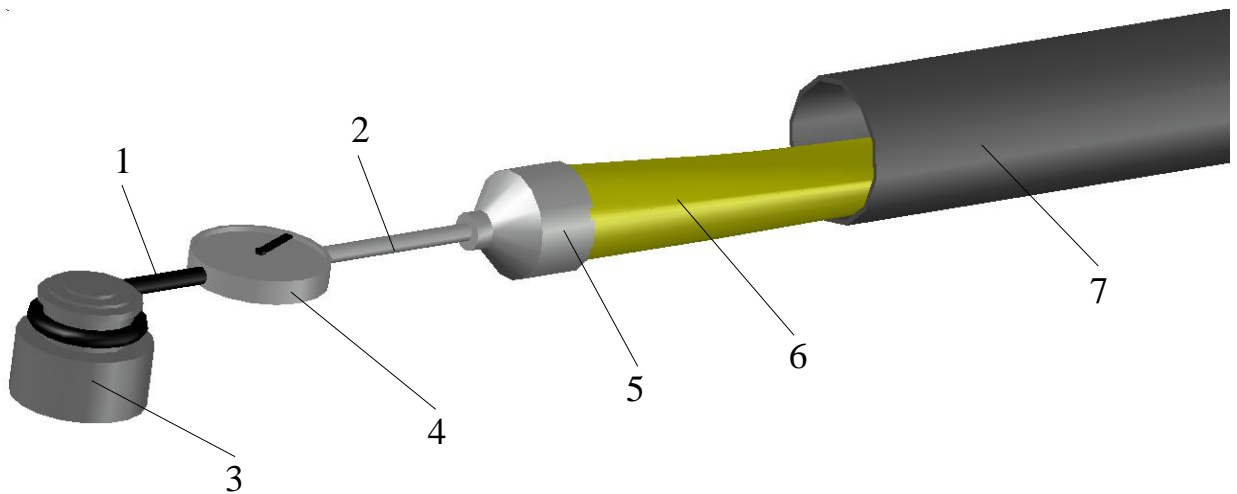
## **6.2 Експериментальні дослідження процесу протягуванням поршнем рукава трубопроводом, який містить відвід**

Для практичної реалізації ідеї ремонту ерозійно чи корозійно зношених відводів протягуванням поршнем рукава треба визначити, який вплив чинять основні чинники на динаміку процесу, визначити, які чинники підвищують ефективність процесу. Тому задачі експериментальних досліджень наступні:

- визначення всіх сил опору, які чинять вплив на рух системи, під час протягування поршнем рукава сталевим трубопроводом, який містить відвід;
- перевіряння можливості протягування поршнем рукава сталевим трубопроводом, який містить відвід;
- дослідження динаміки протягування поршнем рукава сталевим трубопроводом, який містить відвід.

Експериментальні дослідження було виконано в лабораторії кафедри газонафтопроводів і газонафтоосховищ Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу. Методику і результати досліджень викладено в [91].

Щоб експериментально визначити усі сили, що чинять опір протягуванню поршнем рукава сталевим трубопроводом, який містить відвід, розроблено та виготовлено лабораторний експериментальний стенд, який складається з динамометра 4 і електродвигуна 3 (рисунок 6.5). Динамометр 4 призначений для вимірювання сили, з якою електродвигун 3 протягує рукав 6 сталевую трубою 7. Електродвигун з динамометром з'єднаний ланцюгом 1. Кінець ланцюга закладений на зірочку електродвигуна. З оголовком 5 рукава 6 динамометр з'єднаний тягою 2.



1 – ланцюг; 2 – тяга; 3 – електродвигун; 4 – динамометр; 5 – оголовок;  
6 – рукав; 7 – сталевая труба

**Рисунок 6.5** – Схема експериментального стенду для визначення сили тертя між рукавом і сталевую трубою

Довжина труби  $L=4$  м, а внутрішній діаметр  $D_{в.с}=49$  мм. Рукав полотняний діаметром  $D_p=50$  мм. Вага погонного метра рукава складала  $q_p=4,1$  Н/м.

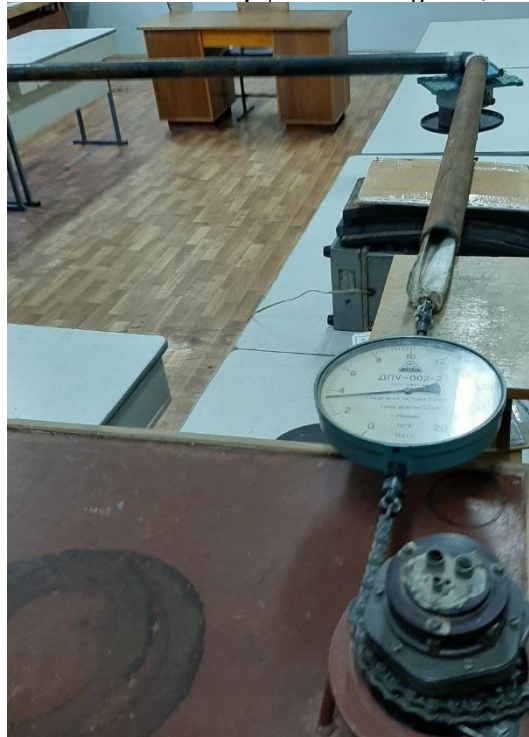
Експериментально було визначено силу тертя між рукавом і сталевую трубою (рисунок 6.6). Рукав також протягувався трубопроводом, який містив відвід, і динамометром вимірювалось необхідне для цього зусилля (рисунок 6.7).



**Рисунок 6.6** – Експериментальне визначення сили тертя між рукавом і сталевую трубою

Також рукав змотувався на барабан і поміщався в герметичну циліндричну

камеру. Вага барабана з намотаним рукавом складала  $q_{\sigma}=34$  Н. Радіус циліндричних виступів у бокових поверхнях герметичної циліндричної камери  $r_{\sigma, \delta}=0,04$  м, а радіус осердя барабана з намотаним рукавом  $R_{\sigma}=0,21$  м.



**Рисунок 6.7** – Експериментальне визначення зусилля, необхідного для протягування рукава трубопроводом, який містить відвід

Тоді динамометром вимірювалось зусилля, необхідне для витягування рукава з барабана, поміщеного в герметичній циліндричній камері (рисунок 6.8).



**Рисунок 6.8** – Експериментальне визначення зусилля, необхідного для витягування рукава з барабана, поміщеного в герметичній циліндричній камері



Для експериментів було виготовлено поршень (рисунок 6.9), який містить циліндричний корпусу на якому закріплені дві гумові манжети товщиною  $h_m=10$  мм та діаметром  $D_{m.n}=51$  мм. Маса поршня 0,13 кг. Для вимірювання сили тертя між манжетами поршня та стінкою сталеві труби поршень було запасовано в трубу (рисунок 6.10).



**Рисунок 6.9** – Поршень



**Рисунок 6.10** – Експериментальне визначення сили тертя між манжетами поршня та стінкою сталеві труби

Усі експериментальні визначення сил тертя, тягових зусиль виконувались п'ять разів і визначалось середнє арифметичне значення, яке заносилось в таблицю 6.3. Середнє арифметичне значення сили тертя між рукавом та сталеві трубою ділилось на довжину сталеві труби і заносились в таблицю 6.3. Сила тертя зумовлена притисканням натягнутого рукава до внутрішньої стінки трубопроводу у місці відводу визначалась за формулою

$$F_{B.B} = F_{T.B} - F_{Tp1} \cdot L, \quad (6.19)$$

де  $F_{T.B}$  – зусилля з яким рукав протягувався трубопроводом, який містить відвід;

$F_{Tp1}$  – сили тертя між одним погонним метром рукава та сталевією трубою;

$L$  – довжина трубопроводу, який містить відвід.

Щоб перевірити достовірність виведених в підрозділі 6.1 рівнянь за (6.2), (6.3), (6.4) та (6.5) розраховано сили опору, які діють на рухому систему під час протягування поршнем рукава сталевим трубопроводом який містить відвід. Результати розрахунків наведені в таблиці 6.3.

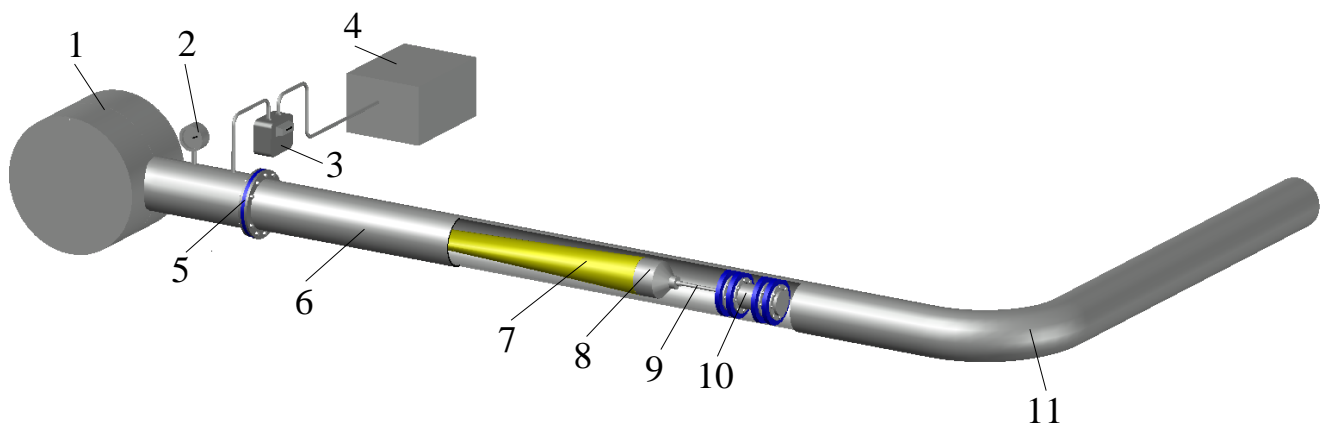
Як бачимо, розрахункові значення сил опору, які діють на рухому систему під час протягування поршнем рукава сталевим трубопроводом, який містить відвід, наближено рівні експериментальним, що підтверджує достовірність теоретично виведених залежностей.

**Таблиця 6.3** – Експериментальні та розрахункові сили опору, які діють на рухому систему під час протягування поршнем рукава сталевим трубопроводом який містить відвід

Значення	$F_{T.m.n}$ , Н	$F_{Tp}$ , Н/м	$F_{To.b}$ , Н	$F_{B.B}$ , Н
Експериментальне	42,7	1,7	1,2	13,9
Розрахункове	46,1	1,6	1,3	13,4

Сила тертя зумовлена притисканням натягнутого рукава до внутрішньої стінки трубопроводу у місці відводу  $F_{B.B}$  є незначною, а отже поршнем можливо протягнути рукав в трубопровід який містить декілька ерозійно зношених відводів.

Для експериментального перевіряння можливості реалізації ідеї протягування поршнем рукава сталевим трубопроводом, який містить ерозійно зношений відвід, дослідження динаміки цього процесу розроблено і виготовлено лабораторну експериментальну установку (рисунок 6.11), яка складається з сталевіого трубопроводу 6, який містить відвід 11, та герметичної циліндричної камери 1. Внутрішній діаметр сталевіого трубопроводу 49 мм, довжина 6 м. На



1 – герметичну циліндричну камеру; 2 – манометр; 3 – витратомір; 4 – компресор;  
 5 – фланець; 6 – сталевий трубопровід; 7 – протягуваний рукав; 8 – оголовок;  
 9 – тяга; 10 – поршень; 11 – відвід

**Рисунок 6.11** – Експериментальна установка для досліджень динаміки протягування поршнем рукава сталевим трубопроводом, який містить відвід

барaban намотують рукав (рисунок 6.12) і поміщають його в циліндричну камеру та закривають кришку, помістивши циліндричний виступ, всередині якої в осердя барабана. До трубної котушки циліндричної камери 1 (рисунок 6.13) приєднано манометр 2, витратомір 3 і компресор 4. У сталеву трубу 6 запасовують поршень 10, до якого тягою 9 за оголовок 8 прикріплюють рукав 7. Тоді закручують фланець

5 і включають компресор 4. Під тиском повітря поршень 10 рухається сталевим трубопроводом 6 та відводом 11 і протягує ними рукав 7.



**Рисунок 6.12** – Підготовлений до поміщення в циліндричну камеру барабан із намотаним рукавом

Для візуального спостереження за процесом протягування поршнем рукава був влаштований трубопровід із прозорих скляних труб і відводів внутрішнім діаметром 32 мм (рисунок 6.13, а). Протягувався композитний рукав діаметром 30 мм. Експериментальне випробування підтвердило можливість реалізації ідеї протягування рукава поршнем трубопроводами, які містять відводи. Рукав поршнем був протягнутий як горизонтально (рисунок 6.13, б), так і вертикально (рисунок 6.13, в) розміщеними двома скляними відводами.

Під час протягування поршнем рукава сталевим трубопроводом із відводом вимірювався тиск манометром 11, об'ємна витрата повітря витратоміром 3 (рисунок 6.11) і фіксувався час протягування. Для точної фіксації всіх цих параметрів було виконано відеозаписи та проводився уповільнений перегляд. Експериментальні дослідження виконувались для різних об'ємних витрат повітря, різних кутів нахилу сталевого трубопроводу до горизонту.

а)



в)



б)



а) – підготовлений до протягування рукава скляний трубопровід;

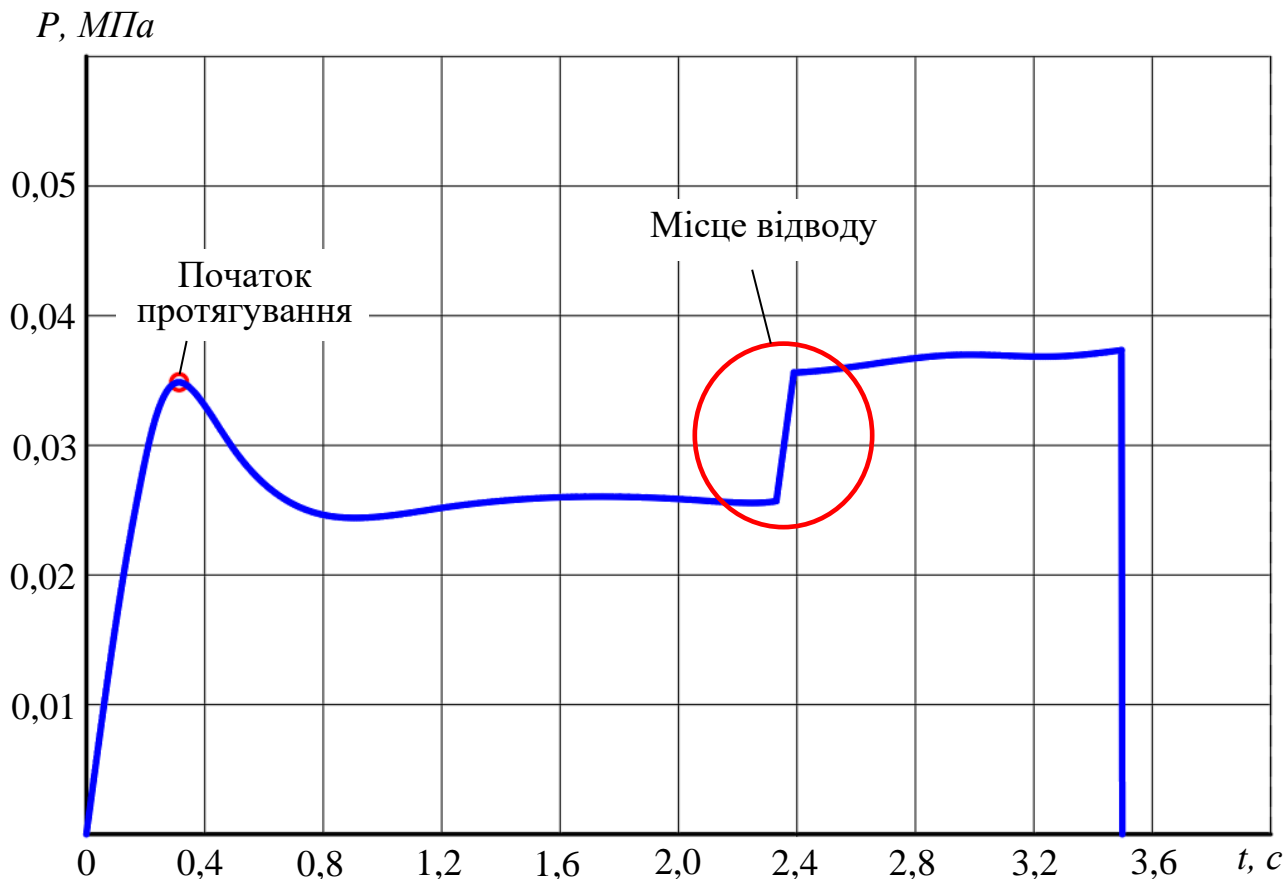
б) – протягування рукава горизонтально розміщеним скляним відводом;

в) – протягування рукава вертикально розміщеними відводами

**Рисунок 6.13** – Протягування поршнем рукава скляними трубопроводами з відводами

При об'ємній витраті повітря  $0,0058 \frac{м^3}{с}$  час протягування склав 3,5 с. Середня швидкість протягування  $1,7 \frac{м}{с}$ , що є надзвичайно великою швидкістю, якої неможливо досягти жодним іншим методом безтраншейної реконструкції. За рядом вимірювань значень тиску під час протягування поршнем рукава сталевим трубопроводом, який містить відвід, побудовано криву (рисунок 6.14) зміни тиску на початку трубопроводу в часі під час протягування. Після відкриття крана на виході компресора до початку протягування поршнем рукава тиск різко збільшується до 0,035 МПа, що зумовлено силами тертя спокою. Після початку протягування тиск зменшується до 0,025 МПа, що зумовлено різким збільшенням швидкості протягування рукава, яке призводить до зменшення сил тертя протягом усього часу протягування. І далі відбувались незначні коливання тиску з невеликим

його приростом. Після виходу поршня з відводу і зміни напрямку протягування рукава відбувається різке збільшення тиску до 0,035 МПа. Далі відбувається незначне збільшення тиску і в момент вильоту поршня з трубопроводу відбувається різке зменшення тиску до нуля.



**Рисунок 6.14** – Зміна тиску на початку трубопроводу в часі під час протягування рукава поршнем сталевим трубопроводом, який містить відвід

Щоб перевірити достовірність виведеної в підрозділі 6.1 формули (6.18), здійснено порівняння розрахованої за нею величини потрібного тиску компресора, для протягування поршнем рукав сталевим трубопроводом, який містить відвід, із експериментально визначеною величиною. Розрахований за (6.18) потрібний тиск компресора для протягування поршнем рукава сталевим трубопроводом довжиною 6 м, який містить відвід з кутом вигину  $90^\circ$ , складає 0,038 МПа. Це наближено дорівнює експериментально визначеному 0,035 МПа, що підтверджує достовірність теоретично виведеної формули (6.18).

Зі зменшенням об'ємної витрати повітря спостерігалось незначне

зменшення середньої швидкості протягування поршнем рукава сталевим трубопроводом, який містить відвід. При збільшенні кута нахилу сталевого трубопроводу до  $10^\circ$  спостерігалось незначне збільшення тиску на початку трубопроводу.

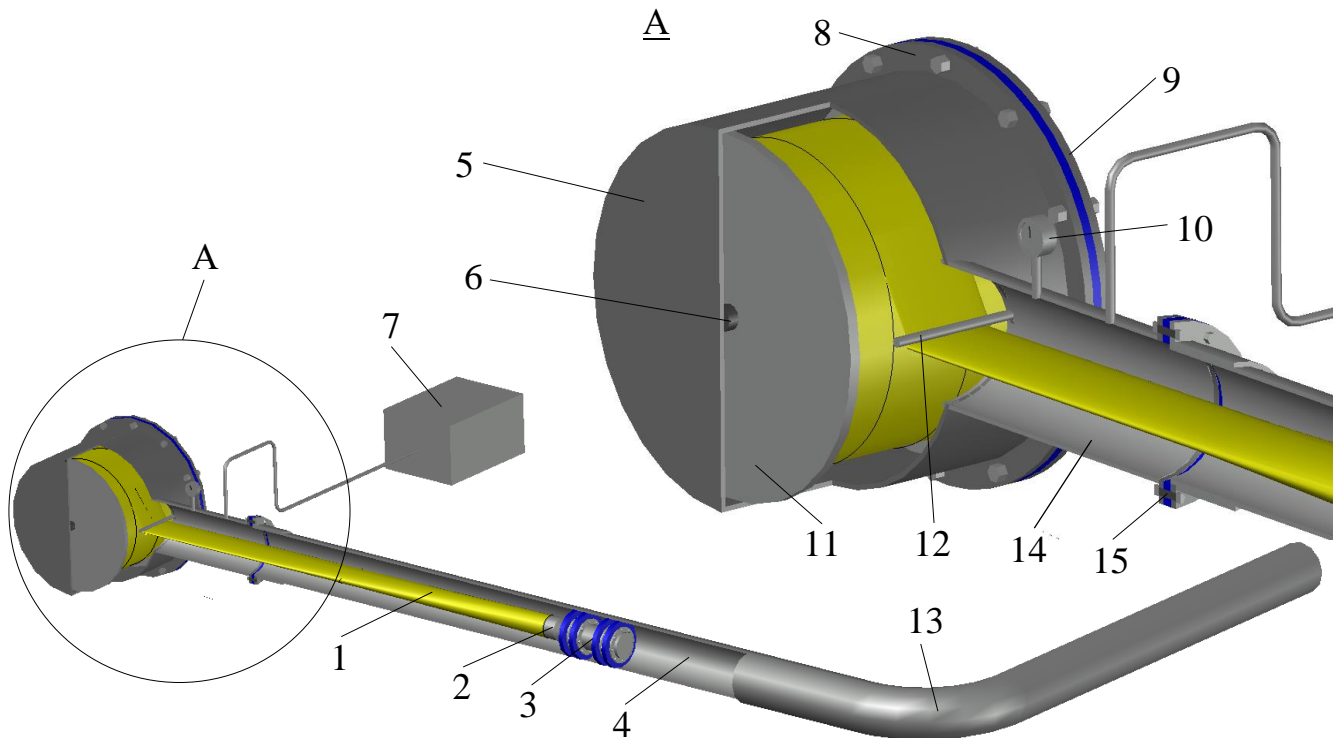
### **6.3 Розроблення технології безтраншейного ремонту відводів трубопроводів**

Існуючі технології безтраншейної реконструкції трубопроводів передбачають протягування рукава в сталевий трубопровід різноманітними тяговими засобами – лебідками, тракторами, бульдозерами, гідродомкратними установками тощо. Щоб протягнути рукав зношеним трубопроводом цими тяговими засобами, перед виконанням робіт необхідно проштовхнути в зношений сталевий трубопровід тяговий трос. Простовхнути тяговий трос у трубопровід, який містить ерозійно чи корозійно зношені відводи з кутом вигину більше  $30^\circ$  неможливо. Тому неможливо виконати протягуванням рукава безтраншейний ремонт дефектних відводів у важкодоступних місцях, безтраншейну реконструкцію зношених трубопроводів, які містять відводи.

Щоб протягнути рукав у трубопровід, який містить ерозійно чи корозійно зношені відводи, розроблено технологію “Тяговий поршень<sup>®</sup>” [99, 100]. Така технологія полягає в протягуванні поршнем рукава в зношені трубопроводи. Ідею протягнути поршнем рукав в трубопровід, який містить ерозійно чи корозійно зношені відводи, можливо реалізувати, що було встановлено теоретично і підтверджено експериментально в підрозділі 6.1 і підрозділі 6.2.

Обладнання для протягування рукава 1 трубопроводом 4, який містить ерозійно чи корозійно зношений відвід 13 (рисунок 6.15), складається з герметичної циліндричної камери 5, яка містить приварений до бічної її стінки циліндричний виступ 6. У циліндричній камері знаходиться барабан 11 з намотаним рукавом 1. Діаметр циліндричної камери 5 залежить від потрібної довжини рукава 1. Циліндрична камера 5 герметично закрита плоскою кришкою 9, яка кріпиться

болтами до фланця 8 циліндричної камери 5. Кришка 9 в середній частині містить такий же циліндричний виступ, як і циліндрична камера 5. Тертю рукава 1 до стінок циліндричної камери 5 запобігає направляючий стрижень 12. Циліндрична камера 5 містить трубну котушку 14, до якої приєднано манометр 10 і компресор 7. Трубну котушку 14 циліндричної камери 5 до трубопроводу 4 з дефектним відвідом 13 кріплять фланцем 15 (або муфтою з фланцем). Рукав 1 прикріплено до оголовка 2, який, в свою чергою, прикріплений до поршня 3.



- 1 – рукав; 2 – оголовок; 3 – поршень; 4 – трубопровід; 5 – циліндрична камера;  
 6 – циліндричний виступ; 7 – компресор; 8, 15 – фланець; 9 – кришка;  
 10 – манометр; 11 – барабан; 12 – направляючий стрижень; 13 – відвід;  
 14 – трубна котушка

**Рисунок 6.15** – Протягування поршнем рукава в трубопровід, який містить дефектний відвід

У майстерні або на монтажному майданчику на барабан 11 намотують рукав 1 і розміщують його в циліндричній камері 5 таким чином, щоб у центральний отвір барабана був поміщений циліндричний виступ 6 (рисунок 6.15). Тоді закручують болтами кришку 9, попередньо помістивши її циліндричний виступ у центральний



отвір барабана 11. У сталеву трубу 4, яка містить дефектний відвід 13, запасовують поршень 3, до якого за оголовок 2 кріплять рукав 1. Після цього закручують фланець 15 і вмикають компресор 7. Тиск за поршнем 3 зростає, і він починає рухатись трубопроводом 4 і тягне за собою рукав 1, розмотуючи барабан 11, який обертається на циліндричному виступі 6 камери 5 і циліндричному виступі кришки 9. Тиск у трубній котушці 14 вимірюється манометром 10. Таким чином, поршень 3 протягує рукав 1 усією довжиною трубопроводу 4, який містить відвід 13. [89]

Розроблена технологія є також ефективною для ремонту ерозійно чи корозійно зношених відводів у важкодоступних місцях, безтраншейної реконструкції дефектних, зношених сталевих трубопровідних комунікацій гнучкими композитними трубами виробництва США, Канади. Такі труби набувають все ширшого застосування у світі. Згідно із вимогами наведеними в [90] можна виконати протягування до 3000 м гнучкої композитної труби в сталевий трубопровід.

Щоб застосовувати гнучкі композитні труби в Україні розроблено національний стандарт [103], який встановлює технічні вимоги щодо проектування, технології будівництва та безтраншейної реконструкції трубопроводів.

Для транспортування та зберігання гнучкі композитні труби намотують на барабан (рисунок 6.16, а), упаковують у бухту (рисунок 6.16, б). Залежно від діаметра гнучкої композитної труби її довжина на барабані чи в бухті може складати більше 1 км. Намотану на барабан чи упаковану в бухту гнучку композитну трубу можна легко та швидко розмотати на місці виконання робіт. Барабани, на яких намотані гнучкі композитні труби, містять центральний отвір і їх легко можна поміщати в циліндричну камеру 5 розробленого обладнання (рисунок 6.15).

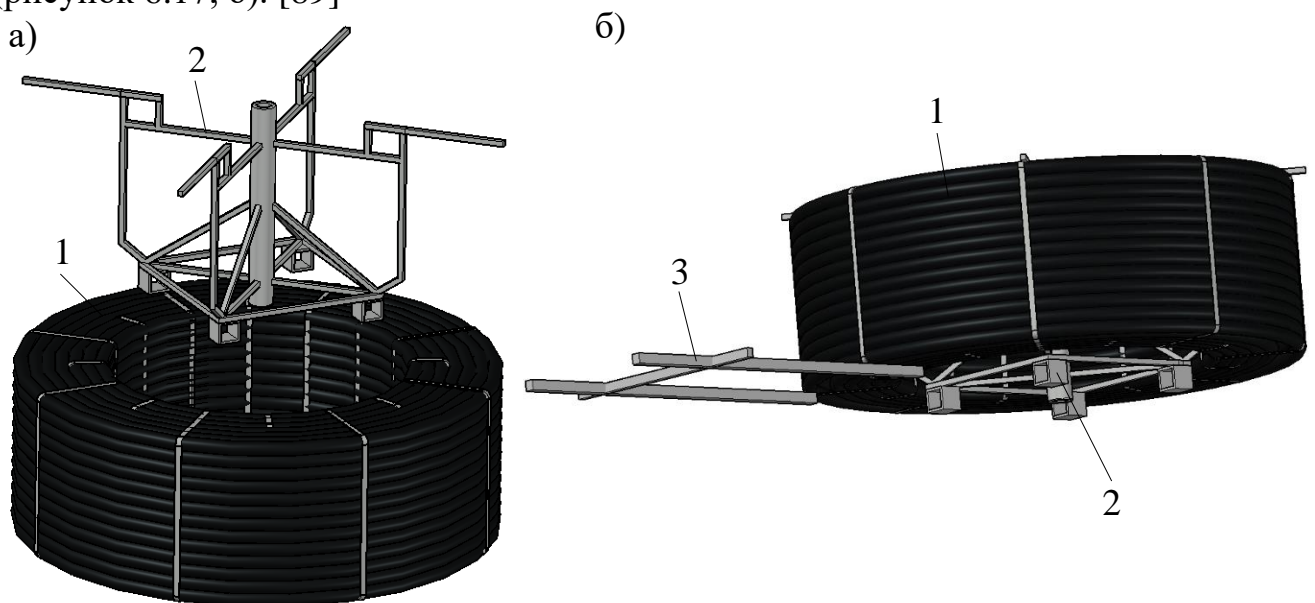
Циліндричні камери для барабанів і бухт треба виготовляти дещо більшими від самих барабанів чи бухт, а тому для транспортування їх доцільно розміщувати на півпричепах.



а) – на барабані; б) – у бухті

**Рисунок 6.16** – Гнучкі композитні труби

Щоб бухту гнучкої композитної труби помістити в циліндричну камеру 5 (рисунок 6.15), розроблено спеціальний підтримуючий пристрій 2 (рисунок 6.17, а), який в середній частині містить трубу. Розміщений у середині бухти 1 підтримуючий пристрій 1 закріплюють до бухти П-подібним фіксатором 3 (рисунок 6.17, б). [89]



а) – поміщення підтримуючого пристрою у бухту; б) – фіксування підтримуючого пристрою в бухті;

1 – гнучка композитна труба; 2 – підтримуючий пристрій; 3 – П-подібний фіксатор

**Рисунок 6.17** – Підготовка бухти гнучкої композитної труби до ремонтних робіт

## 6.4 Апробація розробленої технології безтраншейного ремонту відводів трубопроводів

Апробація технології ремонту дефектних відводів трубопроводів була виконана на трубопроводах теплових мереж м. Київ (рисунок 6.18). На вулиці Васильківській службою діагностики теплових мереж було виявлене наскрізне пошкодження відводу трубопроводу тепломережі з кутом вигину  $30^\circ$ . Номінальний діаметр трубопроводу складав 76 мм. Відвід знаходився між технічним колодязем 422a/1 і технічним колодязем 422a/2, розташованих на віддалі 15 м один від одного. Трубопровід прокладений у каналі зі збірних залізобетонних елементів (коробів).



Рисунок 6.18 – Апробація технології ремонту дефектних відводів трубопроводів протягуванням поршнем рукава

Пошкоджений відвід знаходився під автомобільною дорогою. Оскільки пошкодження було незначним, для збереження дорожнього покриття, зменшення об'єму земельних робіт було застосовано розроблену в дисертаційній роботі технологію протягування рукава поршнем зношеним сталевим трубопроводом, який містив дефектний відвід. Поршнем був протягнутий рукав трубопроводом діаметром 76 мм на довжину 15 м. Трубопровід містив дефектний відвід із кутом вигину  $30^\circ$ . Для виконання робіт працівниками служби АВД (аварійно відновлювальна дільниця) був використаний компресор на базі автомобіля Камаз. Необхідний тиск для виконання робіт не перевищував 0,08 МПа.

### **Висновки до розділу 6**

1. Теоретично та експериментально визначено закономірності зміни тиску на виході компресора під час протягування поршнем рукава трубопроводом, який містить ерозійно чи корозійно зношений відвід. Під час протягування поршнем рукава прямолінійною ділянкою трубопроводу відбувається плавне поступове збільшення тиску, величина якого визначається силами тертя рукава та манжет поршня до стінки трубопроводу. Коли змінюється напрям протягування в місці дефектного відводу трубопроводу, відбувається різке збільшення тиску величина якого визначається силою притискання рукава до внутрішньої стінки трубопроводу і залежить від кута вигину відводу. Необхідний тиск для протягування поршнем рукава трубопроводом довжиною 100 м і внутрішнім діаметром 49 мм, який містить по середині відвід із кутом вигину  $90^\circ$ , склав 0,29 МПа. Зі зменшенням кута вигину відводу потрібний тиск на виході компресора для протягування рукава зменшується і для кута вигину  $30^\circ$  склав 0,2 МПа.

2. Встановлено, що зі збільшенням кута вигину відводу збільшується необхідний тиск для подолання сили тертя рукава до внутрішньої стінки трубопроводу в місці зміни напрямку його протягування поршнем. Для відводів із кутом вигину  $90^\circ$  такий тиск склав 0,11 МПа, а для відводів із кутом вигину  $30^\circ$  був у 6 разів менший. Такі результати засвідчили, що протягуванням поршнем рукава можливо виконати відновлення трубопроводу, який містить декілька відводів, що

на сьогодні не можливо виконати жодним із існуючих методів безтраншейної реконструкції.

3. Розроблено техніку та технологію ремонту ерозійно чи корозійно зношених відводів трубопроводів у важкодоступних місцях. Особливістю цієї технології є те, що у трубопровід запасовують поршень і до нього кріплять рукав чи гнучку композитну трубу. Барабан із намотаним рукавом чи гнучкою композитною трубою поміщають у герметичну циліндричну камеру. Тоді подають компресором повітря в запоршневий простір і поршень протягує рукав чи гнучку композитну трубу трубопроводом, який містить дефектний відвід. Для протягування таким чином гнучких композитних труб, змотаних у бухти, розроблено спеціальний підтримуючий пристрій.

4. Результати виконаних досліджень, розроблена техніка та технологія ремонту ерозійно чи корозійно зношених відводів трубопроводів у важкодоступних місцях промислово апробована та впроваджена у СП “Київські теплові мережі” КП “Київтеплоенерго” РТМ “Печерськ”.

Основні наукові результати розділу опубліковані в працях [88–103].

## ЗАГАЛЬНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі отримано вирішення важливої науково-технічної проблеми оцінювання енерговитратності та забезпечення працездатності складних трубопровідних систем, яке ґрунтується на закономірностях впливу геометричних параметрів їх фасонних елементів, напрямків руху потоків (для трійників), режимних параметрів транспортування та концентрації і характеристик дисперсних фаз на газодинамічні процеси, структуру однофазних і багатofазних потоків, місцезростащування й інтенсивність ерозійного зношування та напружено-деформований стан. Основні результати роботи зводяться до наступного.

1. У результаті аналізу сучасних тенденцій встановлено, що практично всі аналітичні, чисельні або експериментальні дослідження в літературних джерелах стосуються окремих процесів, які відбуваються в фасонних елементах трубопроводів – чи то газодинамічних, чи ерозійного зношування або напружено-деформованого стану. Синергія цих процесів, поєднання їх в єдину цілісну фізичну картину на сьогодні не здійснені. У багатьох випадках немає достатньо виразних фізичних уявлень про закономірності процесів, які відбуваються в елементах складних трубопровідних систем, їх вплив на стінку. Порівняно з однофазними потоками рівняння для визначення втрат гідравлічної енергії двофазних потоків в фасонних елементах трубопровідних систем в літературних джерелах надзвичайно складні, є наближеними через прийнятий ряд припущень, не враховують структури двофазних потоків, нерівномірний розподіл фаз тощо. Передбачення ерозійного зношування фасонних елементів складних трубопровідних систем недостатньо вивчена на сьогодні задача. Геометрична форма ерозійних, корозійних дефектів у дослідженнях напружено-деформованого стану фасонних елементів надзвичайно спрощена (ідеалізована до сферичної чи прямокутної) і не відповідає реальній геометричній формі таких дефектів.

2. Визначено закономірності впливу режимних параметрів транспортування, концентрації та характеристик дисперсних фаз і геометричних параметрів фасонних елементів трубопровідних систем на газодинамічні процеси, структуру

одно- та двофазних потоків у їх внутрішній порожнині, втрати гідравлічної енергії. Із трійників найменш енерговитратним є штамповані трійники, в яких відношення радіуса відбортування до зовнішнього діаметра відгалуження перевищує 0,25. Найбільші втрати гідравлічної енергії спостерігались у фасонних елементах, встановлених у місцях найменших тисків у трубопроводі. Найсуттєвіший вплив об'ємної частки дисперсної фази на втрати гідравлічної енергії спостерігався у відводах трубопровідних систем із великим кутом і малим радіусом вигину та трійниках із найменшим радіусом відбортування або його відсутністю (зварні трійники). У відводах газопроводів із кутом вигину  $90^\circ$  втрати тиску двофазних потоків (за досліджуваних параметрів потоку) були втричі більшими, ніж у відводах з кутом вигину  $30^\circ$ , а у відводах із радіусом вигину, рівним DN – вдвічі більші, ніж у відводах із радіусом вигину  $3,5$  DN. Отримано емпіричні залежності для визначення коефіцієнтів місцевих опорів, втрати тиску двофазних потоків у фасонних елементах трубопровідних систем.

3. Показано, що ключем до розуміння процесів ерозійного зношування фасонних елементів складних трубопровідних систем є визначення та дослідження траєкторій руху ними дисперсних частинок, виявлення місць інтенсивного ударяння дисперсної фази в стінку фасонних елементів, визначення швидкості діаметрів дисперсних частинок, кутів атаки в місці вдаряння. Визначено закономірності впливу геометричної форми, напрямків руху двофазного потоку фасонними елементами трубопровідних систем на траєкторії руху дисперсних фаз такими елементами, перерозподіл швидкостей та розмірів дисперсних фаз. Виявлено місця інтенсивного вдаряння дисперсної фази до стінки фасонних елементів; визначено швидкість рідких і твердих частинок, кути атаки, діаметри крапель конденсату та твердих частинок у місці ударяння.

4. Експериментально та чисельним моделюванням визначено місцезнаходження максимального ерозійного зношування фасонних елементів трубопровідних систем. Визначено закономірності впливу режимних параметрів транспортування, характеристик дисперсних фаз, геометричних параметрів фасонних елементів і напрямків руху ними потоків (для трійників) на

місцезнаходження і інтенсивність їх ерозійного зношування. Визначальними чинниками, які суттєво впливають на величину ерозійного зношування відводів трубопроводів, є швидкість багатофазного потоку, діаметр відводу і діаметр дисперсних частинок (при збільшенні діаметра дисперсних частинок від 0,005 мм до 1,0 мм максимальна швидкість ерозійного зношування відводів збільшується в 70 разів, а при збільшенні швидкості газового потоку від 4 м/с до 19 м/с – в 35 разів). Відводи газопроводу з кутом вигину  $90^\circ$  у 2,5 рази швидше ерозійно зношуються порівняно з відводом із кутом вигину  $30^\circ$ , а відводи з радіусом вигину рівним DN – у 9,8 разів швидше, ніж відводи із радіусом вигину  $3,5$  DN. Заміна відводу трубопроводу з кутом вигину  $90^\circ$  на два відводи з кутом вигину  $45^\circ$  дозволяє вдвічі зменшити інтенсивність ерозійного зношування. Отримано нову емпіричну залежність між інтенсивністю ерозійного зношування відводів трубопроводів та основними параметрами процесу.

5. Поставлена та розв'язана математичним і чисельним моделюванням задача впливу ерозійних дефектів фасонних елементів трубопроводів на їх напружено-деформований стан. Розроблена методика та виконане комплексне тривимірне чисельне моделювання напружено-деформованого стану елементів трубопровідних систем складної геометричної форми з урахуванням газодинамічних процесів, які відбуваються у їхній внутрішній порожнині (нерівномірного розподілу тиску), температурного перепаду та складної тривимірної геометричної форми ерозійних дефектів стінки, яка змінювалась відповідно до швидкості ерозійного зношування. Базуючись на результатах моделювання процесів ерозійного зношування фасонних елементів трубопроводів, розроблено алгоритм тривимірного моделювання ерозійних дефектів їх стінки. Визначено закономірності впливу величини ерозійних дефектів на напружено-деформований стан фасонних елементів трубопроводів.

Математичним моделюванням отримано розрахункову залежність для визначення номінальних кільцевих напружень, які виникають у місці дефектів стінки відводу трубопроводу під дією основного силового навантаження (внутрішнього тиску). Її доцільно застосовувати, якщо фактична товщина стінки



тороподібних відводів трубопроводу в місці максимального ерозійного зношування перевищує 70 % їх номінальної товщини стінки. Розроблено науково-методичні підходи, покроковий алгоритм визначення допустимої глибини ерозійних дефектів фасонних елементів трубопроводів, оцінювання міцності таких елементів.

6. Теоретично й експериментально отримано наукове обґрунтування можливості застосування поршня, як тягового засобу, для безтраншейної реконструкції складних трубопровідних систем рукавом при відновленні їх працездатності, що на сьогодні не можливо виконати жодним із існуючих методів. Таке обґрунтування є новим перспективним досягненням, реалізація якого вносить значний вклад у науково-технічний прогрес у сфері безтраншейної реконструкції складних трубопровідних систем. Визначено закономірності зміни тиску на виході компресора під час виконання таких робіт. Тиск необхідний для протягування поршнем рукава трубопроводом довжиною 100 м та внутрішнім діаметром 49 мм, який містить у середній частині відвід із кутом вигину  $90^\circ$ , склав 0,29 МПа. Зі зменшенням кута вигину відводу тиск на виході компресора, необхідний для протягування рукава, зменшується, для кута вигину  $30^\circ$  він склав 0,2 МПа. Розроблено науково-практичні заходи з забезпечення працездатності ерозійно чи корозійно зношених відводів трубопроводів. Результати виконаних досліджень, розроблена техніка та технологія безтраншейного ремонту ерозійно чи корозійно зношених відводів трубопроводів промислово апробовані та впроваджені в СП “Київські теплові мережі” КП “Київтеплоенерго” РТМ “Печерськ”.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Guda S., Rowan S., Celik I. Rope formation for gas solid flow in a 90 degree bend with varying particle size distributions hefat. *Fluid Mechanics and Thermodynamics* : proceedings of 10<sup>th</sup> International Conference on Heat Transfer, c. Orlando, 14–16 july 2014 y. Orlando, Florida, 2014. P. 1154–1161.
2. Aung N., Yuwono T. Computational fluid dynamics simulations of gas-liquid two-phase flow characteristics through a vertical to horizontal right angled elbow. *ASEAN Journal on Science and Technology for Development*. 2013. No. 30 (1&2). P. 1–16.
3. Steady flow separation patterns in a 45 degree junction / R. Ethier, S. Prakash, D. Steinman [and oth.] // *J. Fluid Mech.* 2000. Vol. 411. P. 21–38.
4. Идельчик И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям / под ред. М. О. Штейнберга. 3-е изд., перераб. и доп. Москва : Машиностроение, 1992. 672 с.
5. Исследование полей осевых скоростей в приточных тройниках / О. И. Асланьян, И. З. Гольдевберг, В. А. Зюбан [и др. .] // *Изв. вузов. Энергетика*. 1987. № 11. С. 110–116.
6. Альтшуль А. Д., Животовский Л. С., Иванов Л. П. Гидравлика и аэродинамика : учеб. для вузов. Москва : Стройиздат, 1987. 414 с.
7. Повх И. Л. Техническая газодинамика. Москва : Машиностроение, 1976. 502 с.
8. Некрасов Б. Б. Гидравлика и ее применение на летательных аппаратах : учебник. - 2-е изд. перераб. и дополн. Москва : Машиностроение, 1967. 368 с.
9. Gardel A. Les pertes de charge dans les branchements en Te des conduites de section circulaire. *Bulletin technique de la suisse romande*. 1970. № 25. P. 363–391.
10. ESDU 73023:1973. Pressure losses in three-leg pipe junctions: combining flows. [Release date 1973-10-01]. The pub. is offic. London : ESDU International PLC, 1973. 57 p.
11. Miller D. S. A guide to losses in pipe and duct systems. Cranfield : British Hydromechanics Research Association, 1971. 329 p.
12. Miller D. S. Internal flow system. Cranfield : British Hydromechanics

Research Association, 1990. 396 p.

13. Richter H. Der druckabfall in gekrümmten glatten rohrleitungen. *Forschungsarbeiten auf dem Gebiete des Ingenieurwesens*. 1930. Heft 338. P. 30–47.

14. Абрамович Г. Н. Аэродинамика местных сопротивлений. *Труды ЦАГИ. Сб. Промышленная аэродинамика*. 1935. Вып. 211. С. 65–150.

15. Некрасов Б. Б. Гидравлика. Москва : ВВА, 1954. 290 с.

16. Талиев В. Н. Расчет местных сопротивлений тройников. Москва : Государственное издательство литературы по строительству и архитектуре, 1952. 34 с.

17. Essenfeld D. Network modeling and tracking of liquid preferential routes in natural gas pipeline systems : Master's thesis / The Pennsylvania State University. Pennsylvania. 2010. 96 p.

18. Gardel A. Pressure drop in flows through T-shaped fittings. *Bulletin technique De La Suisse Romande*. 1957. № 10. P. 123–130.

19. Dutta P., Saha S., Nandi N. Computational study of turbulent flow in pipe bends. *International Journal of Applied Engineering Research*. 2015. Vol. 10, № 11. P. 128–133.

20. Muftah A. 3D Fluid flow in an elbow meter-CFD model. *Sirte University Scientific Journal*. 2014. Vol. 4, № 1. P. 35–42.

21. Xin L., Shaoping W. Flow field and pressure loss analysis of junction and its structure optimization of aircraft hydraulic pipe system. *Chinese Journal of Aeronautics*. 2013. Vol. 26(4). P. 1080–1092.

22. Abdulwahhab M., Kumar N., Dakhil S. Numerical prediction of pressure loss of fluid in a T-junction. *International Journal of energy and environment*. 2013. Vol. 4, Issue 2. P. 253–264.

23. СТП 320.30019801.099-2003. Магістральні газопроводи. Технічне обслуговування лінійної частини. Типовий регламент. [Чинний від 2004-01-15]. Вид. офіц. Київ : ДК Укртрансгаз, 2003. 90 с.

24. СТП 320.30019801.069-2003. Магістральні газопроводи. Типовий регламент технічного обслуговування і ремонту переходів: повітряних, підземних

через автомобільні дороги та залізниці, переїздів через газопроводи. [Чинний від 2003-02-20]. Вид. офіц. Київ : ДК Укртрансгаз, 2003. 61 с.

25. СТП 320.30019801.063-2002. Магістральні та технологічні газопроводи. Елементи газопроводів. Ультразвуковий контроль. [Чинний від 2002-12-16]. Вид. офіц. Київ : ДК Укртрансгаз, 2002. 24 с.

26. СТП 320.30019801.056-2002. Комплексні обстеження надземного механічного технологічного обладнання компресорних станцій магістральних газопроводів. [Чинний від 2002-08-01]. Вид. офіц. Київ : ДК Укртрансгаз, 2002. 56 с.

27. Инструкция по контролю толщины стенок надземных газопроводов, технологической обвязки КС, ДКС, ГРС и гребенок подводных переходов магистральных газопроводов. [Дата введения 1998-07-13]. Изд. офиц. Москва : ИРЦ Газпром, 1998. 20 с.

28. РД 1.10-098-2004. Методика проведения технического диагностирования трубопроводов и обвязок технологического оборудования газораспределительных станций магистральных газопроводов. [Дата введения 2004-10-30]. Изд. офиц. Москва : ИРЦ Газпром, 2004. 71 с.

29. Finnie I. Erosion of surfaces by solid particle. *Wear*. 1960. Vol. 3. P. 87–103.

30. Ока Y., Okamura K., Yoshida T. Practical estimation of erosion damage caused by solid particle impact. *Wear*. 2005. Vol. 269. P. 102–109.

31. Comparison of computed and measured particle velocities and erosion in water and air flows / Y. Zhang, E. Reuterfors, B. McLaury [and oth.] // *Wear*. 2007. Vol. 263. P. 330–338.

32. API RP 14 E. Recommended practice for design and installation of offshore production platform piping systems. [Valid from 1991-10-01]. The pub. is offic. Washington : American Petroleum Institute, 1991. 22 p.

33. Salama M., Venkatesh E. Evaluation of API RP 14E erosional velocity limitations in offshore gas wells : proceedings of 15th Annual Offshore Technology Conference, c. Houston, 2–5 may 1983 y. Houston, 1983. P. 371–376.

34. Salama M. An alternative to API RP 14E erosional velocity limits for sand-

laden fluids. *Journal of Energy Resources Technology*. 2000. Vol. 122. P. 71–77.

35. Numerical investigation of the solid particle erosion rate in a steamturbine nozzle / A. Campos-Amezcuа, A. Gallegos-Muñoz, C. Alejandro Romero [and oth.] // *Applied Thermal Engineering*. 2007. Vol. 27, Issues 14–15. P 2394–2403.

36. Combination of CFD and DOE to analyse solid particle erosion in elbows / P. Frawley, J. Corish, A. Niven, M. Geron // *International Journal of Computational Fluid Dynamics*. 2009. Vol. 23, № 5. P. 411–426.

37. Пособие по расчету на прочность технологических стальных трубопроводов на  $P_y$  до 10 МПа (к СН 527-80). [Дата введения 1986-09-04]. Изд. офиц. Москва : Центральный институт типового проектирования, 1989. 18 с.

38. ВСН 185-85. Расчет на прочность обвязочных трубопроводов. [Дата введения 1986-05-01]. Изд. офиц. Москва : Миннефтегазстрой, 1986. 51 с.

39. СТО Газпром 2-2.3-328-2009. Оценка технического состояния и срока безопасной эксплуатации технологических трубопроводов компрессорных станций. [Дата введения 2010-01-14]. Изд. офиц. Москва : ОАО "Газпром", 2009. 58 с.

40. French RSE-M and RCC-MR code appendices for flaw analysis: Presentation of the fracture parameters calculation—Part IV: Cracked elbows / S. Marie, S. Chapuliot, Y. Kayser [and oth.] // *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. 2007. Vol. 84, Issues 10–11. P. 659–685.

41. СТО Газпром 2-2.3-453-2010. Методика оценки ресурса тройников. [Дата введения 2010-09-15]. Изд. офиц. Москва : ОАО "Газпром", 2010. 112 с.

42. Кипоренко А. С. Совершенствование нормативного обеспечения эксплуатационной безопасности трубопроводных систем атомных электростанций : монография. Харьков : ФЛП Тимченко, 2011. 126 с.

43. Larin O. O., Potopalska K. E. Estimation of residual strength of pipeline's elbow with volumetric corrosion defect, which is developing. *Праці Одеського політехнічного університету*. 2017. Вип. 3(53). С. 12–19.

44. Демидов П. Н., Трубаев А. И. Прогнозирование остаточного ресурса трубопроводов с учетом эрозионно-коррозионного износа. *Вісник НТУ «ХПИ»*.

2011. № 12. С. 23–31.

45. Юхимец П. С. Оценка остаточного ресурса поврежденного тройника. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*. 2015. № 3. С. 26–31.

46. Cracking failure analysis of T-type welded tee in waste heat boiler / Q. Wang, Z. Chen, X. Liu [and oth.] // *Advances in Engineering Research*. 2016. Vol. 103. P. 427–432.

47. Юхимець П. С., Гопкало О. П., Гопкало О. Є. Малоциклова міцність трійника трубопроводу з пошкодженнями. *Вісник Тернопільського національного технічного університету*. 2015. № 4. С. 71–82.

48. Doroshenko Ya., Rybitskyi I. Investigation of the influence of the gas pipeline tee geometry on hydraulic energy loss of gas pipeline systems. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. Vol. 1, No 8 (103). P. 28–34.

49. Дорошенко Я. В. CFD-дослідження газодинамічних процесів у зварних трійниках магістральних газопроводів. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Технічні науки*. 2020. Том 31 (70), № 1. Частина 2. С. 27–33.

50. Дослідження фізичної картини руху газових потоків відводами магістральних газопроводів / Я. В. Дорошенко, В. Б. Запихляк, Ю. І. Дорошенко, Н. М. Запихляк // *Нафтогазова галузь України*. 2017. № 5 (29). С. 25–29.

51. Дорошенко Я. В., Марко Т. І., Дорошенко Ю. І. Дослідження динаміки руху газу фасонними елементами обв'язки компресорної станції. *Науковий вісник*. 2016. № 1 (40). С. 57–71.

52. Дорошенко Я. В. CFD аналіз впливу геометричних параметрів трійників на гідравлічну енерговитратність трубопровідних систем. *Теоретичні та практичні аспекти розвитку науки та освіти (частина I)* : матеріали Міжнар. наук.-практ. конф., м. Львів, 22–23 січня 2020 р. Львів, 2020. С. 55–58.

53. Дорошенко Я. В., Марко Т. І., Дорошенко Ю. І. Дослідження фізичної картини руху газових потоків трійниками магістральних газопроводів. *Нафтогазова енергетика – 2017* : тези доп. 6-тої Міжнар. наук.-техн. конф., м. Івано-Франківськ, 15–19 травня 2017 р. Івано-Франківськ, 2017. С. 195–196.

54. Дорошенко Я. В., Марко Т. И., Дорошенко Ю. И. Компьютерное моделирование динамики движения газа фасонными элементами линейной части газопроводов. *Трубопроводный транспорт – 2016*: материалы XI Междунар. учеб.-науч.-практ. конф., г. Уфа, 24–25 мая 2016 г. Уфа, 2016. С. 60–61.

55. Дорошенко Ю. І., Михалків В. Б., Дорошенко Я. В. Розробка проектних рішень для зменшення втрат тиску у газових мережах із поліетиленових труб. *Питання розвитку газової промисловості України*. 2011. Вип. 39. С. 258–263.

56. Modeling computational fluid dynamics of multiphase flows in elbow and T-junction of the main gas pipeline / Ya. Doroshenko, Ju. Doroshenko, V. Zapukhliak [and oth.] // *Transport*. 2019. Vol. 34, No 1. P. 19–29.

57. Developing a set of measures to provide maximum hydraulic efficiency of gas gathering pipelines / V. B. Volovetskyi, A. V. Uhrynovskyi, Ya. V. Doroshenko, O. M. Shchyrba, Yu. S. Stakhmych // *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*. 2020. Vol. 101, Issue 1, July. P. 27–41.

58. Doroshenko Ya. V., Karpash O. M., Rybitskyi I. V. Investigation of dispersed contaminants influence on the hydraulic energy consumption of elements of gas pipeline systems with complex geometry. *Topical scientific researcher into resource-saving technologies of mineral mining and processing*: multi-authored monograph. Sofia, 2020. P. 182–207.

59. Дорошенко Я. В., Карпаш О. М., Гожаев Б. Н. Дослідження складу трубопровідних газорідинних потоків та впливу наявних у них шкідливих домішок на режими перекачування, енерговитрати на транспортування. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2019. № 4(73). С. 35–45.

60. Збільшення обсягів відбору газу в умовах періодичної експлуатації з газоконденсатних свердловин / В. Б. Воловецький, О. М. Щирба, О. Ю. Витязь, Я. В. Дорошенко // *Науковий вісник*. 2013. № 2(35). С. 111–121.

61. Аналіз причин зниження гідравлічної ефективності міжпромислових газопроводів та вибір способів її підвищення / В. Б. Воловецький, О. М. Щирба, О. Ю. Витязь, Я. В. Дорошенко // *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2013. № 3(48). С. 147–156.

62. Оптимізація роботи свердловин Наріжнрянського та Юліївського НГКР / В. Б. Воловецький, О. М. Щирба, О. Ю. Витязь, Я. В. Дорошенко // *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2013. № 4(49). С. 127–137.

63. Огляд існуючих методів очищення та осушення газу на підприємствах газової галузі / Ю. І. Дорошенко, Я. В. Дорошенко, В. Б. Михалків, М. Т. Лушпак // *Наукова думка сучасності і майбутнього* : збірн. статей учасників восьмої Всеукраїнської практично-пізнавальної конф., м. Дніпро, 30 січня – 7 лютого 2017 р. Дніпро, 2017. С. 68–71.

64. Дорошенко Я. В., Зінич А. І. CFD Моделювання роботи циклонних пиловловлювачів магістральних газопроводів. *Нафтогазова енергетика-2017* : тези доп. 6-тої Міжнар. наук.-техн. конф., м. Івано-Франківськ, 15–19 травня 2017 р. Івано-Франківськ, 2017. С. 206–207.

65. Дорошенко Я. В., Марко Т. І., Дорошенко Ю. І. Дослідження динаміки руху багатофазних потоків фасонними елементами обв'язки компресорної станції магістрального газопроводу. *Міжнародний науковий журнал*. 2016. № 7. С. 68–77.

66. Numerical simulation of the stress state of an erosion-worn tee of the main gas pipeline / Ya. Doroshenko, V. Zapukhliak, Ya. Grudz [and oth.] // *Archives of Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 101, No 2. P. 63–78.

67. Дорошенко Я. В. Дослідження впливу геометричних параметрів відводів газопроводів на внутрішньотрубні ерозійні процеси. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2020. № 1(74). С. 7–17.

68. Дорошенко Я. В. Дослідження впливу параметрів двофазних потоків на ерозійне зношування відводів газопроводів. *Комунальне господарство міст*. 2020. Том 1, Випуск 154. С. 240–247.

69. Doroshenko Ya. V., Marko T. I., Doroshenko Yu. I. The study of erosive wear of the shaped elements of compressor station manifold of a gas pipeline. *Journal of Hydrocarbon Power Engineering*. 2016. Vol. 3, Issue 2. P. 65–78.

70. Експериментальні дослідження ерозійного зношування фасонних елементів трубопроводів / Я. В. Дорошенко, В. Б. Запукхляк, Т. І. Марко, Р. Б. Стасюк // *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2017. № 1(62). С. 66–



76.

71. Марко Т. І., Дорошенко Я. В. Механізми ерозійного зношування стінки труби газопроводів. *Прикарпатський вісник НТШ. Число*. 2015. № 1(29). С. 315–326.

72. Марко Т. І., Дорошенко Я. В. Ерозійне зношування фасонних елементів газопроводів. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2014. № 4(53). С. 153–159.

73. Дорошенко Я. В. Моделювання витікань газу з газопроводів в аварійних ситуаціях. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2020. № 3 (150). С. 22–28.

74. Дорошенко Ю. І. Дорошенко Я. В. Дослідження іноземного досвіду визначення втрат газу через наскрізні дефекти магістрального газопроводу. *Topical issues of the development of modern science : abstracts of V International scientific and practical conf.*, с. Sofia, 15–17 January 2020 у. Sofia, 2020. P. 421–430.

75. Дослідження ерозійного зношування та міцності відводів магістральних газопроводів / Я. В. Дорошенко, В. Б. Запхляк, Л. Я. Побережний [та ін.] // *Пошкодження матеріалів під час експлуатації, методи його діагностування і прогнозування* : праці VI Міжнар. наук.-техн. конф., м. Тернопіль, 24–27 вересня 2019 р. Тернопіль, 2019. С. 153–156.

76. Дорошенко Я. В., Марко Т. І., Дорошенко Ю. І. Комп'ютерне моделювання ерозійного зношування відводів лінійної частини магістрального газопроводу. *Актуальні проблеми енергетики та екології* : матеріали XVI Всеукраїнської наук.-техн. конф., м. Одеса, 5–8 жовтня 2016 р. Одеса, 2016. С. 85–88.

77. Doroshenko Ya. V., Oliynyk A. P., Karpash O. M. Modeling of stress-strain state of piping systems with erosion and corrosion wear. *Physics and chemistry of solid state*. 2020. Vol. 21, No 1. P. 151–156.

78. Doroshenko Ya. V. Investigation of strength of shaped elements of the main gas pipeline. *Journal of Hydrocarbon Power Engineering*. 2019. Vol. 6, Issue 1. P. 14–21.

79. 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.

80. Дорошенко Я. В., Тихонов С. І. Напружено-деформований стан гнучких висячих переходів трубопроводів. *Науковий вісник ІФНТУНГ*. 2010. № 3(25). С. 106–110.

81. Дорошенко Я. В., Дорошенко Ю. І. Міцність криволінійних ділянок трубопроводів. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2010. № 2(35). С. 112–116.

82. Дорошенко Я. В., Карпаш О. М., Олійник А. П. Математичне і чисельне моделювання напружено-деформованого стану ерозійно зношених елементів трубопровідних систем складної геометричної форми. *Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні. ІТММ'2020* : тези доп. Міжнар. наук.-техн. конф. імені професора Михальова О.І., м. Дніпро, 17–19 березня 2020 р. Дніпро, 2020. С. 143–147.

83. Дорошенко Я. В., Дорошенко Ю. І., Тихонов С. І. Застосування сучасних програмних комплексів комп'ютерного моделювання для підвищення якості проектування та спорудження трубопроводів. *Науковий вісник ІФНТУНГ*. 2010. № 2(24). С. 117–120.

84. Doroshenko Y. V. Gas and Oil Pipeline Valve, Pig Launcher & Receiver. Saarbrucken. Germany : LAP Lambert Academic Publishing, 2016. 132 p. ISBN 978-3-659-94320-1.

85. Doroshenko Y. V. Gas and Oil Pipeline Bridges, Road and Railway Crossings. Saarbrucken. Germany : LAP Lambert Academic Publishing, 2015. 157 p. ISBN 978-3-659-69018-1.

86. Дорошенко Я. В. Спорудження та ремонт зосереджених об'єктів газонафтопроводів : підручник. Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2015. 845 с. ISBN 978-3-659-37720-4.

87. Дорошенко Я. В. Спорудження магістральних трубопроводів :

навчальний посібник. Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2010. 563 с. ISBN 978-966-694119-3.

88. 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.

89. Дорошенко Я. В. Розроблення технології ремонту фасонних елементів трубопровідних систем у важкодоступних місцях. *Нафтогазова енергетика*. 2020. № 1 (33). С. 36–46.

90. Сучасні технології будівництва промислових газонафтопроводів / Я. В. Дорошенко, В. А. Кучерявий, Н. М. Андрієшин [та ін.] // *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2019. № 3(72). С. 19–31.

91. Дорошенко Я. В., Поляруш К. А., Запукхляк 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.

92. 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.

93. 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.

94. 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.

95. Дорошенко Я. В., Марко Т. І., Тихонов С. І. Сучасні технології обслуговування, ремонту та реконструкції підводних газонафтопроводів. *Науковий вісник*. 2014. № 1(36). С. 118–131.

96. Дорошенко Я. В., Дорошенко Ю. І., Шиян Т. П. Проблеми і перспективи спорудження підводних газонафтопроводів. *Науковий вісник*. 2012. № 2(32). С.

189–195.

97. Дорошенко Я. В., Дорошенко Ю. І. Дослідження впливу руху поршня на надійність балкового переходу прокладеного за схемою пружновикривленого трубопроводу. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2011. № 3(40). С. 34–36.

98. 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.

99. 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.

100. 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 6<sup>th</sup> Inter. scient. conf., с. Stuttgart, 19 april 2019 у. Stuttgart, 2019. P. 139–151.

101. Дорошенко Я. В., Поляруш К. А. Метод безтраншейного релайнінгу теплогазових мереж. *Нафтогазова енергетика-2017* : тези доп. 6-тої Міжнар. наук.-техн. конф., м. Івано-Франківськ, 15–19 травня 2017 р. Івано-Франківськ, 2017. С. 196–197.

102. Дорошенко Я. В., Дорошенко Ю. І. Проблеми і перспективи спорудження та ремонту підводних газонафтопроводів. *Проблеми і перспективи транспортування нафти і газу* : матеріали Міжнар. наук.-техн. конф., м. Івано-Франківськ, 15–18 травня 2012 р. Івано-Франківськ, 2012. С. 2006–2008.

103. ДСТУ 9003:2020 Технологія будівництва магістральних і промислових трубопроводів із гнучких композитних труб. Загальні технічні вимоги. Вид. офіц. Київ : ДП УкрНДНЦ, 2020. 66 с.

104. Бобровский С. А., Яковлев Е. И. Газовые сети и газохранилища : учеб. для вузов. Москва : Недра, 1980. 413 с.

105. Бобровский С. А., Щербаков С. Г., Гусейн-Заде М. А. Движение газа в газопроводе с путевым отбором. Москва : Недра, 1972. 193 с.

106. Галиуллин З. Т., Черников В. И. Новые методы проектирования

газонефтепроводов. Москва : Недра, 1964. 132 с.

107. Гончарук М. І. Середюк М. Д., Шелудченко В. І. Довідник з газопостачання населених пунктів України. Івано-Франківськ : Сімик, 2006. 1314 с.

108. Трубопровідний транспорт газу : монографія / М. П. Ковалко та ін. Київ : Агентство з раціонального використання енергії та екології, 2002. 600 с.

109. Евдокимов А. Г., Тевяшев А. Д., Дубровский В. В. Моделирование и оптимизация потокораспределения в инженерных сетях. Москва : Стройиздат, 1990. 368 с.

110. Евдокимов А. Г., Тевяшев А. Д. Оперативное управление потокораспределением в инженерных сетях. Харків : Высшая школа, 1980. 144 с.

111. Середюк М. Д., Івоняк А. С., Зарубіна Ю. І. Визначення пропускної здатності розгалужених газових мереж високого і середнього тиску. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2001. № 38. С. 61–69.

112. Середюк М. Д., Малик В. Я., Болонний В. Т. Проектування та експлуатація систем газопостачання населених пунктів : навч. посіб. Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2003. 436 с.

113. Середюк М. Д., Пилипів Л. Д., Зарубіна Ю. І. Технологічні розрахунки газових мереж населених пунктів : навч. посіб. для студ. вищ. навч. закл. Івано-Франківськ : Факел, 2004. 183 с.

114. Сухарев М. Г. Алгоритм оптимального проектирования магистральных газопроводов с учетом динамики развития. *Газовая промышленность*. 1969. № 3. С. 73–76.

115. Сухарев М. Г., Ставровский Е. Р., Брянских В. Е. Оптимальное развитие систем газоснабжения. Москва : Недра, 1981. 294 с.

116. Сухарев М. Г., Ставровский Е. Р. Оптимизация систем транспорта газа. Москва : Недра, 1975. 277 с.

117. Альтшуль А. Д. Гидравлические сопротивления. 2-е изд. перераб. и доп. Москва : Недра, 1982. 224 с.

118. Альтшуль А. Д., Калицун В. И., Майрановский Ф. Г., Пальгунов П. П. Примеры расчетов по гидравлике : учеб. пособие для вузов. Москва : Стройиздат,

1976. 255 с.

119. Боровков В. М., Фаддеев И. П. Эрозия рабочих лопаток ЧНД паровых турбин на частичных режимах. *Известия вузов. Энергетика*. 1973. № 4. С. 128–129.

120. Богочев И. Н. Кавитационное разрушение и кавитационные сплавы. Москва : Машиностроение, 1972. 172 с.

121. Боровков В. М., Фаддеев И. П. Снижение эрозионного износа последних ступеней ЧНД паровых турбин при работе на режимах частичной нагрузки. *Энергетик*. 1972. № 9. С. 21–22.

122. Белов И. А., Исаев С. А., Коробков В. А. Задачи и методы расчета отрывных течений несжимаемой жидкости. Ленинград : Судостроение, 1989. 256 с.

123. Дейч М. Е., Зарянкин А. Е. Гидрогазодинамика. Москва : Энергоатомиздат, 1988. 384 с.

124. Идельчик И. Е. К вопросу о влиянии числа  $Re$  и шероховатости на сопротивление изогнутых каналов. *Промышленная аэродинамика*. 1953. Сб. № 4. С. 177–194.

125. Прузнер А. С. Сопротивление тройников при работе на нагнетании. *Современные вопросы вентиляции*. 1941. № 3. С. 41–60.

126. Гонцов Н. Г., Маринова О. А., Тананаев А. В. Турбулентное течение на участке поворота круглой трубы. *Гидротехническое строительство*. 1984. № 12. С. 24–28.

127. Френкель Н. З. Гидравлика : учеб. для вузов. Москва : Госэнергоиздат, 1956. 456 с.

128. Ito H., Imai K. Energy losses at  $90^\circ$  pipe junctions. *Journal of the Hydraulics Division*. 1973. Vol. 99, № HY9. P. 1353–1368.

129. Kinne E. Contribution to the knowledge of hydraulic losses in branches. *Technologie Hochschule -Munchen*. 1931. № 4. P. 70–93.

130. Rennels D., Hudson H. Pipe Flow: A Practical and Comprehensive Guide. New Jersey : John Wiley & Sons Inc., 2012. 320 p.

131. Oka K., Nozaki T., Ito H. Energy losses due to combination of flow at tees. *JSME International Journal Series B Fluids and Thermal Engineering*. 1996. Vol. 39,

Issue 3. P. 489–498.

132. Serre M., Odgaard A., Elder R. Energy loss at combining pipe junction. *Journal of Hydraulic Engineering*. 1994. Vol. 120, Issue 7. P. 808–830.

133. Oka K., Ito H. Energy losses at tees with large area ratios. *Journal of fluids engineering*. 2005. Vol. 127, Issue 1. P. 110–116.

134. Tsao S., Rodgers W. Numerical solutions of transients in pneumatic networks. Part 3. Network problems with branching. *Trans. ASME*. 1969. V.E. 36, № 3. P. 594–597.

135. Kinne E. Der Verlust in 60° Rohrverzweigungen. *Mitteilun gen des*. 1931. Heft 4. P. 90–105.

136. Левин С. Р. Сопротивление тройников вытяжных воздуховодов. *Отопление и вентиляция*. 1940. № 10. С. 5–10.

137. Morimune T., Hirayama N., Maeda T. Study of Compressible High Speed Gas Flow in Piping System. *Bulletin of JSME*. 1981. Vol. 24, Issue 198. P. 2082–2089.

138. Зюбан В. А., Гольденберг И. З. Исследование потерь напора в приточных тройниках. Москва : Справочно-информац. фонд НИИЭнформэнергомаш, 1983. 15 с.

139. Numerical and experimental investigations on internal compressible flow at T-type junctions / J. Pérez-García, J. Pérez-García, E. Sanmiguel-Rojas [and oth.] // *Experimental thermal and fluid science*. 2006. Vol. 31, Issue 1. P. 61–74.

140. An experimental study of compressible combining flow at 45 T-junctions / W. Wang, Z. Lu, K. Deng, S. Qu // *Journal of Mechanical Engineering Science*. 2015. Vol. 229, Issue 9. P. 1600–1610.

141. Homicz G. Computational fluid dynamics simulations of pipe elbow flow : Sand Report. New Mexico and Livermore : Sandia National Laboratories Albuquerque, 2004. 30 p.

142. Orhorhorol E., Ikpe A., Olorunleke A. Analysis and evaluation of oil well riser with different exit geometries using computational fluid dynamics (CFDs). *International Journal of Advances in Scientific Research and Engineering*. 2018. Vol. 4, Issue 6. P. 127–135.

143. Analysis of turbulent flow over a 90° bend of duct using in centralized A. C. Plant by CFD code / M. Didwania, L. Singh, A. Malik, M. Sisodiya // *Journal of Mechanical and Civil Engineering*. 2014. Vol. 11, Issue 4. P. 41–48.
- 144 Pantokratoras A. Steady laminar flow in a 90° bend. *Advances in Mechanical Engineering*. 2016. Vol. 8(9). P. 1–9.
145. Edge effect on the flow characteristics in a 90° tee junction / N. Costa, R. Maia, M. Proenca, F. Pinho // *Journal of Fluid Engineering of ASME*. 2006. Vol. 128. P. 1204–1217.
146. Preliminary experimental study on pressure loss coefficients of exhaust manifold / L. Xiao-lu, Z. Kun, W. Wen-hui [and oth.] // *Junction International Journal of Rotating Machinery*. 2014. Vol. 2014. P 1–10.
147. Abdulwahhab M., Kumar N., Dakhil F. CFD simulations and flow analysis through a T-junction pipe. *International Journal of Engineering Science and Technology*. 2012. Vol. 4, № 07. P. 33–44.
148. Sierra-Espinoza F., Bates C. Prediction and measurement of a turbulent flow in a 90° pipe junction. *Proc. V Encontro Nacional de Mecanica Computacional*. 1997. Vol. 2, P. 945–955.
149. Smart J. Movement of Black powder in gas pipeline. *Pipeline and Gas Journal*. 2007. Vol. 10. P. 82–85.
150. Smart J., Winters R. Transport of solids at low concentration in horizontal pipelines in *Advances in Solid-Liquid Flow in Pipelines and its Applications*. Pergammon Press. 1971. P. 101–124.
151. Smart J. Keep on moving. *World pipelines*. 2009. December. P. 43–47.
152. Потапенко Е. С. Экспериментальное исследование условий выноса жидкостных скоплений из внутренней полости газопровод : дис. ... канд. техн. наук : 25.00.19 Москва, 2014. 133 с.
153. A new optical-based device for online black powder detection in gas pipelines / E. Hosani, M. Meribout, A. Al-Durra [and oth.] // *IEEE transactions on instrumentation and measurement*. 2014. Vol. 63, Issue 9. P. 2038–2252.
154. Hydraulic conveying of solids through pipe bends / M. Toda, N. Kamori, S.



Saito, S. Maeda // *J. Chem. Eng. Jpn.* 1972. № 5. P. 4–13.

155. Upstream swirl-induction for reduction of erosion damage from slurries in pipeline bends / R. Wood, T. Jones, N. Miles, J. Ganeshalingam // *Wear*. 2001. Vol. 250. P. 770–778.

156. Flow of mono-dispersed particles through horizontal bend / D. Kaushal, A. Kumar, Y. Tomita [and oth.] // *International Journal of Multiphase Flow*. 2013. Vol. 52. P. 71–91.

157. Messa G., Malavasi S. Numerical prediction of particle distribution of solid-liquid slurries in straight pipes and bends. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*. 2014. Vol. 8, № 3. P. 356—372.

158. Numerical simulation of two-phase separation in T-junction with experimental validation / Tran M., Memon Z., Saieed A. [and oth.] // *Journal of Mechanical Engineering and Sciences*. 2018. Vol. 12, Issue 4. P. 4216–4230.

159. Saieed A. Two-phase separation in a T-junction : MSc Thesis / Universiti Teknologi Petronas. Malaysia, 2017. 186 p.

160. Wren E. Geometric effects in phase split at a large diameter T-junction : Doctoral Thesis / University of Nottingham. Nottingham, 2001. 254 p.

161. Chenoweth J., Martin M. Turbulent Two-Phase Flow. *Petroleum Refiner*. 1955. Vol. 34, № 10. P. 151–155.

162. Maddock C., Lacey P., Patrick M. The structure of two phase flow in a curved pipe. *ICHEME. Symp. Ser.* 1974. Vol. 38, Paper J2. P. 1–22.

163. Anderson G., Hills P. Two phase annular flow in tube bends. *Symposium on Multiphase Flow Systems*. 1974. № 38, Paper J1. P. 1–21.

164. Rippel G., Eidt C., Jordan H. Two phase flow in a coiled tube. *IEC Process Des. Dev.* 1966. Vol. 5. P. 32–39.

165. Ruffell A. The application of heat transfer and pressure drop data to the design of helical coil once-through boilers. *ICHEME. Symp. Ser.* 1974. Vol. 38, Paper I5. 1974. 1–22.

166. Fitzsimmons P. Two phase pressure drop in pipe components : Tech. Rep. HW-80970 Rev 1. Richland : Hanford Atomic Products Operation, 1964. 64 p.

167. Mazumder Q. CFD analysis of the effect of elbow radius on pressure drop in multiphase flow. *Modelling and Simulation in Engineering*. 2012. Vol. 2012. P. 1–8.
168. Azzi A., Friedel L. Two-phase upward flow 90° bend pressure loss model. *Forschung im Ingenieurwesen*. 2005. Vol. 69, № 2. P. 120–130.
169. Pressure drop models evaluation for two-phase flow in 90 degree horizontal elbows / S. Silva, L. Resendiz, C. Mariscal, T. Eslava // *Ingeniería mecánica tecnología y desarrollo*. 2010. Vol. 3, № 4. P. 115–122.
170. Peshkin M. About the hydraulic resistance of pipe bends to the flow of gas-liquid mixtures. *Teploenergetika*. 1961. Vol. 8, № 6. P. 79–80.
171. Ayala L., Essenfeld D., Alexis D. Two-phase flow impairment in gas gathering system: problems, detection and solutions for stripper well systems : Final Report. Pennsylvania : The Pennsylvania State University, 2010. 52 p.
172. Alp D. Numerical modeling of natural gas two-phase flow split at branching T-junctions with closed-loop network applications : Ph.D. Thesis / The Pennsylvania State University. Pennsylvania, 2009. 170 p.
173. Hart J., Hamersma P., Fortuin J. Phase distribution during gas-liquid flow through horizontal dividing junctions. *Nuclear Engineering and Design*. 1991. Vol. 126, Issue 3. P. 293–312.
174. Azimian M. Bart H. Investigation of hydroabrasion in slurry pipeline elbows and T-junctions. *Journal of Energy and Power Engineering*. 2014. № 8. P. 65–78.
175. Tian Z. Numerical modelling of turbulent gas-particle flow and its applications : Ph.D. Thesis / RMIT University. Melbourne, 2006. 149 p.
176. CFD Simulation of dilute gas-solid flow in 90° square bend / A. Walid, M. Tarek, H. Soubhi [and oth.] // *Energy and Power Engineering*. 2011. № 3. P. 246–252.
177. Dobrowolski B., Wydrych J. Computational and experimental analysis of gas-particle flow in furnace power boiler installations with respect to erosion phenomena. *Journal of theoretical and applied mechanics*. 2007. Vol. 45, Issue 3. P. 513–537.
178. Ansari M., Mohammadi S., Oskouei M. Two-phase gas/liquid-solid flow modelling in 90° bends and its effect on erosion. *Global Journal of researches in engineering Mechanical and mechanics engineering*. 2012. Vol. 12, Issue 1. P. 35–44.

179. Numerical simulation of particulate flow by the Eulerian-Lagrangian and the Eulerian-Eulerian approach with application to a fluidized bed / M. Chiesa, V. Mathiesen, J. Melheim, B. Halvorsen // *Computers & Chemical Engineering*. 2005. № 29(2) P. 291–304.

180. Numerical and experimental studies of turbulent particle-laden gas flow in an in-line tube bank / J. Tu, C. Fletch, Y. Morsi [and oth.] // *Chemical Engineering Science*, 1998. Vol. 2. P. 225–238.

181. Computational fluid dynamics modeling and experimental study of erosion in slurry jet flows / M. Wang, C. Huang, K. Nandakumar [and oth.] // *Int. J. Comput. Fluid Dynamics*. 2009. Vol. 23, Issue 2. P. 155–173.

182. Kliafas Y., Holt M. LDV Measurements of a turbulent air-solid two-phase flow in a 90° bend. *Experiments in Fluids*. 1987. Vol. 5, № 2. P. 73–85.

183. Venkatesh E. S. Erosion damage in oil and gas wells : SPE Paper 15183. Montana : Society of Petroleum Engineers, 1986. 12 p.

184. A comprehensive review of solid particle erosion modeling for oil and gas wells and pipelines applications / M. Parsi, K. Najmi, F. Najafifard [and oth.] // *J. Nat. Gas Sci. Eng.* 2014. № 21. P. 850–873.

185. Coupling analysis of fluid-structure interaction and flow erosion of gas-solid flow in elbow pipe / Z. Hongjun, Z. Hongnan, P. Qian, L. Xue // *Advances in Mechanical Engineering*. 2014. Vol. 2014. 10 p.

186. Al-Baghdadi M., Resan K., Al-Waily M. CFD investigation of the erosion severity in 3D flow elbow during crude Oil contaminated sand transportation. *Engineering and Technology Journal*. 2017. Vol. 35, Part A. № 9. P. 930–935.

187. Кочерга В. Г. Основы теории надежности оборудования нефтегазовых объектов. Хабаровск : Издательство ДВГУПС, 2014. 95 с.

188. Erosion rate correlations of a pipe protruded in an abrupt pipe contraction / M. Habib, H. Badr, R. Ben-Mansour, M. Kabir // *International Journal of Impact Engineering*. 2007. Vol. 34, Issue 8. P. 1350–1369.

189. Finnie I. The mechanism of erosion of ductile metals : proceedings of 3 rd US National Congress of Applied Mechanics, c. New York, 11–14 june 1958 y. New York,

1958. P. 527–532.

190. Finnie I. Some reflections on the past and future of erosion. *Wear*. 1995. Vol. 186, Part 1. P. 1–10.

191. Хамидуллин В. К. Ультразвуковые контрольно-измерительные устройства и системы. Ленинград : Издательство Ленинградского университета, 1989. 245 с.

192. Шлапак Л.С. Дослідження ерозійного зносу відводів обв'язки ГПА. *Сборник научных трудов SWorld*. 2014. Том 2, № 2. С. 84–89.

193. Обоснование расчетов скорости эрозионно-коррозионного износа и остаточного ресурса трубопроводов АЭС по данным эксплуатационного контроля / В. Бараненко, О. Гулина, Н. Сальников, О. Мурзина // *Ядерная энергетика*. 2016. № 2. С. 55–65.

194. Бараненко В. И., Янченко Ю. А., Белов М. С. Эрозионно-коррозионный износ трубопроводов с однофазной и двухфазной средами при эксплуатации АЭС с ВВЭР. *Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР* : сб. науч. работ 6-й Междунар. науч.-практ. конф., г. Подольск, 26–29 мая 2009 г. Подольск, 2009. С. 168–173.

195. О расчете скорости эрозионно-коррозионного износа / В. И. Бараненко, М. М. Нафталь, К. Ю. Семенова, А. В. Андреевкова // *Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР* : сб. науч.-техн. конф. 9-й Междунар. науч.-практ. конф., г. Подольск, 19–22 мая 2015 г. Подольск, 2015. С. 1–12.

196. Investigation of micro- and nanosized particle erosion in a 90° pipe bend using a two-phase discrete phase model / M. Safaei, O. Mahian, F. Garoosi [and oth.] // *The Scientific World Journal*. 2014. Vol. 2014. P. 1–12.

197. Improved CFD modeling and validation of erosion damage due to ne sand particles / A. Mansouri, H. Arabnejad, S. Karimi [and oth.] // *Wear*. 2015. Vol. 338. P. 339–350.

198. Study on erosion wear of fracturing pipeline under the action of multiphase flow in oil & gas industry / J. Zhang, J. Kang, J. Fan, J. Gao // *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. 2016. № 32. P. 334–346.

199. Mohyaldin M., Elkhatib N., Ismail M. Evaluation of different modelling

methods used for erosion prediction : proceedings of the NACE Corrosion Changhai Conference & Expo. Changhai, 2011. P. 1–19.

200. Parametric analysis of erosion in 90 degree and long radius bends / P. Zahedi, S. Karimi, M. Mahdavi // proceedings of 14th International Conference on Nanochannels, Microchannels, and Minichannels, c. Washington, 10–14 july 2016 y. Washington, 2016. 11 p.

201. Numerical modeling of sand particle erosion at return bends in gas-particle two-phase flow / A. Farokhipoura, Z. Mansoorib, M. Saar-Avvala, G. Ahmadi // *Scientia Iranica B*. 2018. Vol. 25, Issue 6. P. 3231–3242.

202. Experimental and computational study of erosion in elbows due to sand particles in air flow / R. Vieira, A. Mansouri, B. McLaury, S. Shirazi // *Powder Technology*. 2016. Vol. 288. P. 339–353.

203. Wang J., Shirazi S. A CFD Based Correlation for Erosion Factor for Long-Radius Elbows and Bends. *Journal of Energy Resources Technology*. 2003. Vol. 125, Issue 1. P. 26–34.

204. Pourariaa H., Seoa J., Paika J. Numerical study of erosion in critical components of subsea pipeline: tees vs bends. *Ships and Offshore Structures*. 2017. Vol. 12, Issue 2. P. 233–243.

205. Prediction of the maximum erosion rate of gas–solid two-phase flow pipelines / X. Jingyuan, L. Zhanghua, Hu. Jian, L. Min // *Energies*. 2018. Vol. 11(10). P. 27–73.

206. Chen X., McLaury B., Shirazi S. Application and experimental validation of a computational fluid dynamics (CFD)-based erosion prediction model in elbows and plugged tees. *Computers and Fluids*. 2004. Vol. 33, Issue 10. P. 1251–1272.

207. Numerical analysis of particle erosion in the rectifying plate system during shale gas extraction Energy / P. Shanbi, C. Qikun, S. Congxin, W. Di // *Science & Engineering*. 2019. № 7. P. 1838–1851.

208. Numerical investigation on erosion characteristics of coplanar elbows connection for gas-solid flow / W. Yu, L. Rongtang, L. Ming, Y. Junjie // *Energy Procedia*. 2019. Vol. 158. P. 5245–5250.

209. Felten F. Numerical prediction of solid particle erosion for elbows mounted in

series : proceedings of the ASME 2014 4th Joint US-European Fluids Engineering Division Summer Meeting, c. Chicago, 3–7 aug. 2014 y. Chicago, 2014. P. 23–33.

210. Pipeline failure analysis of bending pipe on the geothermal production well KMJ-X7 in kamojang geothermal field / A. Fadli, M. Karim, R. Harahap, A. Taufik // proceedings World Geothermal Congress: materials of Congress, c. Melbourne, 19–25 apr. 2015 p. Melbourne, 2015. 9 p.

211. Erosion-corrosion behavior and failure analysis of offshore steel tubular joint / E. Mahdi, A. Rauf, S. Ghani [and oth.] // *International Journal of electrochemical science*. 2013. Vol. 8. P. 7187–7210.

212. Numerical analysis of erosion of gas-pipeline elements / A. Ryabov, A. Kudryavtsev, O. Voronkov [and oth.] // proceedings STAR Global Conference (c. Vienna, 17–19 march 2014 y.). Vienna, 2014. 16 p.

213. Хасанов Р. Р. Напряженно-деформированное состояние и обеспечение прочности тройников подземных трубопроводов : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 25.00.19. Уфа, 2013. 23 с.

214. Шлапак Л. С. Науково-методичні основи діагностування напружено-деформованого стану надземних ділянок нафтогазопроводів : дис. ... докт. техн. наук : 05.15.13 / Івано-Франківський державний технічний університет нафти і газу. Івано-Франківськ, 1996. 493 с.

215. RSE-M Code. Rules for in-service inspection of nuclear power plant components. Paris, 1997. 123 p.

216. RCC-MR Code. Design and construction rules for mechanical components of FBR nuclear islands and high temperature applications appendix A16. Vol. Z. Paris, 2007. 89 p.

217. Goodall I. W. Lower bound limit analysis of curved tubes loaded by combined internal pressure and in-plane bending moment : Research Division Report RD/B/N4312. UK : Central Electricity Generating Board, 1978. 114 p.

218. Банахевич Ю. В. Визначення коефіцієнтів інтенсивності напружень в околі системи поверхневих тріщин у трубопроводі. *Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу*. 2009. № 4. С.

114–118.

219. Діагностика напружень у трубах шлейфів і трубопроводів обв'язок з корозійними дефектами навколо зварного шва / А. Б. Драгілев, Ю. В. Банахевич, В. А. Осадчук, А. О. Кичма // *Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу*. 2004. № 2(8). С. 102–106.

220. Підвищення ефективності технічного обслуговування магістральних газопроводів / В. Я. Грудз, Я. В. Грудз, В. М. Боднар, Т. Ф. Тутко // *Прикарпатський вісник НТШ*. Число. 2018. № 1(45). С. 200–209.

221. Ждек А. Я., Грудз В. Я. Визначення залишкового ресурсу тривало експлуатованих нафтопроводів із врахуванням наявних корозійних дефектів та умов експлуатації. *Науковий вісник ІФНТУНГ*. 2012. №2(32). С. 134–142.

222. Олійник А. П., Івасів О. Я. Математична модель напружено-деформованого стану квазіциліндричних тіл з дефектами поверхні під дією внутрішнього тиску. *Методи та прилади контролю якості*. 2006. № 16. С. 8–10.

223. Олійник А. П., Болгаченко Т. О. Математичне забезпечення для оцінки напружено-деформованого стану трубопроводів за даними інспекції інтелектуальними поршнями. *Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу*. 2009. № 1. С. 153–156.

224. Шлапак Л. С., Розгонюк В. В. Дослідження напружено-деформованого стану газопроводу під час капітального ремонту. *Нафтова і газова промисловість*. 1998. № 3. С. 37–39.

225. Ориняк І. В., Розгонюк В. В., Шлапак Л. С. Залишкова міцність трубопроводів із вм'ятинами. *Фіз.-хім. механіка матеріалів*. 1999. № 5. С. 79–82.

226. Duan Z., Shen S. Analysis and experiments on the plastic limit load of elbows under internal pressure. *Pressure Vessels and Piping*. 2006. № 83(10). P. 707–713.

227. Шлапак Л. С., Лінчевський М. П., Саркісов В. О. Про напружено-деформований стан газової обв'язки ГПА КС «Тарутине». *Нафтогазова галузь України*. 2014. № 3 С. 44–48.

228. Рудаченко А. В., Саруев А. Л. Исследования напряженно-деформированного состояния трубопроводов : учебное пособие. Томск : Изд-во

Томского политехнического университета, 2011. 136 с.

229. Kumar R., Pentakota A. Computational fluid dynamics simulations of pipe elbow flow. *International journal of professional engineering studies*. 2017. Vol. 9, Issue 2. P. 1–10.

230. Donga J., Baob X., Zhengc X. Comparison of two methods of finite element modeling for elbows with unequal wall thickness. *Physics Procedia*. 2012. № 33. P. 498–504.

231. A database to evaluate stress intensity factors of elbows with through wall flaws under combined internal pressure and bending moment / J. Chattopadhyay, B. Dutta, H. Kushwaha [and oth.] // *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. 1994. № 60(1). P.71–83.

232. Sharma K., Singh I., Maurya S. Numerical simulation of semi-elliptical axial crack in pipe bend using XFEM. *Journal of Solid Mechanics*. 2014. Vol. 6(2). P. 208–228.

233. Shou K., Huang C. Numerical analysis of straight and curved underground pipeline performance after rehabilitation by cured-in-place method. *Underground Space*. 2020. Vol. 5, Issue 1. P. 30–42.

234. Burst strength behaviour of an aging subsea gas pipeline elbow in different external and internal corrosion-damaged positions / G. Lee, H. Pouraria, J. Seo, J. Paik // *Int. J. Nav. Archit. Ocean Eng.* 2015. Vol. 7. P. 435–451.

235. Mirchev Y., Larin O., Potopalska K. Investigation of influence of the repair bandage on the stress-strain state of the pipeline elbow with VSD. „*NDT days 2016*”/ „*Дни на безразрушителния контрол 2016*”. 2016. № 1(187). P. 411–414.

236. Хасанов Р. Р. Расчет напряженно-деформированного состояния тройников штампованных (ТШС). *Нефтегазовое дело*. 2010. № 2. С. 11–23.

237. Оценка работоспособности сварных тройников при уменьшении строительных длин / К. Войдер, М. Глухов, Т. Есиев, С. Ярославцев // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия»*. 2014. Том 14, № 1. С. 96–100.

238. Jamie P. Finlay numerical methods for the stress analysis of pipe-work junctions : Ph.D. Thesis / Liverpool John Moores University. Liverpool, 2004. 258 p.



239. Васильев О. П., Свердлик Ю. М., Устюжанин А. В. О возможности применения сварных тройников на объектах ОАО «Газпром». *Экспозиция Нефть Газ*. 2014. № 7(39). С. 33–35.
240. Ładecki B., Matachowski F., Bednarz S. Assessment of integrity of operating gas pipelines. *AGH drilling, OIL, GAS*. Vol. 35, № 2. P. 367–376.
241. Юхимец П. С., Кобельский С. В., Филипенков В. В. Циклическая прочность поврежденного тройникового соединения. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*. 2015. № 2. С. 34–38.
242. Хасанов Р. Р., Султанмагомедов С. М. Влияние углового сварного шва на прочность тройника. *Нефтегазовое дело*. 2011. Том 9, № 1. С. 85–88.
243. Barry R., Venter G. Analysis of reinforcement designs for specials in steel pipelines. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. 2019. Vol. 169. P. 204–214.
244. Mkrtchyan L., Schau H., Hofer D. Stress indices for branch connections with arbitrary branch-to-run angles: proceedings of Transactions SMiRT 21, с. New Delhi, 6–11 novem. 2011 y. New Delhi, 2011. P. 1–8.
245. Bedoya J., Alexander C., Precht T. Repair of high pressure pipe fittings using composite materials : proceedings of 8th International Pipeline Conference, с. Calgary, 27 septem. – 1 oct. 2010 y. Calgary, 2010. P. 289–303.
246. СНиП 2.05.06-85. Магистральные трубопроводы. [Дата введения 1986-01-01]. Изд. офиц. Москва : ЦИТП Госстроя СССР, 1985. 52 с.
247. Таран В. Д. Сооружение магистральных трубопроводов. Москва : Недра, 1964. 544 с.
248. Launder B. E. Lectures in mathematical models of turbulence. London : Academic Press, 1972. 169 p.
249. Харитонов В. П. Фундаментальные уравнения механики жидкости и газа. Москва : МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. 65 с.
250. Squires K., Eaton J. Particle response and turbulence modification in isotropic turbulence. *Phys. Fluid*. Volume 2, № 7. 1990. P. 1191–1203.
251. Spalart P. R. Strategies for turbulence modeling and simulations. *Int. J. Heat*

*Fluid Flow*. 2000. Vol. 21. P. 252–263.

252. 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.

253. 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.

254. 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.

255. Wilcox D. C. Turbulence modeling for CFD. California : DCW Industries Inc., 1998. 477 p.

256. Menter F. R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. *AIAA Journal*. 1994. Vol. 32, № 8. P. 1598–1605.

257. ТУ У 27.2-05747991-001-2004. Деталі з'єднувальні і збірні одиниці магістральних і промислових трубопроводів на  $P_r$  до 10 МПа (100 кгс/см<sup>2</sup>). Технічні умови. [Чинний від 2005-06-01]. Вид. офіц. Суми : ВАТ "СНВО ім. М. В. Фрунзе", 2005. 98 с.

258. ГазТУ 102-488/1-05. Детали соединительные для магистральных газопроводов на  $P_r$  до 9,8 МПа (100 кгс/см<sup>2</sup>). Технические условия. [Дата введения 2006-07-01]. Изд. офиц. Челябинск : ОАО "Трубодеталь", 2005. 58 с.

259. ОСТ 102-61-81. Детали магистральных трубопроводов стальные приварные на  $P_u$  до 10,0 МПа (100 кгс/см<sup>2</sup>). Тройники сварные с усиливающими накладками. Размеры. [Дата введения 1981-07-01]. Изд. офиц. Москва : СПКБ Проектнефтегазспецмонтаж, 1983. 52 с.

260. Довідник працівника газотранспортного підприємства : довідник / В. В. Розгонюк та ін. Київ : Росток, 2001. 1090 с.

261. Довідник інженера диспетчерської служби : довід. / за заг. ред.: Ю. В. Пономарьова, М.П.Химка. Київ : ВАТ "УЦЕБОПнафтогаз", 2009. 248 с.

262. Грудз В. Я., Дорошенко Я. В., Васадзе А. В. Аналіз властивостей

накопичень в порожнині газопроводів. *Питання розвитку газової промисловості України*. 2004. Вип. 31. С. 90–94.

263. Baldwin R. M. Black powder in the gas industry sources, characteristics and treatment : Report № TA 97-4. Dallas : GMRC, 1998. 104 p.

264. Baldwin R. M. Black powder control starts locally, works back to source. *Pipeline & Gas Industry*. 1998. Vol. 82, № 4. P. 81–87.

265. Baldwin R. M. Black powder problem will yield to understanding, planning. *Pipeline & gas industry*. 1999. March. P. 109–112.

266. Tsochatzidis N. A., Maroullis K. E. Methods help remove black powder from gas pipelines. *Oil and gas journal*. 2007. Vol. 105, № 10. P. 52–58.

267. 210 pb content in natural Gas Pipeline Residues (Black powder) and its correlation with the chemical composition / J. Gody, F. Carvalho, A. Cordilha [and oth.] // *Journal of environmental radioactivity*. 2005. Vol. 83, Issue 1. P. 101–111.

268. Villea T., Cobucci J. Chemical and physical analysis of natural gas pipelines corrosion products (black powder). *Block*. 2002. Vol. 19. P. 461–463.

269. Обґрунтування оптимальних методів очищення газопроводів для різних структур газорідинних потоків / П. В. Горін, Д. Ф. Тимків, М. І. Братах, О.О. Фліпчук // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. Vol. 3, № 2. P. 36–42.

270. Братах М. І. Оцінка гідравлічного стану промислових газопроводів і розробка способу їх очистки : дис. ... канд. техн. наук : 05.15.13 / Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу. Івано-Франківськ, 2008. 150 с.

271. Стецюк С. М. Вплив газорідинної суміші на пропускну здатність промислових та міжпромислових газопроводів : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.23.03. Харків, 2010. 22 с.

272. Гусейнов И. С., Черников В. И. Влияние жидкостей на работу газопроводов. Москва : ВНИИОЭНГ, 1966. 64 с.

273. Капцов И. И. Сокращение потерь газа на магистральных. газопроводах. Москва : Недра, 1988. 160 с.

274. Гужов А. И. Совместный сбор и транспорт нефти и газа. Москва : Недра, 1973. 280 с.

275. Братах М. І., Добрунов Д. Є., Шкейр А. Вплив гідралічного стану системи промислових газопроводів на режими роботи об'єктів газовидобувного комплексу. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2017. № 4(65). С. 59–64.

276. Vijayaraghavan V. Failure of 38” Dry gas injection pipeline Black Powder corrosion mechanism URL: [https://www.researchgate.net/publication/321288112\\_Failure\\_of\\_38\\_Dry\\_gas\\_injection\\_pipeline\\_Black\\_Powder\\_corrosion\\_mechanism](https://www.researchgate.net/publication/321288112_Failure_of_38_Dry_gas_injection_pipeline_Black_Powder_corrosion_mechanism) (дата звернення: 28.05.2020).

277. Kumar M., Kaushal D. Modeling of sand-water slurry flow through horizontal pipe using CFD. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*. 2016. Vol. 64, Issue 3. P. 261–272.

278. Rizaldy R., Zarrouk S. Pressure drop in large diameter geothermal two-phase pipelines : *proceedings of 38th New Zealand Geothermal Workshop* (с. Auckland, 23–25 novemb. 2016 y.). Auckland, 2016. P. 1–5.

279. Hernández F., Blanco A., Rojas-Solórzano L. CFD modeling of slurry flows in horizontal pipes : *proceedings 8th Symposium on Applications in Computational Fluid Dynamics*, с. Jacksonville, 17–20 august 2008 y. Jacksonville, 2008. P. 857–863.

280. Uddin S., Mohanty S., Chandra G. Numerical analysis of sand-water slurry flow through horizontal pipeline for various particle size at high velocity. *International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology*. 2018. Vol. 6, Issue 5. P. 1577–1582.

281. Auteea A., Girib S. Experimental study on two-phase flow pressure drop in small diameter bends. *Perspectives in Science*. 2016. Vol. 8. P. 621–625.

282. Kumar U. Effect of added fines on relative pressure drop for narrow-sized silica sand slurry flow. *International Journal for Scientific Research & Development*. 2015. Vol. 3, Issue 9. P. 591–595.

283. Mazumder Q. CFD Analysis of single and multiphase flow characteristics in elbow. *Engineering*. 2012. Vol. 4. P. 210–214.

284. Large diameter riser laboratory gas-lift tests / G. Zabarar, R. Menon, W. Schoppa, III. Wicks // *proceedings of Offshore Technology Conference*, с. Houston, 6–9 may 2013 y. Houston, 2013. P. 23–29.

285. Experimental investigation of interfacial structures within churn flow using a dual wire-mesh sensor / M. Parsi, R. Vieira, C. Torres [and oth.] // *Int. J. Multiphase Flow*. 2015. Vol. 73. P. 155–170.

286. FLUENT User's Guide : Fluent Inc, 2001. 16 p.

287. Синайский Э. Г., Лапига Е. Я., Зайцев Ю. В. Сепарация многофазных многокомпонентных систем. Москва : ООО Недр-Бизнесцентр, 2002. 621 с.

288. Гиматудинов Ш. К. Физика нефтяного и газового пласта: учеб. 2-е изд., перераб. и доп. Москва : Недр, 1971. 312 с.

289. ANSYS – Вычислительная гидродинамика : каталог. Москва : Авторизованный дистрибьютор и центр комплектации ANSYS, 1998. 29 с.

290. Hinze J. O. Turbulence. New York: McGraw-Hill, 1975. 790 p.

291. Кочевский А. Н. Возможности моделирования течений жидкости и газа с помощью современных программных продуктов. *Вісн. Сум. держ. ун-ту. Сер. Техн. науки*. 2004. № 13. С. 5–20.

292. Котляр И. Я., Пиляк В. М. Эксплуатация магистральных газопроводов : 2-е изд., перераб. и доп. Ленинград : Недр, 1971. 248 с.

293. ГОСТ 5542-87. Газы горючие природные для промышленного и коммунально-бытового назначения. Технические условия. [Дата введения 1988-01-01]. Изд. офиц. Москва : ИПК Изд-во стандартов, 1987. 5 с.

294. Анализ опасных совместных воздействий механических частиц и непропорциональных усилий на элементы газорегуляторных пунктов / А. П. Усачев, А. Л. Шурайц, В. П. Желанов [и др.] // *Научно-технические проблемы совершенствования и развития систем газоэнергоснабжения. Сб. науч. тр. СГТУ*. Саратов, 2009. С. 4–14.

295. Эрозия / А. Эванс и др. ; пер. с англ. / под. ред. К. Прис. Москва : Мир, 1982. 464 с.

296. Райтер П. М. Моніторинг корозійно-ерозійних пошкоджень

нафтогазопроводів на основі визначення структури та фазового складу багатофазного потоку свердловин. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2011. № 4(14). С. 26–35.

297. Finnie I., Kabil Y. On the formation of surface ripples during erosion. *Wear*. 1965. Vol. 8. P. 60–69.

298. ДСТУ 7809:2015 Прокат сортовий, калібрований зі спеціальним обробленням поверхні з вуглецевої якісної конструкційної сталі. Загальні технічні вимоги. Вид. офіц. Київ : ДП УкрНДНЦ, 2016. 21 с.

299. Gallagher R. H. Finite element analysis: Fundamentals. New York : Prentice-Hall, 1975. 416.

300. ГОСТ 32388-2013. Трубопроводы технологические. Нормы и методы расчета на прочность, вибрацию и сейсмические воздействия. [Дата введения 2014-08-01]. Изд. офиц. Москва : Стандартинформ, 2016. 108 с.

301. Олійник А. П. Математичні моделі процесу квазістаціонарного деформування трубопровідних та промислових систем при зміні їх просторової конфігурації : монографія. Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2010 320 с.

302. Олійник А.П., Заміховський Л.М. Математичний апарат для контролю напружено-деформованого стану трубопроводів : монографія. Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2008. 306 с.

303. Якубовський Ю. Є., Малюшін Н. А., Якубовська С. В., Платонов О. М. Проблеми міцності трубопровідного транспорту. Санкт-Петербург : Недра, 2003. 200 с.

304. Яхно Б. О., Трубачов С. І. Stress-strain state of the cylindrical walled perforated shells. *Journal of Mechanical Engineering NTUU «Kyiv Polytechnic Institute»*. 2003. Вип. 67. С. 126–130.

305. Ратушняк Г. С. Топографія з основами картографії : Навчальний посібник. Вінниця : ВДТУ, 2002. 179 с.

306. Орыляк И. В., Радченко С. А. Математическое решение задачи Безье для тонкостенных труб с начальным несовершенством формы поперечного сечения при действии давления. *Проблемы прочности*. 2008. № 3. С. 100–123.

307. Guarracino F. Analytical evaluation of local effects in cylindrical shells testing and design. *Проблеми прочності*. 2003. № 5. С.28–35.

308. Інструкція з топографічного зняття у масштабах 1:5000, 1:2000;1:1000 та 1:500: ГКНТА-2.04-02-98. Затверджено наказом Головного управління геодезії, картографії та кадастру при Кабінеті Міністрів України від 9 квітня 1998 р., № 56. Вид. офіц. Київ : Укргеоінформ, 1998. 155 с.

309. Олійник А. П., Заміховський Л. М., Іванишин В. П. Визначення напружено-деформованого стану трубопроводів за даними внутрітрубної інспекції. *Надійність машин та прогнозування їх ресурсу* : матеріали доп. Міжнар. наук.-техн. конф., м. Івано-Франківськ, 2017 С. 292–296.

310. Олійник А. П., Болгаченко Т. О., Іванчук Л. М. Теоретичне обґрунтування системи математичної обробки даних внутрішньотрубної інспекції. *Наукові вісті Галицької академії*. 2009. № 1(15). С. 11–16.

311. Победря Б. Е. Лекции по тензорному анализу : учеб. пособ. 3-е изд. Москва : Из-во Московского ун-та, 1986. 264 с.

312. Победря Б. Е., Георгиевский Д. В. Лекции по теории упругости. Москва : Эдиториал УРСС, 1999. 208 с.

313. Седов Л. И. Механика сплошных сред : т. 2. Москва : Наука, 1984 т.2. 572 с.

314. 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.

315. 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.

316. 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.

317. 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.

318. Грудз Я. В. Розробка методів регулювання режиму роботи газопроводів в процесі їх діагностування інтелектуальними поршнями : дис. ... канд. техн. наук : 05.15.13 Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу. Івано-Франківськ, 2001. 126 с.

319. 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.

320. 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.

321. Short G. The pigging technology project: the first three years. *Pipe and pipelines int.* 1994. Vol. 39, Issue 4. P. 23–27.

322. 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.



## ДОДАТОК А

### СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

#### Наукові праці, в яких опубліковано основні наукові результати дисертації

1. Numerical simulation of the stress state of an erosion-worn tee of the main gas pipeline / Ya. Doroshenko, V. Zapukhliak, Ya. Grudz, L. Poberezhny, A. Hrytsanchuk, P. Popovych, O. Shevchuk // *Archives of Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 101, No 2. P. 63–78. **(індексується в Scopus, кuartиль Q3)**. (Особистий внесок – виконав CFD моделювання та дослідив закономірності руху потоків трійником, ерозійного зношування його стінки та напруженого стану. Розробив методичку розрахунку залишкового ресурсу ерозійно зношеного трійника. Підготував статтю до публікації).

2. Modeling computational fluid dynamics of multiphase flows in elbow and T-junction of the main gas pipeline / Ya. Doroshenko, Ju. Doroshenko, V. Zapukhliak, L. Poberezhny, P. Maruschak // *Transport*. 2019. Vol. 34, No 1. P. 19–29. **(індексується в Scopus, кuartиль Q2)**. (Особистий внесок – виконав 3D моделювання фасонних елементів лінійної частини газопроводів, моделювання руху ними багатofазних потоків, дослідив траєкторії руху крапель конденсату та твердих частинок цими елементами. Підготував статтю до публікації).

3. Doroshenko Ya., Rybitskyi I. Investigation of the influence of the gas pipeline tee geometry on hydraulic energy loss of gas pipeline systems. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. Vol. 1, No 8 (103). P. 28–34. **(індексується в Scopus, кuartиль Q3)**. (Особистий внесок – дослідив закономірності впливу радіусу заокруглення переходу від відводу до магістралі трійників на газодинамічні процеси в його внутрішній порожнині. Встановив залежність коефіцієнта місцевого опору рівнопрохідних трійників від їх геометричних параметрів. Підготував статтю до публікації).

4. Doroshenko Ya. V., Oliynyk A. P., Karpash O. M. Modeling of stress-strain state of piping systems with erosion and corrosion wear. *Physics and chemistry of solid state*.

2020. Vol. 21, No 1. P. 151–156. **(індексується в Scopus, Web of Science Core Collection)**. (Особистий внесок – здійснив постановку задачі дослідження, брав участь у виведенні формули для розрахунку кільцевих напружень, які виникають у стінці ерозійно чи корозійно зношених відводів трубопроводів. Дослідив закономірності впливу зміни товщини стінки відводів трубопроводів у місці їх ерозійного чи корозійного зношення на величину кільцевих напружень. Підготував статтю до публікації).

5. Development of trenchless technology of reconstruction of “Pulling pig P” pipeline communications / Ya. Doroshenko, V. Zapukhliak, K. Poliarush, R. Stasiuk, S. Bagriy // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. Vol. 2, No. 1(98). P. 28–38. **(індексується в Scopus, кuartиль Q3)**. (Особистий внесок – запропонував ідею виконати безтраншейну реконструкції зношеного трубопроводу протягуванням поршнем нової поліетиленової труби, брав участь у розробленні технології, теоретичному дослідженні закономірностей процесу, виконанні експериментальних досліджень і обробці їх результатів).

6. Developing a set of measures to provide maximum hydraulic efficiency of gas gathering pipelines / V. B. Volovetskyi, A. V. Uhrynovskyi, Ya. V. Doroshenko, O. M. Shchyrba, Yu. S. Stakhmych // *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*. 2020. Vol. 101, Issue 1, July. P. 27–41. **(індексується в Scopus, кuartиль Q2)**. (Особистий внесок – запропонував комплекс заходів для підвищення гідравлічної ефективності газозбірних трубопроводів газових родовищ).

7. Doroshenko Ya. V., Karpash O. M., Rybitskyi I. V. Investigation of dispersed contaminants influence on the hydraulic energy consumption of elements of gas pipeline systems with complex geometry. *Topical scientific researcher into resource-saving technologies of mineral mining and processing* : multi-authored monograph. Sofia, 2020. P. 182–207. **(розділ у колективній монографії іноземного видання)**. (Особистий внесок – дослідив закономірності впливу геометричних параметрів фасонних елементів трубопроводів, експлуатаційних параметрів транспортування, характеристик і об’ємної частки дисперсних фаз на гідравлічну енерговитратність

складних трубопровідних систем. Дослідив розподіл об'ємної частки суцільної та дисперсної фази, тиску в внутрішній порожнині фасонних елементів трубопроводів. Підготував розділ у колективній монографії до публікації)

8. Doroshenko Ya. V. Investigation of strength of shaped elements of the main gas pipeline. *Journal of Hydrocarbon Power Engineering*. 2019. Vol. 6, Issue 1. P. 14–21. **(наукове фахове видання України).**

9. Дорошенко Я. В. Дослідження впливу геометричних параметрів відводів газопроводів на внутрішньотрубні ерозійні процеси. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2020. № 1(74). С. 7–17. **(наукове фахове видання України).**

10. Дорошенко Я. В. Розроблення технології ремонту фасонних елементів трубопровідних систем у важкодоступних місцях. *Нафтогазова енергетика*. 2020. № 1 (33). С. 36–46. **(наукове фахове видання України).**

11. Дорошенко Я. В. CFD-дослідження газодинамічних процесів у зварних трійниках магістральних газопроводів. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Технічні науки*. 2020. Том 31(70), № 1, Частина 2. С. 27–33. **(наукове фахове видання України).**

12. Дорошенко Я. В. Дослідження впливу параметрів двофазних потоків на ерозійне зношування відводів газопроводів. *Комунальне господарство міст*. 2020. Том 1, Вип. 154. С. 240–247. **(наукове фахове видання України).**

13. Дорошенко Я. В. Моделювання витікань газу з газопроводів в аварійних ситуаціях. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2020. № 3 (150). С. 22–28. **(наукове фахове видання України).**

14. Дорошенко Я. В., Карпаш О. М., Гожаєв Б. Н. Дослідження складу трубопровідних газорідних потоків та впливу наявних у них шкідливих домішок на режими перекачування, енерговитрати на транспортування. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2019. № 4(73). С. 35–45. **(наукове фахове видання України).** (Особистий внесок – описав види та властивості характерних забруднень, які містяться у внутрішній порожнині трубопроводів. Виконав аналіз негативних наслідків, які відбуваються при накопиченні забруднень у внутрішній

порожнині трубопроводів, їх руху з транспортованим продуктом трубопроводом. Підготував статтю до публікації).

15. Сучасні технології будівництва промислових газонафтопроводів / Я. В. Дорошенко, В. А. Кучерявий, Н. М. Андрієшин, С. М. Стецюк, Ю. М. Левкович // *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2019. № 3(72). С. 19–31. **(наукове фахове видання України)**. (Особистий внесок – виконав аналіз зарубіжного досвіду будівництва, реконструкції трубопроводів із застосуванням гнучких композитних труб. Обґрунтував доцільність застосування таких труб у газонафтовому комплексі України. Встановив особливості безтраншейної реконструкції гнучкими композитними трубами дефектних, зношених сталевих трубопроводів. Підготував статтю до публікації).

16. 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. **(наукове фахове видання України)**. (Особистий внесок – приймав участь у розробленні, виготовленні експериментальної установки, виконанні експериментальних досліджень. Приймав участь у підготовці статті до публікації).

17. Дорошенко Я. В., Поляруш К. А., Запужляк 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 – виконав аналіз можливостей існуючих тягових засобів для безтраншейної реконструкції трубопроводів. Приймав участь у дослідженні закономірностей технологічного процесу безтраншейної реконструкції трубопровідних комунікацій очисним поршнем, розробленні технології виконання таких робіт. Приймав участь у підготовці статті до публікації).

18. 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 залежності напружено-деформованого стану ділянок газопроводу від геометричних параметрів дефектів форми поперечного перерізу труби (вм'ятин, овальності) із урахуванням газодинамічних процесів у трубопроводі в місці дефектів, визначив допустимі розміри таких дефектів. Приймав участь у підготовці статті до публікації).

19. Дослідження фізичної картини руху газових потоків відводами магістральних газопроводів / Я. В. Дорошенко, В. Б. Запухляк, Ю. І. Дорошенко, Н. М. Запухляк // *Нафтогазова галузь України*. 2017. № 5(29). С. 25–29. **(наукове фахове видання України)**. (Особистий внесок – чисельним моделюванням та експериментально дослідив закономірності руху газового потоку відводами газопроводів. Виявив місця інтенсивного ударяння дисперсної фази до стінки відводу, місця інтенсивного його ерозійного зношування).

20. Doroshenko Ya. V., Marko T. I., Doroshenko Yu. I. The study of erosive wear of the shaped elements of compressor station manifold of a gas pipeline. *Journal of Hydrocarbon Power Engineering*. 2016. Vol. 3, Issue 2. P. 65–78. **(наукове фахове видання України)**. (Особистий внесок – виконав 3D моделювання обв'язки компресорної станції й її фасонних елементів, CFD моделюванням дослідив закономірності газодинамічних процесів у їх внутрішній порожнині, виявив місця та визначив інтенсивність їх ерозійного зношування. Підготував статтю до публікації).

21. Експериментальні дослідження ерозійного зношування фасонних елементів трубопроводів / Я. В. Дорошенко, В. Б. Запухляк, Т. І. Марко, Р. Б. Стасюк // *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2017. № 1(62). С. 66–76. **(наукове фахове видання України)**. (Особистий внесок – розробив багатофункціональний експериментальний стенд для досліджень руху двофазних потоків прозорими фасонними елементами трубопроводів, методику експериментальних досліджень ерозійного зношування фасонних елементів трубопроводів. Приймав участь в експериментальних дослідженнях, виконав обробку й узагальнення результатів. Підготував статтю до публікації).

22. Дорошенко Я. В., Марко Т. І., Дорошенко Ю. І. Дослідження динаміки руху газу фасонними елементами обв'язки компресорної станції. *Науковий вісник*. 2016. № 1(40). С. 57–71. **(наукове фахове видання України)**. (Особистий внесок – розробив методику моделювання газодинамічних процесів, дослідив структуру потоку в внутрішній порожнині фасонних елементів обв'язки компресорної станції, встановив закономірності газодинамічних процесів у трійниках залежно від напрямків руху ними газових потоків. Підготував статтю до публікації).

23. Марко Т. І., Дорошенко Я. В. Механізми ерозійного зношування стінки труби газопроводів. *Прикарпатський вісник НТШ. Число*. 2015. № 1(29). С. 315–326. **(наукове фахове видання України)**. (Особистий внесок – виконав аналіз механізмів ерозійного зношування фасонних елементів трубопроводів, дослідив вплив усіх чинників на швидкість ерозійного зношування фасонних елементів трубопроводів. Підготував статтю до публікації).

24. 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 – виконав аналіз технічних можливостей сучасних безтраншейних технологій. Класифікував і здійснив аналіз існуючих методів безтраншейного ремонту газових і теплових мереж; навів чинники, які необхідно враховувати під час прийняття рішення про ремонт газових і теплових мереж безтраншейними технологіями. Приймав участь у підготовці статті до публікації).

25. 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 – встановив, які дефекти можуть виникати у важкодоступних місцях підземних ділянок газонафтопроводів, обґрунтував доцільність застосування внутрішньотрубних засобів для обстеження та ремонту важкодоступних ділянок газонафтопроводів. Приймав участь у підготовці статті до публікації).

26. Марко Т. І., Дорошенко Я. В. Ерозійне зношування фасонних елементів

газопроводів. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2014. № 4(53). С. 153–159. **(наукове фахове видання України)**. (Особистий внесок – виконав аналіз складу та фізичних властивостей накопичень, які містяться у внутрішній порожнині газопроводів. Встановив основні параметрами, які впливають на величину ерозійного зношування фасонних елементів газопроводів. Побудував схеми руху твердих частинок фасонними елементами лінійної частини газопроводів. Підготував статтю до публікації).

27. Дорошенко Я. В., Марко Т. І., Тихонов С. І. Сучасні технології обслуговування, ремонту та реконструкції підводних газонафтопроводів. *Науковий вісник*. 2014. № 1(36). С. 118–131. **(наукове фахове видання України)**. (Особистий внесок – виконав аналіз інноваційних технологій, які можуть бути застосовані для ремонту дефектів стінки труби прибережних і руслових ділянок підводних газонафтопроводів. Запропонував технології внутрішньотрубного ремонту важкодоступних ділянок підводних переходів газонафтопроводів. Підготував статтю до публікації).

28. Аналіз причин зниження гідравлічної ефективності міжпромислових газопроводів та вибір способів її підвищення / В. Б. Воловецький, О. М. Щирба, О. Ю. Витязь, Я. В. Дорошенко // *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2013. № 3(48). С. 147–156. **(наукове фахове видання України)**. (Особистий внесок – встановив основні причини накопичення рідких забруднень у внутрішній порожнині міжпромислових газопроводів; визначив основні чинники впливу на обсяг забруднень у їх внутрішній порожнині).

29. Дорошенко Я. В., Дорошенко Ю. І. Дослідження впливу руху поршня на надійність балкового переходу прокладеного за схемою пружновикривленого трубопроводу. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2011. № 3(40). С. 34–36. **(наукове фахове видання України)**. (Особистий внесок – розробив методику розрахунку впливу інерційної відцентрової сили, зумовленої рухом поршня криволінійною ділянкою на стінку трубопроводу. Підготував статтю до публікації).

30. Дорошенко Я. В., Дорошенко Ю. І., Тихонов С. І. Застосування сучасних

програмних комплексів комп'ютерного моделювання для підвищення якості проектування та спорудження трубопроводів. *Науковий вісник ІФНТУНГ*. 2010. № 2(24). С. 117–120. **(наукове фахове видання України)**. (Особистий внесок – виконав аналіз можливостей сучасних програмних комплексів комп'ютерного моделювання. Розглянув проблеми та задачі трубопровідного транспорту, які можна вирішити з допомогою програмних комплексів комп'ютерного моделювання. Підготував статтю до публікації).

31. Дорошенко Я. В., Дорошенко Ю. І. Міцність криволінійних ділянок трубопроводів. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2010. № 2(35). С. 112–116. **(наукове фахове видання України)**. (Особистий внесок – виконав аналіз міцності криволінійних ділянок трубопроводів із урахуванням усіх навантажень, які діють на трубопровід, ерозійного зношування стінок труб, наявності корозійних дефектів у місцях мінімального запасу міцності. Дослідив вплив радіуса згину трубопроводу на його міцність і запропонував оптимальні за рівнем напружень конструктивні рішення криволінійних ділянок трубопроводу. Підготував статтю до публікації).

### Патенти

1. 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. Автори: Дорошенко Я. В., Поляруш К. А., Запухляк В. Б. (патент на корисну модель). (Особистий внесок – запропонував ідею реконструкції трубопровідних комунікацій протягуванням поршнем нової поліетиленової труби, приймав участь у патентному пошуку, оформленні патенту).

2. 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. Автори: Дорошенко Я. В., Поляруш К. А. (патент на корисну модель). (Особистий внесок – запропонував ідею санації трубопровідних комунікацій потягуванням рукава поршнем, приймав участь у патентному пошуку, оформленні патенту).



## Опубліковані праці апробаційного характеру

1. Дорошенко Я. В., Карпаш О. М., Олійник А. П. Математичне і чисельне моделювання напружено-деформованого стану ерозійно зношених елементів трубопровідних систем складної геометричної форми. *Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні. ІТММ'2020* : тези доп. Міжнар. наук.-техн. конф. імені професора Михальова О.І., м. Дніпро, 17–19 березня 2020 р. Дніпро, 2020. С. 143–147. (Форма участі – публікація тез, усна доповідь).

2. Дорошенко Я. В. CFD аналіз впливу геометричних параметрів трійників на гідравлічну енерговитратність трубопровідних систем. *Теоретичні та практичні аспекти розвитку науки та освіти (частина I)* : матеріали Міжнар. наук.-практ. конф., м. Львів, 22–23 січня 2020 р. Львів, 2020. С. 55–58. (Форма участі – публікація тез).

3. Дорошенко Ю. І. Дорошенко Я. В. Дослідження іноземного досвіду визначення втрат газу через наскрізні дефекти магістрального газопроводу. *Topical issues of the development of modern science* : abstracts of V International scientific and practical conf., с. Sofia, 15–17 January 2020 у. Sofia, 2020. P. 421–430. (Форма участі – публікація тез).

4. Дослідження ерозійного зношування та міцності відводів магістральних газопроводів / Я. В. Дорошенко, В. Б. Запихляк, Л. Я. Побережний, Ю. Г. Мельниченко, Ю. І. Дорошенко // *Пошкодження матеріалів під час експлуатації, методи його діагностування і прогнозування* : праці VI Міжнар. наук.-техн. конф., м. Тернопіль, 24–27 вересня 2019 р. Тернопіль, 2019. С. 153–156. (Форма участі – публікація тез, усна доповідь).

5. 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 6<sup>th</sup> Inter. scient. conf., с. Stuttgart, 19 April 2019 у. Stuttgart, 2019. P. 139–151. (Форма участі – публікація тез).

6. Огляд існуючих методів очищення та осушення газу на підприємствах газової галузі / Ю. І. Дорошенко, Я. В. Дорошенко, В. Б. Михалків, М. Т. Лушпак //

*Наукова думка сучасності і майбутнього* : збірн. статей учасників восьмої Всеукраїнської практично-пізнавальної конф., м. Дніпро, 30 січня – 7 лютого 2017 р. Дніпро, 2017. С. 68–71. (Форма участі – публікація статті, усна доповідь).

7. Дорошенко Я. В., Поляруш К. А. Метод безтраншейного релейнінгу теплогазових мереж. *Нафтогазова енергетика-2017* : тези доп. 6-тої Міжнар. наук.-техн. конф., м. Івано-Франківськ, 15–19 травня 2017 р. Івано-Франківськ, 2017. С. 196–197. (Форма участі – публікація тез, усна доповідь).

8. Дорошенко Я. В., Марко Т. І., Дорошенко Ю. І. Дослідження фізичної картини руху газових потоків трійниками магістральних газопроводів. *Нафтогазова енергетика-2017* : тези доп. 6-тої Міжнар. наук.-техн. конф., м. Івано-Франківськ, 15–19 травня 2017 р. Івано-Франківськ, 2017. С. 195–196. (Форма участі – публікація тез, усна доповідь).

9. Дорошенко Я. В., Зінич А. І. CFD Моделювання роботи циклонних пиловловлювачів магістральних газопроводів. *Нафтогазова енергетика-2017* : тези доп. 6-тої Міжнар. наук.-техн. конф., м. Івано-Франківськ, 15–19 травня 2017 р. Івано-Франківськ, 2017. С. 206–207. (Форма участі – публікація тез, усна доповідь).

10. Дорошенко Я. В., Марко Т. І., Дорошенко Ю. І. Комп'ютерне моделювання ерозійного зношування відводів лінійної частини магістрального газопроводу. *Актуальні проблеми енергетики та екології* : матеріали XVI Всеукраїнської наук.-техн. конф., м. Одеса, 5–8 жовтня 2016 р. Одеса, 2016. С. 85–88. (Форма участі – публікація тез, усна доповідь).

11. Дорошенко Я. В., Марко Т. И., Дорошенко Ю. И. Компьютерное моделирование динамики движения газа фасонными элементами линейной части газопроводов. *Трубопроводный транспорт – 2016* : материалы XI Междунар. учеб.-науч.-практ. конф., г. Уфа, 24–25 мая 2016 г. Уфа, 2016. С. 60–61. (Форма участі – публікація тез).

12. Дорошенко Я. В., Дорошенко Ю. І. Проблеми і перспективи спорудження та ремонту підводних газонафтопроводів. *Проблеми і перспективи транспортування нафти і газу* : матеріали Міжнар. наук.-техн. конф., м. Івано-

Франківськ, 15–18 травня 2012 р. Івано-Франківськ, 2012. С. 2006–2008. (Форма участі – усна доповідь).

**Опубліковані праці, які додатково відображають наукові результати дисертації**

1. ДСТУ 9003:2020 Технологія будівництва магістральних і промислових трубопроводів із гнучких композитних труб. Загальні технічні вимоги. Вид. офіц. Київ : ДП УкрНДНЦ, 2020. 66 с. Автори: Дорошенко Я. В., Кучерявий В. А., Литвин В. Л., Підзирайло О. М.

2. Грудз В. Я., Дорошенко Я. В., Запхляк В. Б. Галузева методика. Технічне діагностування, розрахунок міцності фасонних елементів трубопровідних систем. Затверджено 27.07.2020. Київ : НВЦТД "Техдіагаз", 2020. 42 с.

3. Грудз В. Я., Запхляк В. Б., Дорошенко Я. В., Верхоляк Ю. Ю. Методика та розрахунок напружено-деформованого стану балкових систем надземних переходів. Затверджено 29.05.2020. Івано-Франківськ : ТОВ "ЕКСПРЕС-ГАЗБУД", 2020. 53 с.

4. Doroshenko Y. V. Gas and Oil Pipeline Valve, Pig Launcher & Receiver. Saarbrucken. Germany : LAP Lambert Academic Publishing, 2016. 132 p. ISBN 978-3-659-94320-1.

5. Doroshenko Y. V. Gas and Oil Pipeline Bridges, Road and Railway Crossings. Saarbrucken. Germany : LAP Lambert Academic Publishing, 2015. 157 p. ISBN 978-3-659-69018-1.

6. Дорошенко Я. В. Спорудження та ремонт зосереджених об'єктів газонафтопроводів : підручник. Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2015. 845 с. ISBN 978-3-659-37720-4.

7. Дорошенко Я. В. Спорудження магістральних трубопроводів : навчальний посібник. Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2010. 563 с. ISBN 978-966-694119-3.

8. Дорошенко Ю. І., Михалків В. Б., Дорошенко Я. В. Розробка проектних рішень для зменшення втрат тиску у газових мережах із поліетиленових труб. *Питання розвитку газової промисловості України*. 2011. Вип. 39. С. 258–263.

9. Дорошенко Я. В., Марко Т. І., Дорошенко Ю. І. Дослідження динаміки руху

багатофазних потоків фасонними елементами обв'язки компресорної станції магістрального газопроводу. *Міжнародний науковий журнал*. 2016. № 7. С. 68–77.

## ДОДАТОК Б

### АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ТЕОРЕТИЧНИХ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ЕРОЗІЙНОГО ЗНОШУВАННЯ ФАСОННИХ ЕЛЕМЕНТІВ ТРУБОПРОВІДІВ, ВСТАНОВЛЕННЯ ОСНОВНИХ ЗАКОНОМІРНОСТЕЙ ДОСЛІДЖУВАНОВОГО ПРОЦЕСУ

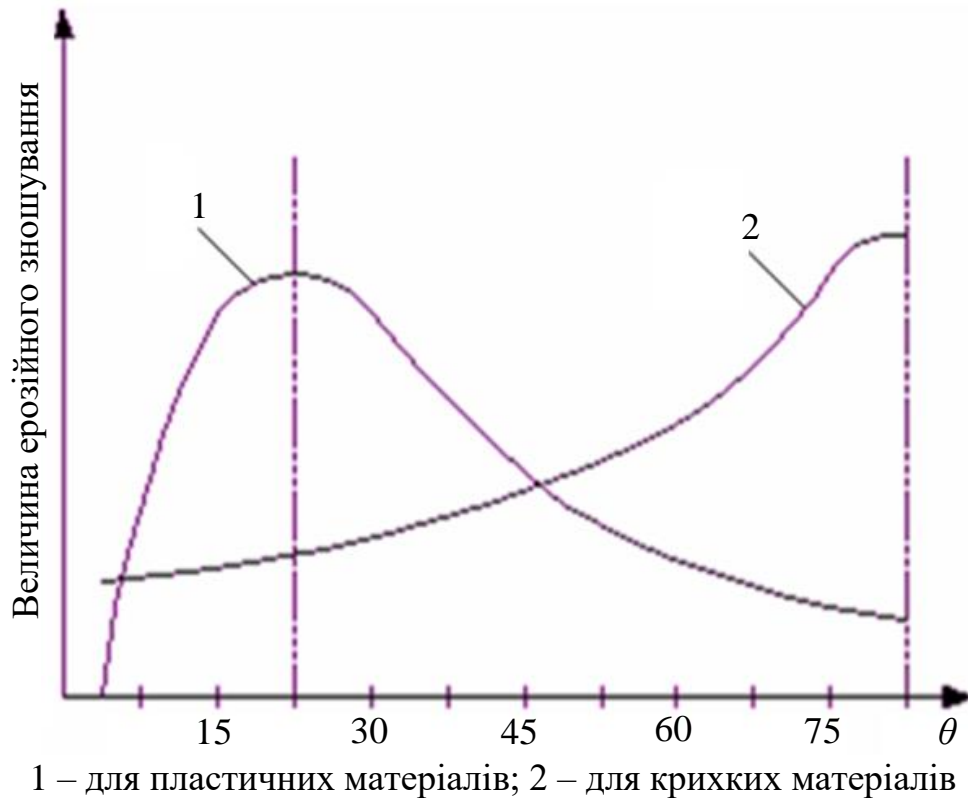
Для більш повного розуміння процесів ерозійного зношування елементів трубопровідних систем складної геометричної форми газопроводів, оцінювання достовірності отриманих результатів потрібний комплексний підхід – поєднання та аналіз результатів дослідження руху багатофазних потоків цими елементами з результатами теоретичних та експериментальних досліджень їх ерозійного зношування, визначення параметрів, які чинять суттєвий вплив на величину ерозійного зношування. Треба визначити вплив різних параметрів (швидкість дисперсної фази, розміри дисперсної фази, кут атаки, інтенсивність зіткнення частинок із стінкою трубопроводу) на інтенсивність ерозійного зношування фасонних елементів трубопроводів.

На сьогодні немає чіткого розуміння залежності між швидкістю ерозії стінки труби та умовами процесу. Очевидним є те, що чим більша маса та швидкість частинок, тим більша їх кінетична енергія і, відповідно, більша енергія ударяння та більше ерозійне зношування.

Існують відмінності залежності величини ерозійного зношування від кута атаки для пластичних і крихких матеріалів (рисунок Б.1). Для пластичних матеріалів, якими є трубопровідна сталь, максимальна величина ерозійного зношування спостерігається при кутах атаки від  $20^\circ$  до  $40^\circ$ . [295]

Максимальне ерозійне зношування пластичних матеріалів при кутах атаки від  $20^\circ$  до  $40^\circ$  деякі дослідники пояснюють наступним чином. З зменшенням кута атаки (рисунок Б.1) до нормальної складової ударяння частинок до стінки додається дотична складова, тобто удар частинки відбувається з одночасним її ковзанням поверхнею. Тому в поверхневих мікрооб'ємах стінки виникає інший напружений стан. Подальше зменшення кута атаки ( $<40^\circ$ ) призводить до значного

зменшення величини ерозійного зношування, внаслідок того, що нормальна складова сили ударяння слабшає.



**Рисунок Б.1** – Залежність величини ерозійного зношування від кута атаки  $\theta$

На величину ерозійного зношування швидкість дисперсної фази впливає не менше, ніж кут атаки. Результати досліджень викладених в підрозділі 4.4 свідчать про збільшення величини ерозійного зношування із збільшенням швидкості дисперсної фази. Це пояснюється збільшенням запасу кінетичної енергії дисперсної фази, яка переходить в енергію ударяння при взаємодії з стінкою.

Фракційний склад частинок дисперсної фази, які взаємодіють із стінками фасонних елементів трубопроводів, надзвичайно різноманітний. Одержані в підрозділі 4.4 результати свідчать, що з збільшенням діаметра і концентрації дисперсних фаз збільшується інтенсивність ерозійного зношування фасонних елементів трубопроводів. Отже величину ерозійного зношування фасонних елементів трубопроводів можна пов'язати не тільки з швидкістю дисперсних фаз і кутом атаки. Треба також характеристики дисперсних фаз, їх концентрацію.

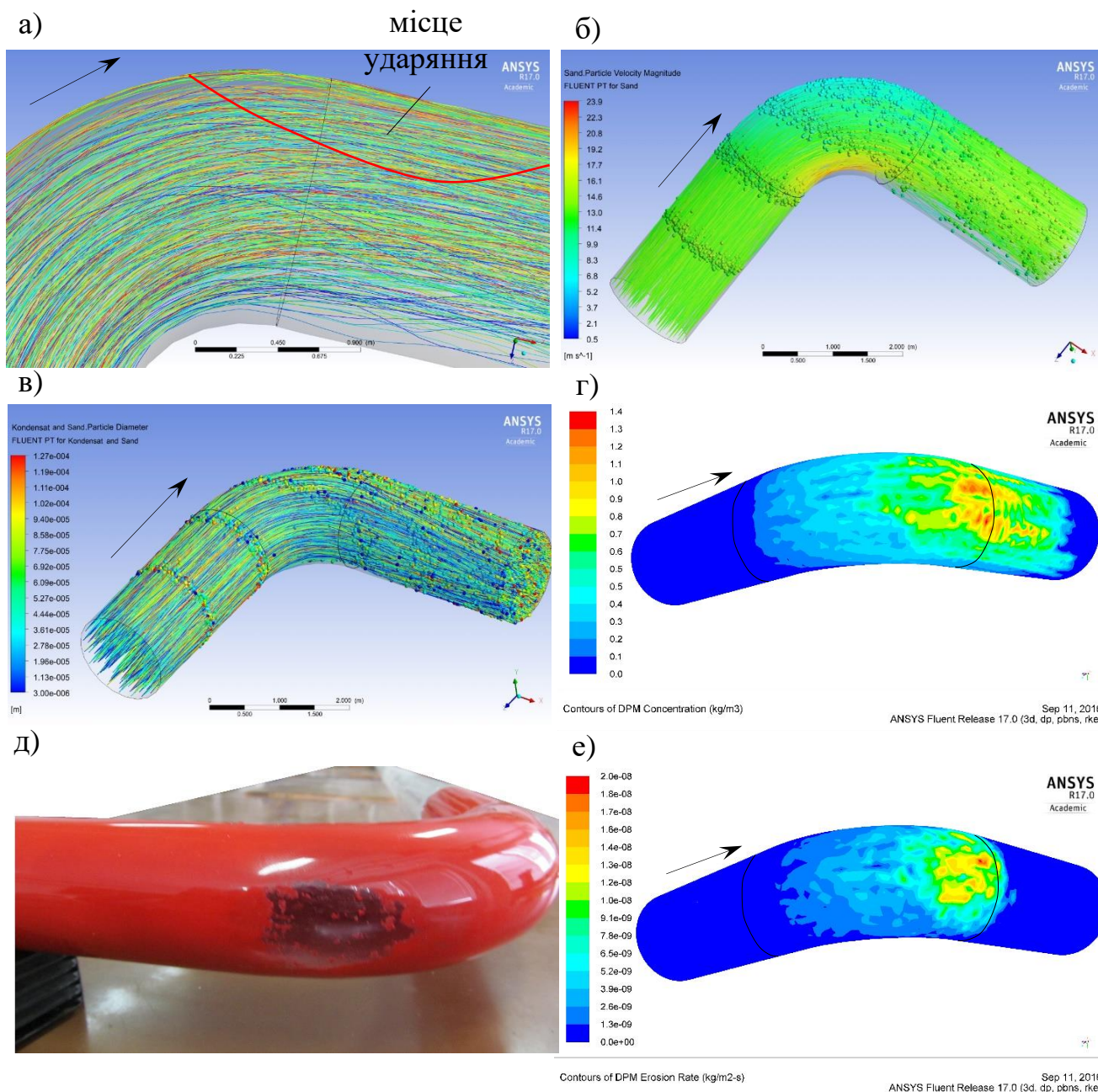
Будемо поєднувати результати дослідження траєкторій руху дисперсних

частинок фасонними елементами трубопроводів (підрозділ 3.3.2) із результатами моделювань (підрозділ 4.1) та результатами експериментальних досліджень ерозійного зношування фасонних елементів трубопроводів (підрозділ 4.2).

Розглянемо відвід із кутом вигину  $90^\circ$ . Поєднаємо результати моделювання руху дисперсних фаз відводом (рисунок 3.12) з результатами моделювання ерозійного зношування відводу (рисунок 4.2) та з результатами експериментальних досліджень його ерозійного зношування (рисунок 4.19, а). Поєднані результати наведені на рисунку Б.2.

Із полів ерозійного зношування на контурах відводу (рисунок Б.2, е) та експериментальних досліджень (рисунок Б.2, д) видно, що найінтенсивніше ерозійне зношування відбувається з опуклого боку відводу в місці виходу з нього газового потоку між кутом  $60^\circ$  і  $90^\circ$  відводу та на початку привареної до відводу труби на довжину 0,1 м у напрямку руху продукту. Як видно з результатів моделювання (рисунок Б.2, а, г) саме в цьому місці відбувається найінтенсивніше ударяння дисперсних фаз до стінки. Аналізуючи результати моделювання руху дисперсних фаз відводом видно, що саме в кінці відводу з опуклого боку кут атаки складає біля  $40^\circ$  і далі за напрямком руху продукту він поступово зменшується (рисунок Б.2, а). На віддалі 0,1 м від зварного шва в напрямку руху продукту привареною до відводу трубою кут атаки уже складає біля  $20^\circ$  і далі зменшується (рисунок Б.2, а). Оскільки, як було наведено вище, для пластичних матеріалів максимальна величина ерозійного зношування спостерігається при кутах атаки від  $20^\circ$  до  $40^\circ$ , то це пояснює місцезнаходження найінтенсивнішого ерозійного зношування відводу (рисунок Б.2, е), хоч місце інтенсивного ударяння дисперсних фаз до стінки прилеглої до відводу труби простягається ще на довжину 1,5 м від кільцевого зварного шва в сторону руху продукту (рисунок Б.2, г).

Швидкість дисперсної фази в місці найінтенсивнішого ерозійного зношування з опуклого боку відводу значно знижується до 8,5 м/с (рисунок Б.2, б), що є позитивним і призводить до зменшення величини ерозійного зношування



а) – траєкторії руху дисперсних фаз; б) – траєкторії руху дисперсних фаз забарвлені в кольори, що відповідають швидкості; в) – траєкторії руху дисперсних фаз забарвлені в кольори, що відповідають діаметру крапель і частинок; г) – поля концентрації дисперсних фаз на контурах; д) – результати експериментальних досліджень ерозійного зношування відводу; е) – поля швидкості ерозійного зношування на контурах

**Рисунок Б.2** – Результати моделювання та експериментальних досліджень руху дисперсних фаз та ерозійного зношування відводу кутом вигину 90°

і збільшення залишкового ресурсу відводів. На початку привареної до відводу



труби в місці інтенсивного ударяння дисперсна фаза пришвидшується до 14 м/с, але інтенсивного ерозійного зношування тут не відбувається, що свідчить про те, що при малих кутах атаки (менше  $20^\circ$ ) збільшення швидкості дисперсної фази на величину ерозійного зношування сильно не впливає.

Також на величину ерозійного зношування відводу чинить вплив нерівномірний перерозподіл дисперсних фаз за діаметром (рисунок Б.2, в). Більша частина дисперсних фаз, які мають більші діаметри рухаються з опуклого боку відводу і частина з них ударяється в стінку відводу і привареної до відводу труби, що впливає на величину ерозійного зношування. Оскільки, як було сказано вище, чим більша маса частинок, тим більша їх кінетична енергія і, відповідно, більша енергія ударяння та більше ерозійне зношування то такий перерозподіл дисперсних фаз за діаметром у відводі призводить до збільшення величини його ерозійного зношування.

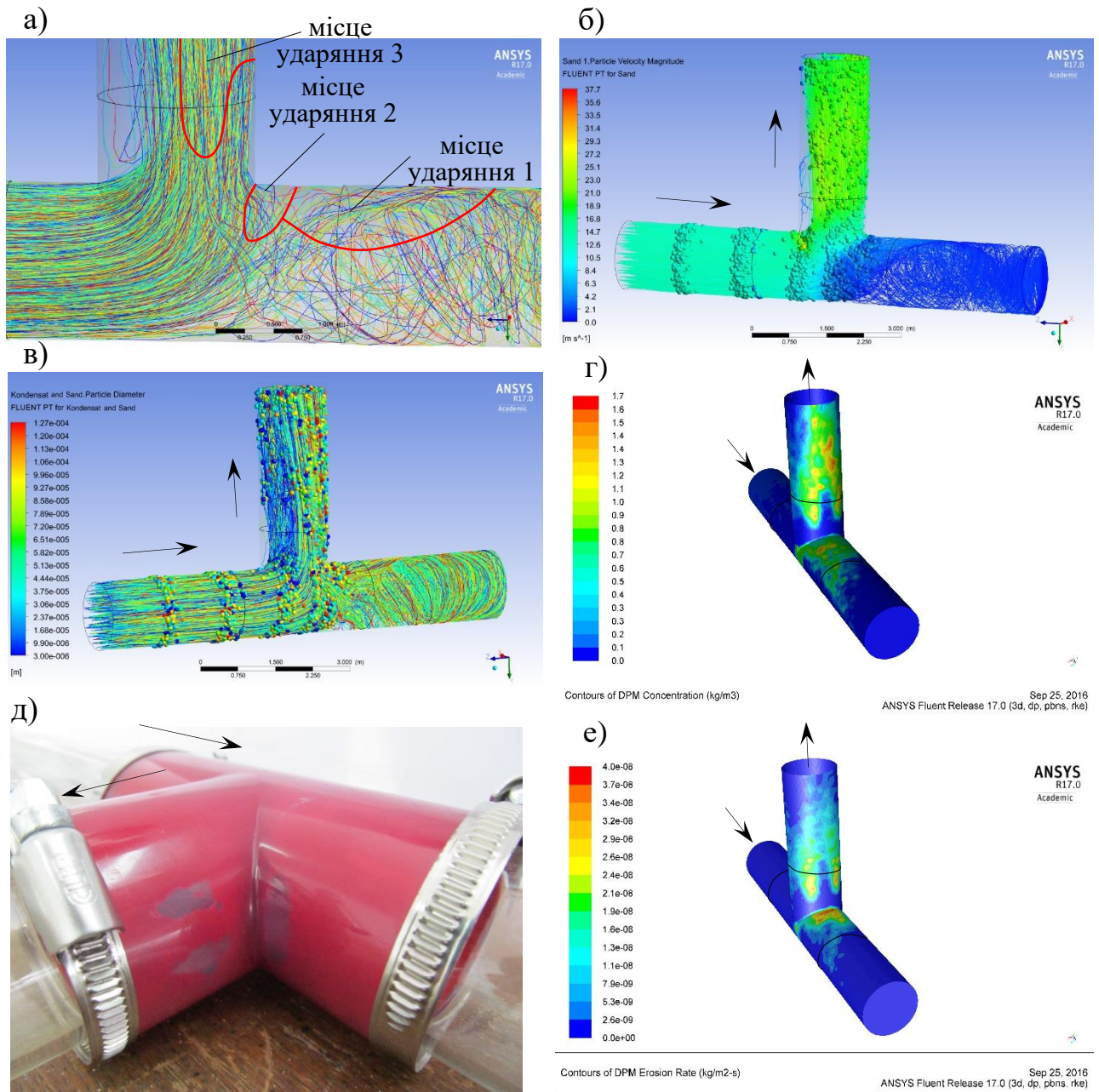
Розглянемо трійник у якому потік із магістралі трійника повністю перетікає у відгалуження трійника.

Поєднаємо результати моделювання руху дисперсної фази цим трійником (рисунок 3.14) з результатами моделювання його ерозійного зношування (рисунок 4.3) та результатами експериментальних досліджень його ерозійного зношування (рисунок 4.19, в). Поєднані результати наведені на рисунку Б.3.

З полів ерозійного зношування на контурах трійника (рисунок Б.3, е) видно, що ерозійне зношування трійника відбувається у двох місця:

- у верхній частині магістралі трійника з правої сторони відгалуження трійника;
- із правого боку відгалуження трійника і з правого боку прилеглої до відгалуження труби.

Місце ерозійного зношування простягається починаючи від середини відгалуження трійника і на довжину 1,5 м від кільцевого зварного шва в сторону руху продукту прилеглою до відгалуження трійника трубою.



а) – траєкторії руху дисперсних фаз; б) – траєкторії руху дисперсних фаз забарвлені в кольори, що відповідають швидкості; в) – траєкторії руху дисперсних фаз забарвлені в кольори, що відповідають діаметру крапель і частинок; г) – поля концентрації дисперсних фаз на контурах; д) – результати експериментальних досліджень ерозійного зношування трійника; е) – поля швидкості ерозійного зношування на контурах

**Рисунок Б.3** – Результати моделювання та експериментальних досліджень руху дисперсних фаз та ерозійного зношування трійника в якому потік із магістралі повністю перетікає у відгалуження трійника

Як видно з результатів моделювання (рисунок Б.3, а, г) та експериментальних

досліджень (рисунок Б.3, д) саме в цих двох місцях відбувається найінтенсивніше ударяння дисперсних фаз до стінки. Аналізуючи результати моделювання руху дисперсних фаз трійником видно, що у місці ударяння 2 (рисунок Б.3, а) траєкторії руху дисперсних фаз різко заокруглюються у сторону відгалуження трійника і кут атаки в цьому місці складає біля  $30^\circ$  при якому ерозійне зношування пластичних матеріалів є максимальним (рисунок Б.1), що пояснює чому у місці ударяння 2 (рисунок Б.3, а) величина ерозійного зношування трійника є найбільшою (рисунок Б.3, е).

У місці ударяння 1 (рисунок Б.3, а) на віддалі 0,4 м від відгалуження трійника (найближча до відгалуження трійника точка місця ударяння 1) кут атаки складає біля  $50^\circ$  і далі в праву сторону від відгалуження трійника він поступово зменшується. Тому за місцем ударяння 2 (рисунок Б.3, а) в праву сторону від відгалуження трійника інтенсивність ерозійного зношування дещо зменшується (рисунок Б.3, е), далі в праву сторону від відгалуження трійника відбувається незначне збільшення інтенсивності ерозійного зношування, коли кут атаки складає біля  $30^\circ$ , і далі з зменшенням кута атаки менше  $20^\circ$  різко зменшується інтенсивність ерозійного зношування.

Швидкість дисперсних фаз у верхній частині магістралі трійника з правої сторони відгалуження в місці найінтенсивнішого ерозійного зношування складає 16 м/с і в міру віддалення від відгалуження трійника магістраллю знижується до 5 м/с. Таке зниження швидкості дисперсних фаз є позитивним і призводить до зменшення величини ерозійного зношування і збільшення залишкового ресурсу трійників.

У відгалуженні трійника кут атаки в місці ударяння дисперсної фази до стінки відгалуження трійника та привареної до відгалуження труби не перевищує  $20^\circ$  (місце ударяння 3 рисунок Б.3, а). Чим далі від магістралі трійника і чим більше відтіснення основного потоку (основний потік на початку відгалуження трійника відтісняється потоком, дугоподібні траєкторії руху дисперсних фаз в якому, за рахунок сил інерції, виходять за межі проекції (уявного продовження) відгалуження трійника в внутрішню порожнину його магістралі (рисунок Б.3, а) і

біля верхньої частини магістралі трійника з правої сторони відгалуження різко заокруглюються в сторону відгалуження трійника), тим кут атаки є меншим. Причому максимальне відтіснення відбувається біля твірної відгалуження трійника розміщеної з правого його боку. Тому в місці цієї твірної відгалуження місце ерозійного зношування віддалене на віддаль більше 0,5 м від зварного шва в сторону руху продукту відгалуженням і величина ерозійного зношування стінки труби є невеликою (рисунок Б.3, е) хоча швидкість руху дисперсних фаз (рисунок Б.3, б) і концентрації дисперсних фаз на контурах в цьому місці (рисунок Б.3, г) є найбільшими в трійнику.

Із правої і лівої сторони від твірної відгалуження трійника розміщеної з правого боку відгалуження місце ерозійного зношування витягнуто в сторону магістралі трійника аж до середини відгалуження (рисунок Б.3, е). Таке витягнення місця ерозійного зношування спостерігається тому, що в цих місцях відтіснення основного потоку є найменшим. Також ці місця розміщені найближче до магістралі трійника і кут атаки тут є біля  $20^\circ$  (рисунок Б.3, а). Тому і величина ерозійного зношування в цих місцях є більшою (рисунок Б.3, е). Швидкість дисперсних фаз в місці ударяння 3 є великою і складає біля 21 м/с (рисунок Б.3, б).

Також на величину ерозійного зношування трійника чинить вплив нерівномірний перерозподіл дисперсних фаз за діаметром (рисунок Б.3, в). Більша частина дисперсних фаз, які мають більші діаметри у відгалуженні трійника рухаються з правого його боку і частина з них ударяється до стінки відгалуження трійника і до стінки привареної до відгалуження труби, що призводить до ерозійного зношування. Дисперсні фази меншого діаметра рухаються з протилежної сторони потоку і більша їх частина міститься в завихреному у відгалуженні рівнопрохідного трійника потоці газу.

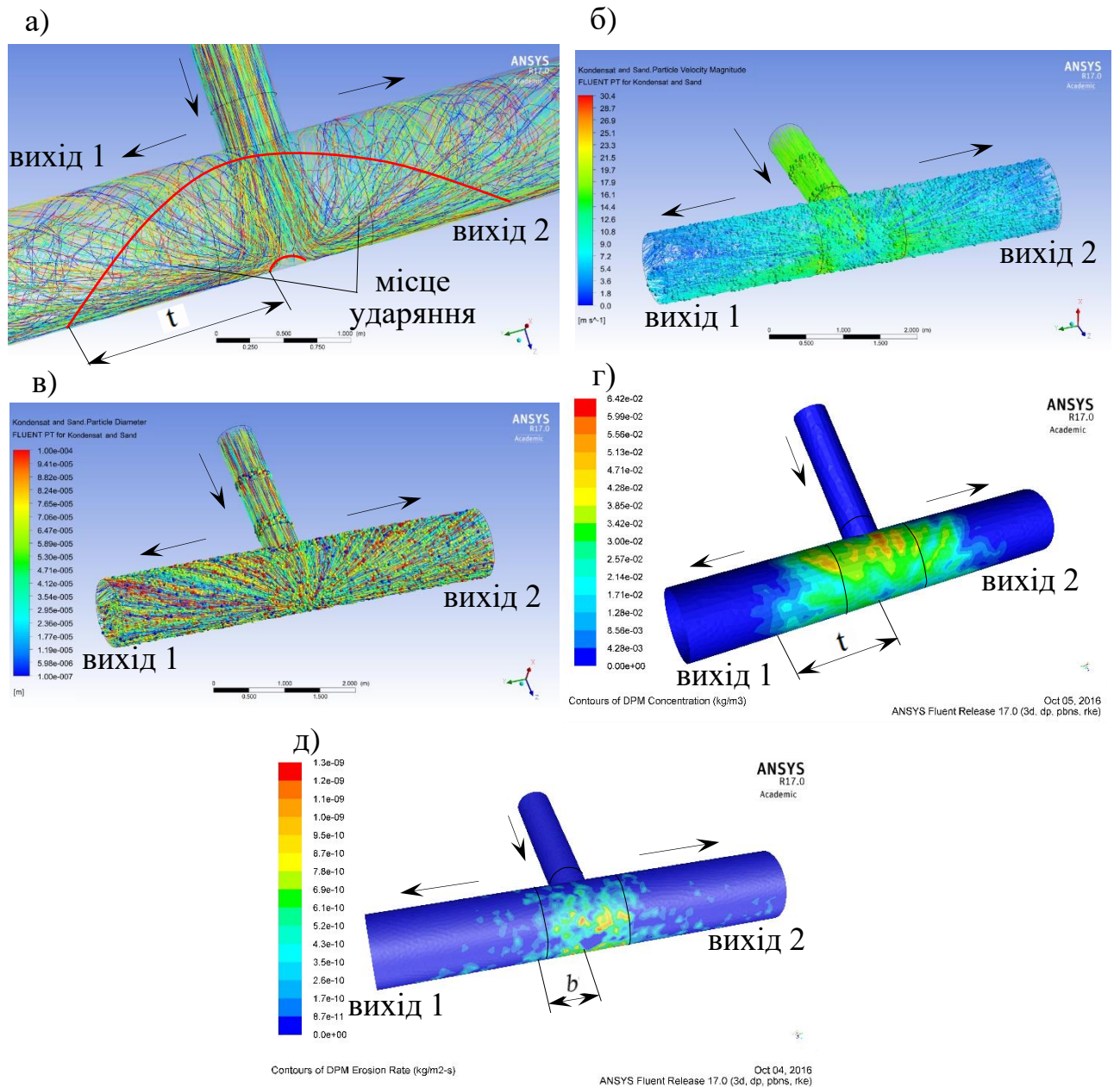
Розглянемо трійник у якому потік із відгалуження розходиться у дві сторони магістралі трійника.

Поєднаємо результати моделювання руху дисперсної фази цим трійником (рисунок 3.15) з результатами моделювання його ерозійного зношування (рисунок 4.4). Поєднані результати наведені на рисунку Б.4.

Із полів ерозійного зношування на контурах трійника (рисунок Б.4, д) видно, що ерозійне зношування трійника відбувається в його магістралі з боку протилежного відгалуженню трійника і має форму кільця викривленого внутрішньою поверхнею магістралі трійника. Ширина кільця складає  $b=1,5$  м, а діаметр внутрішнього кола кільця наближено рівний діаметру відгалуженню трійника.

Як видно з результатів моделювання (рисунок Б.4, а, г) місце ударяння дисперсних фаз до стінки магістралі трійника також має форму кільця викривленого внутрішньою поверхнею магістралі трійника тільки відмінністю є те, що ширина цього кільця є більшою. Аналізуючи результати моделювання руху дисперсних фаз трійником видно, що максимальний кут атаки в місці ударяння спостерігається біля внутрішнього кола кільця і він складає біля  $50^\circ$  (рисунок Б.4, а) тому і ерозійне зношування біля внутрішнього кола кільця є невеликим (рисунок Б.4, е). У міру віддалення від внутрішнього кола і наближення до зовнішнього кола кільця кут атаки зменшується (рисунок Б.4, а). Так в середній частині кільця ерозійного зношування кут атаки складає біля  $30^\circ$  (рисунок Б.4, а) при якому ерозійне зношування пластичних матеріалів є максимальним (рисунок Б.1). Тому і ерозійне зношування в цьому місці є максимальним (рисунок Б.4, е). Біля зовнішнього кола кільця концентрації дисперсних фаз на контурах (рисунок Б.4, г) кут атаки є менше  $20^\circ$  і тут ерозійне зношування практично не відбувається хоча концентрація дисперсних фаз на контурах тут є біля максимальної (рисунок Б.4, г). Тому ширина кільця ерозійного зношування (рисунок Б.4, е) є меншою ширини кільця концентрації дисперсних фаз на контурах (рисунок Б.4, г).

Швидкість крапель конденсату та твердих частинок у місці ударяння біля внутрішнього кола кільця є мінімальною і складає біля  $2$  м/с, у середній частині кільця збільшується до  $16,5$  м/с, і біля зовнішнього кола кільця складає біля  $10$  м/с



а) – траєкторії руху дисперсних фаз; б) – траєкторії руху дисперсних фаз забарвлені в кольори, що відповідають швидкості; в) – траєкторії руху дисперсних фаз забарвлені в кольори, що відповідають діаметру крапель і частинок; г) – поля концентрації дисперсних фаз на контурах; д) – поля швидкості ерозійного зношування на контурах

**Рисунок Б.4** – Результати моделювання та експериментальних досліджень руху дисперсних фаз та ерозійного зношування трійника, де газ рухається відгалуженням трійника і з відгалуження спрямовується у дві сторони магістралі трійника

(рисунок Б.4, б). Тобто в середній частині кільця крім того що кут атаки складає біля  $30^\circ$  ще і швидкість дисперсних фаз є максимальною, що також є додатковою причиною максимального ерозійного зношування трійника в цьому місці (рисунок Б.4, е).

У трійнику відбувається рівномірний розподіл крапель конденсату і твердих частинок різного діаметра у всій його внутрішній порожнині (рисунок Б.4, б) і збільшення або зменшення інтенсивності ерозійного зношування зумовленого нерівномірним розподілом дисперсних фаз за розміром немає.

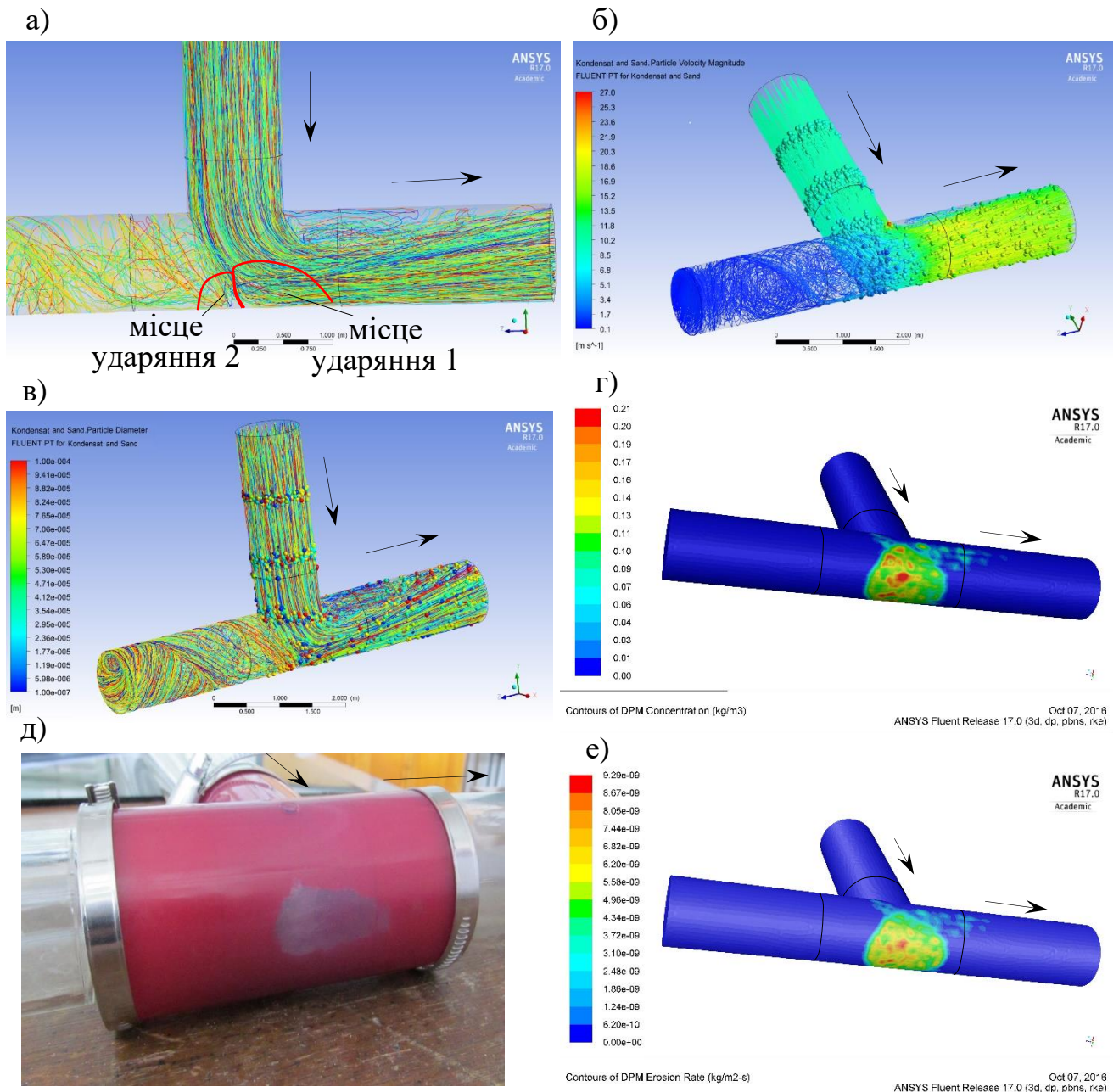
Розглянемо трійник у якому потік із відгалуження повністю перетікає у одну сторону магістралі трійника.

Поєднаємо результати моделювання руху дисперсної фази цим трійником (рисунок 3.16) із результатами моделювання його ерозійного зношування (рисунок 4.5) та з результатами експериментальних досліджень його ерозійного зношування (рисунок 4.19, г). Поєднані результати наведені на рисунку Б.5.

Із полів ерозійного зношування на контурах трійника (рисунок Б.5, е) та експериментальних досліджень (рисунок Б.5, д) видно, що місце найінтенсивнішого ерозійного зношування трійника розміщене в його магістралі навпроти відгалуження трійника. Місце ерозійного зношування має грушоподібну форму. Кругла частина грушоподібного місця ерозійного зношування майже повністю співпадає з проекцією відгалуження трійника на внутрішню стінку його магістралі. Витягнута частина грушоподібного місця ерозійного зношування простягається в сторону руху продукту магістраллю трійника наблизившись до привареної до трійника труби на віддаль 0,3 м.

Максимальна величина ерозійного зношування спостерігається біля місця перетину осі відгалуження трійника з стінкою магістралі трійника.

Як видно з результатів моделювання (рисунок Б.5, а, г, е) та експериментальних досліджень (рисунок Б.5, д) місце найінтенсивнішого ударяння рідких і твердих частинок до стінок трійника розміщене там ж де і місце ерозійного зношування трійника і також має грушоподібну форму таких ж розмірів. Максимальна величина концентрації дисперсних фаз на контурах також



а) – траєкторії руху дисперсних фаз; б) – траєкторії руху дисперсних фаз забарвлені в кольори, що відповідають швидкості; в) – траєкторії руху дисперсних фаз забарвлені в кольори, що відповідають діаметру крапель і частинок; г) – поля концентрації дисперсних фаз на контурах; д) – результати експериментальних досліджень ерозійного зношування трійника; е) – поля швидкості ерозійного зношування на контурах

**Рисунок Б.5** – Результати моделювання та експериментальних досліджень руху дисперсних фаз та ерозійного зношування трійника в якому потік із відгалуження повністю перетікає у одну з сторін магістралі трійника



спостерігається там ж де максимальна величина ерозійного зношування.

Аналізуючи результати моделювання руху дисперсних фаз трійником встановлено, що є два місця ударяння дисперсних фаз до стінки магістралі трійника:

– стінка магістралі трійника навпроти відгалуження розміщена за місцем перетину осі відгалуження трійника з стінкою його магістралі в праву сторону (рисунок Б.5, а, місце ударяння 1). До стінки магістралі трійника ударяються частина дисперсної фази, яка міститься в основному потоці який у свою чергу перетікає у праву сторону магістралі трійника;

– стінка магістралі трійника навпроти відгалуження розміщена за місцем перетину осі відгалуження трійника з стінкою його магістралі в ліву сторону (рисунок Б.5, а, місце ударяння 2). До стінки магістралі трійника ударяються незначна частина дисперсних фаз, яка міститься у потоці, який біля стінки магістралі трійника відривався від основного потоку і дугоподібними траєкторіями перетікає у ліву сторону магістралі трійника.

Кут атаки в місці ударяння 1 неподалік місця перетинання осі відгалуження трійника з стінкою його магістралі є максимальним і складає біля  $30^\circ$  (рисунок Б.5, а). Приблизно таким ж є і кут атаки в місці ударяння 2 неподалік місця перетинання осі відгалуження (рисунок Б.5, а). Тому і максимальна величина ерозійного зношування спостерігається біля місця перетину осі відгалуження трійника з стінкою магістралі трійника (рисунок Б.5, е) оскільки для пластичних матеріалів при куті атаки  $30^\circ$  ерозійне зношування пластичних матеріалів є максимальним (рисунок Б.1), хоча швидкість крапель конденсату та твердих частинок у цьому місці є незначною і складає біля 8 м/с (рисунок Б.5, б).

У міру віддалення від місця перетину осі відгалуження трійника з стінкою його магістралі в праву і ліву сторону кут атаки зменшується (рисунок Б.5, а) відповідно і зменшується величина ерозійного зношування (рисунок Б.5, е). Хоча в праву сторону швидкість крапель конденсату та твердих частинок збільшується і досягає 18,5 м/с у місці закінчення магістралі трійника (рисунок Б.5, б).

Оскільки в праву сторону в міру віддалення від місця перетину осі

відгалуження трійника з стінкою його магістралі швидкість крапель конденсату та твердих частинок збільшується (рисунок Б.5, б), а також у правій стороні міститься витягнута частина грушоподібного місця ударяння дисперсних фаз то і поле ерозійного зношування на контурах трійника (рисунок Б.5, е) витягнуто в праву сторону від місця перетину осі відгалуження трійника з стінкою його магістралі.

Також на величину ерозійного зношування трійника чинить вплив нерівномірний перерозподіл дисперсних фаз за діаметром (рисунок Б.5, в). Більша частина дисперсних фаз, які мають більші діаметри у магістралі трійника рухаються у основному потоці, вздовж стінки навпроти відводу і відбувається ударяння незначної частини дисперсної фази до стінки магістралі трійника в цьому місці, що призводить до її ерозійного зношування. Частина дисперсної фази меншого діаметра закручуються у верхній частині магістралі трійника з правої сторони відгалуження. Такий перерозподіл дисперсних фаз за діаметром у відгалуженні призводить до збільшення величини його ерозійного зношування.

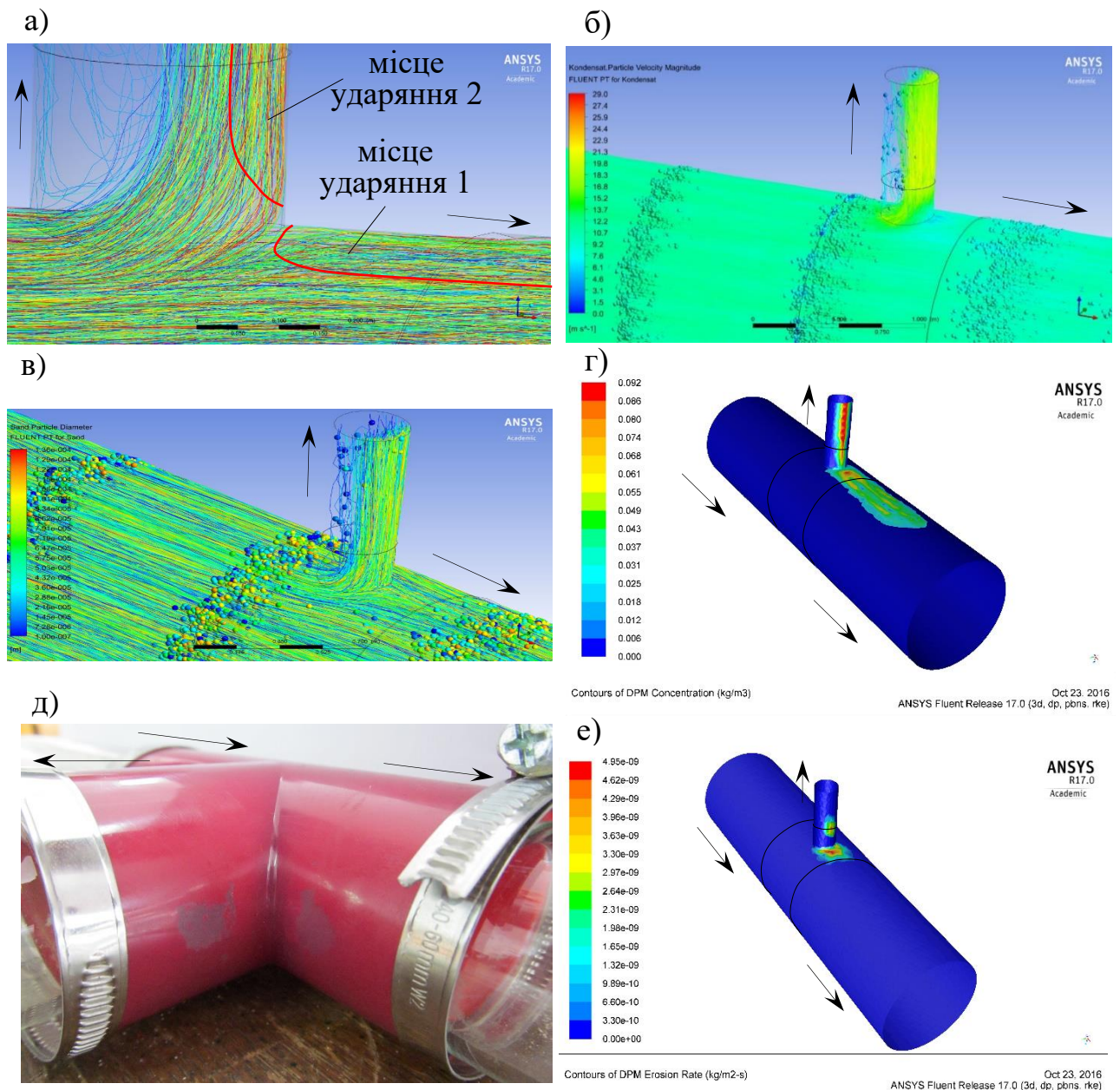
Розглянемо трійник у якому потік рухається магістраллю трійника і з магістралі частина потоку перетікає у відгалуження трійника.

Поєднаємо результати моделювання руху дисперсної фази цим трійником (рисунок 3.17) з результатами моделювання його ерозійного зношування (рисунок 4.6) та з результатами експериментальних досліджень його ерозійного зношування (рисунок 4.19, б). Поєднані результати наведені на рисунку Б.6.

З полів ерозійного зношування на контурах трійника (рисунок Б.6, е) та результатів експериментальних досліджень його ерозійного зношування (рисунок Б.6, д) видно, що ерозійне зношування трійника відбувається у двох місця:

– у магістралі трійника. Місце ерозійного зношування простягається усією розміщеною з правої сторони відгалуження трійника верхньою частиною магістралі трійника. Максимальне ерозійне зношування знаходиться на віддалі біля 0,07 м від відгалуження;

– у відгалуженні трійника. Місце ерозійного зношування розміщене з правого боку відгалуження і має форму овалу центр якого розміщений в місці кільцевого зварного шва. Овалоподібне місце ерозійного зношування віддалене від



а) – траєкторії руху дисперсних фаз; б) – траєкторії руху дисперсних фаз забарвлені в кольори, що відповідають швидкості; в) – траєкторії руху дисперсних фаз забарвлені в кольори, що відповідають діаметру крапель і частинок; г) – поля концентрації дисперсних фаз на контурах; д) – результати експериментальних досліджень ерозійного зношування трийника; е) – поля швидкості ерозійного зношування на контурах

**Рисунок Б.6** – Результати моделювання та експериментальних досліджень руху дисперсних фаз та ерозійного зношування трийника в якому частина потоку з магістралі перетікає у відгалуження трийника

магістралі трійника на віддаль 0,09 м. Місце максимального ерозійного зношування знаходиться в центрі овалоподібного місця ерозійного зношування.

Як видно з результатів моделювання (рисунок Б.6, а, г, е) та експериментальних досліджень (рисунок Б.6, д) у магістралі трійника інтенсивне ударяння рідких і твердих частинок до стінки відбувається в верхній її частині з правої сторони відгалуження трійника (співпадає з місцем ерозійного зношування магістралі трійника). Місце найінтенсивнішого ударяння дисперсної фази також співпадає з місцем максимального ерозійного зношування. Крім того дисперсна фаза ударяється до стінки прилеглої до магістралі трійника труби в верхній її частині на довжину більше 1,5 м від кільцевого зварного шва в сторону руху продукту магістраллю.

Аналізуючи результати моделювання руху дисперсних фаз трійником видно, що у магістралі трійника у місці ударяння 1 (рисунок Б.6, а) максимальний кут атаки спостерігається біля відгалуження трійника і він складає біля  $40^\circ$ . У міру віддалення від відгалуження трійника в праву сторону кут атаки зменшується. Так на віддалі 0,07 м від відгалуження трійника він складає  $30^\circ$  (рисунок Б.6, а) при якому ерозійне зношування пластичних матеріалів є максимальним (рисунок Б.1), що пояснює чому у цьому місці відбувається максимальне ерозійне зношування стінки магістралі трійника (рисунок Б.6, е). Далі, в сторону руху продукту магістраллю, за кільцевим зварним швом кут атаки є меншим  $20^\circ$  (рисунок Б.6, а) і тому ерозійного зношування прилеглої до магістралі трійника труби практично не відбувається (рисунок Б.6, е).

Швидкість дисперсних фаз в місці ударяння 1 складає від 5 м/с до 9 м/с (в міру віддалення магістраллю трійника від відгалуження збільшується) (рисунок Б.6, б). Біля відгалуження трійника швидкість дисперсних фаз є мінімальною, що дещо зменшує величину максимального ерозійного зношування.

Як видно з результатів моделювання (рисунок Б.6, а, г) у відгалуженні трійника місце ударяння дисперсних фаз розміщене з правого боку відгалуження і простягається від початку відгалуження трійника і на довжину більше 1 м прилеглою до відгалуження трійника трубою. Найінтенсивніше ударяння

дисперсної фази відбувається біля твірної прилеглої до відгалуження трійника труби розміщеної з правого її боку.

Аналізуючи результати моделювання руху дисперсних фаз трійником видно, що у відгалуженні трійника у місці ударяння 2 (рисунок Б.6, а) кут атаки на початку відгалуження є максимальним і складає біля  $45^\circ$ . Далі відгалуженням і привареною до нього трубою кут атаки зменшується. На віддалі 0,09 м від магістралі трійника, де починається овалоподібне місце ерозійного зношування відгалуження трійника, він складає біля  $40^\circ$ . У місці кільцевого зварного шва кут атаки складає біля  $30^\circ$  при якому ерозійне зношування пластичних матеріалів є максимальним (рисунок Б.1), що пояснює чому у цьому місці відбувається максимальне ерозійне зношування стінки відгалуження трійника (рисунок Б.6, е). Далі, в сторону руху продукту відгалуженням, за кільцевим зварним швом кут атаки зменшується (рисунок Б.6, а) і тому інтенсивність ерозійного зношування зменшується, хоча в міру віддалення від початку відгалуження швидкість дисперсних фаз збільшується та досягає максимального значення 20 м/с на початку привареної до відгалуження труби (рисунок Б.6, б).

Також на величину ерозійного зношування відгалуження трійника чинить вплив нерівномірний перерозподіл дисперсних фаз за діаметром (рисунок Б.6, в). Більша частина крапель конденсату і твердих частинок, які мають більші діаметри, у відгалуженні трійника рухаються з правої його сторони і частина з них ударяється в стінку відгалуження і привареної до нього труби, що призводить до збільшення інтенсивності ерозійного зношування. Дисперсні фази меншого діаметра рухаються з протилежної сторони потоку та містяться в завихреному у відгалуженні трійника потоці газу.

## **ДОДАТОК В**

### **УЗГОДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ МОДЕЛЮВАННЯ ЕРОЗІЙНОГО ЗНОШУВАННЯ ФАСОННИХ ЕЛЕМЕНТІВ ГАЗОПРОВОДІВ ІЗ ЧИННИМИ НОРМАМИ**

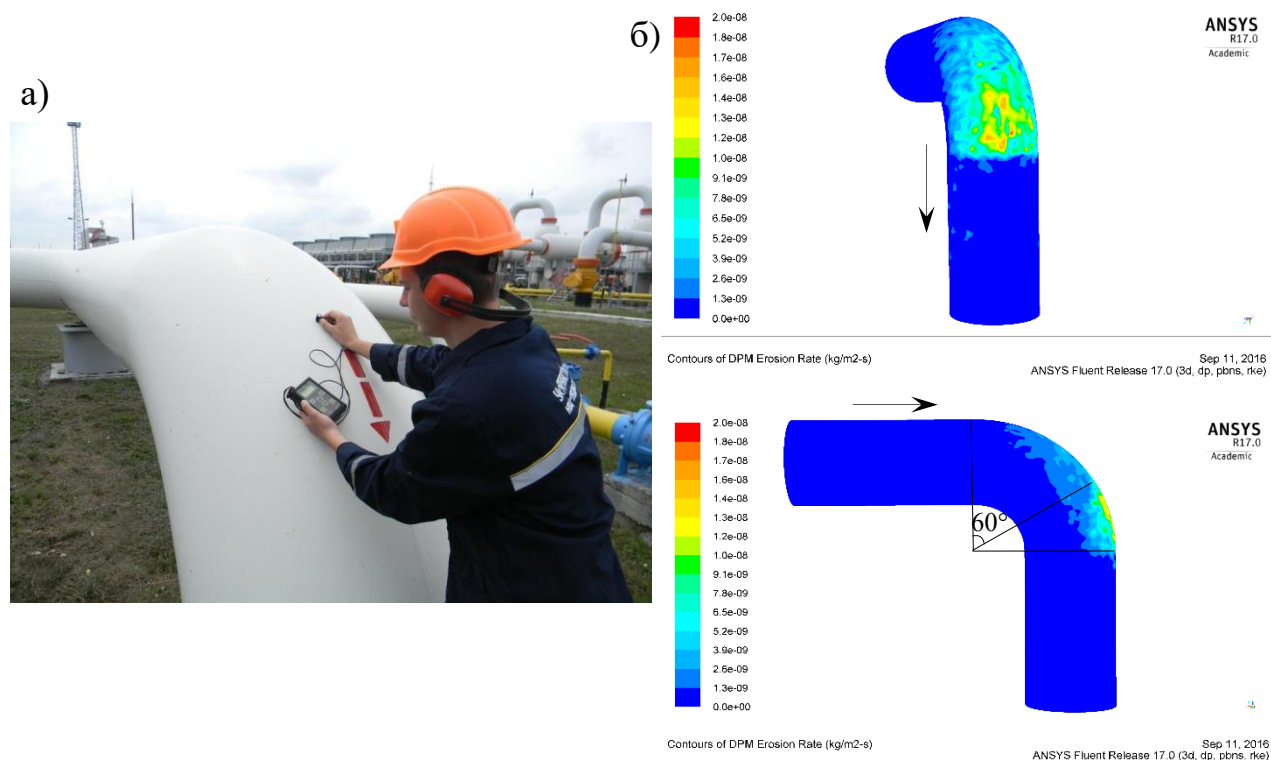
Ерозійне зношування є одним із чинників, який зменшує залишковий ресурс трубопроводів. Якщо фасонні елементи трубопроводів не контролювати належним чином, то ерозійне зношування може призвести до витоків, розривів трубопроводу і втрат продукту.

Інформацію про ерозійне зношування фасонних елементів лінійної частини газопроводів отримують їх зовнішнім обстеженням ультразвуковими дефектоскопами. Місця обстежень фасонних елементів лінійної частини газопроводів на ерозійне зношування не передбачені жодним українським нормативним документом, і працівники, які виконують обстеження, визначають їх на основі нічим не обґрунтованих логічних міркувань, набутого досвіду. Все це не завжди дає змогу точно виявити місця максимального ерозійного зношування, що є не менш важливим, ніж точне визначення величини ерозійного зношування. Доволі часто вимірювання виконують зовсім не в тих місцях (рисунок В.1, а), які були визначені моделюванням (рисунок В.1, б).

У чинному регламенті АТ Укртрансгаз з технічного обслуговування лінійної частини СТП 320.30019801.099 [23] зазначено, що однією з задач обстеження лінійної частини магістральних газопроводів є виявлення ерозійних пошкоджень труб. Контроль товщини стінки газопроводу на крутозагнутих "колінах" (секторні зварні відводи, гнуті відводи, перехідні трійники) виконувати з періодичністю 1 раз на рік. Місця, де виконувати обстеження кожного з фасонних елементів лінійної частини магістральних газопроводів на ерозійне зношування не вказано в цьому регламенті.

У чинному регламенті АТ Укртрансгаз із технічного обслуговування переходів СТП 320.30019801.069 [24] зазначено, що однією із задач обстеження переходів магістральних газопроводів є виявлення ерозійних пошкоджень труб.

Контроль товщини стінки газопроводу (у тому числі компенсаторів) на переході виконувати згідно з вимогами СТП 320.30019801.063 [25].



**Рисунок В.1** – Дослідження ерозійного зношування відводів

Стандарт підприємства СТП 320.30019801.063 [25] встановлює загальні технічні вимоги до робіт з ультразвукової товщинометрії стінок та ультразвукового контролю основного металу труб, відводів, трійників магістральних газопроводів. У стандарті зазначено, що ультразвуковій товщинометрії підлягають відводи, трійники надземних, технологічних газопроводів обв'язки обладнання. Контроль товщини стінки фасонних елементів згідно стандарту треба виконувати з періодичністю 1 раз на рік.

Згідно з СТП 320.30019801.063 [25] ультразвуковому контролю підлягає поверхня:

– відвід:

а) поверхня зовнішньої твірної з наступними розмірами: довжина ділянки дорівнює довжині зовнішньої твірної, а ширина – відстані між бічними твірними

відводу;

б) ділянка на поверхні внутрішньої твірної розміром  $100 \times 100$  мм;

– трійник – поверхня, що знаходиться під впливом зміни напрямку руху газу.

Згідно з цим положенням з опуклого боку відводу треба контролювати всю половину відводу від входу потоку в відвід до виходу з відводу. В той час як з полів ерозійного зношування на контурах відводу (рисунок 4.2, в, г) видно, що найінтенсивніше ерозійне зношування відводу відбувається з опуклого його боку в місці виходу з нього потоку газу між кутом  $60^\circ$  і  $90^\circ$  відводу. У місці входу потоку газу у відвід між кутом  $0^\circ$  і  $60^\circ$  з опуклого боку ерозійного зношування відводу практично не відбувається і не має змісту тут вимірювати товщину стінки відводу.

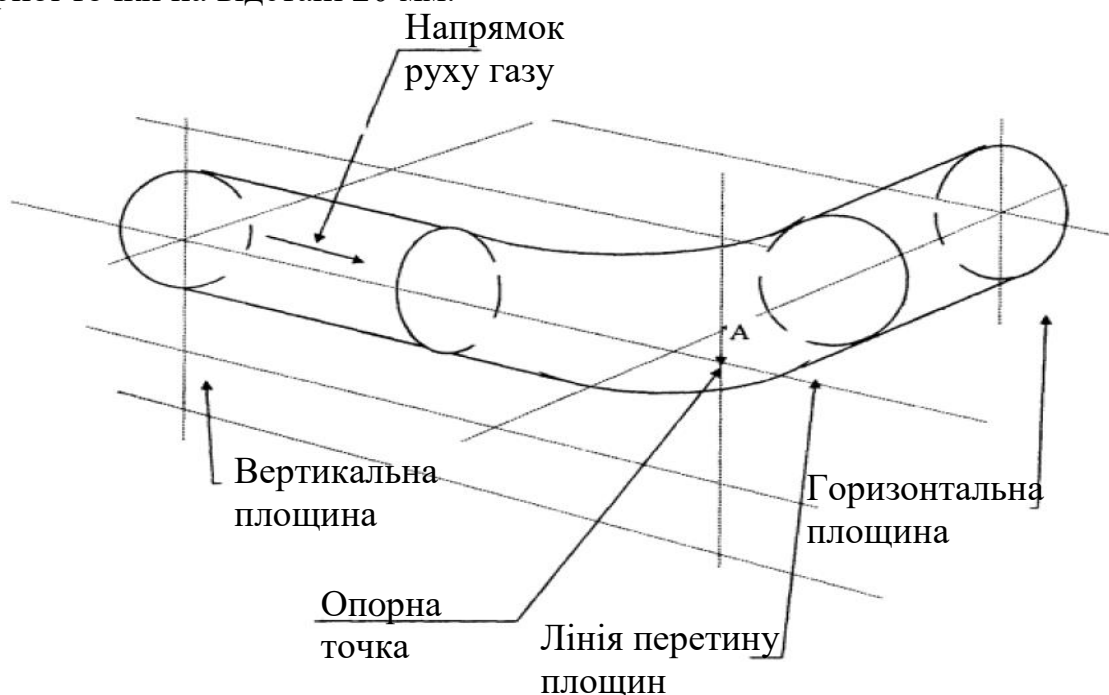
Місцезнаходження ділянки на поверхні внутрішньої твірної відводу розміром  $100 \times 100$  мм, яке зазначене в стандарті, чітко не зрозуміле. До того ж не зрозуміло для чого вимірювати товщину стінки відводу з вгнутого боку, якщо з полів ерозійного зношування на контурах відводу видно, що ерозійного зношування з вгнутого боку відводу не відбувається, не відбувається ударяння дисперсних фаз у стінку фасонного елемента (рисунок 4.2, б).

Місця ультразвукового контролю трійників стандартом СТП 320.30019801.063 [25] не визначаються. Зазначено, що треба контролювати поверхню, яка знаходиться під впливом зміни напрямку руху газу. Як визначити місцезнаходження цих поверхонь не зазначено.

У чинному регламенті ПАТ Укртрансгаз з обстеження обладнання компресорних станцій магістральних газопроводів СТП 320.30019801.056 [26] зазначено, що під час діагностування трубопроводів обов'язки технологічного обладнання компресорних станцій треба виконувати товщинометрію стінок трубопроводів на згинах та трійниках. Роботи треба виконувати згідно з затвердженою ще в 1983 році інструкцією [27]. Згідно з цією інструкцією контролювання товщини стінки відводів газопроводів повинно виконуватись регулярно з періодичністю, яка визначається швидкістю ерозійного зношування стінки труби, але не рідше одного разу на рік. Для вимірювання товщини стінки треба вибрати ділянку на опуклому боці відводу, для чого знаходиться опорна



точка в місці перетинання стінки відводу з лінією, утвореною перетинанням горизонтальною і вертикальною площинами, які проходять через вісь трубопроводу (рисунок В.2). Контрольоване місце на відводі є колом з радіусом 20 мм і центром в опорній точці. Визначення зони максимального зносу стінки відводу виконується шляхом порівняння результатів вимірювань в опорній точці і чотирьох точках, розташованих попарно зліва – справа і зверху – знизу щодо опорної точки на відстані 20 мм.

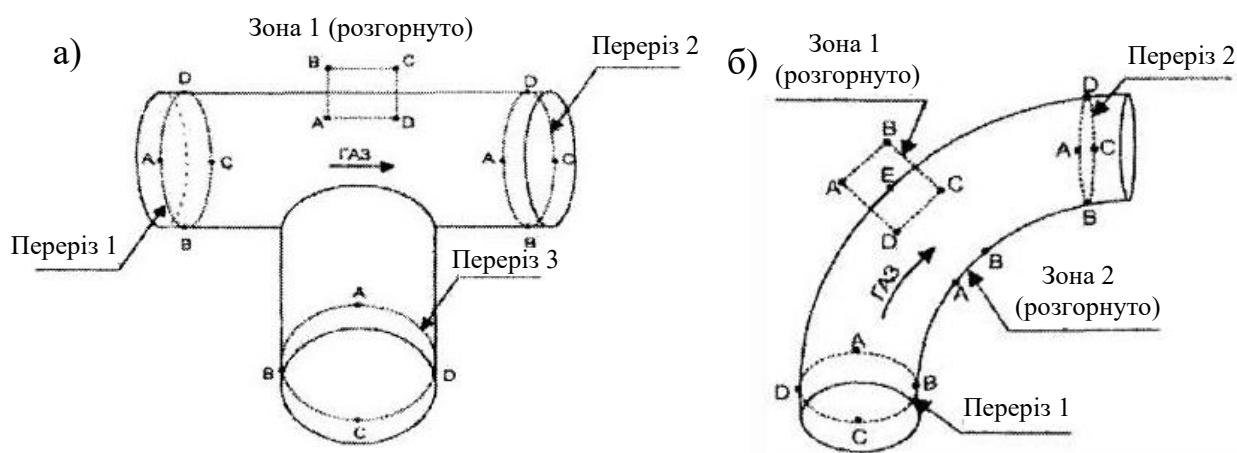


**Рисунок В.2** – Місця контролювання товщини стінки відводу

Співставленням місцезнаходження опорної точки А (рисунок В.2) з результатами моделювання ерозійного зношування (рисунок 4.2, в, г) видно, що опорна точка знаходиться далеко за межами виявленого місця інтенсивного ерозійного зношування, яке знаходиться з опуклого боку відводу в місці виходу з нього газового потоку.

У Росії з нормативних документів, які встановлюють вимоги до обстеження фасонних елементів газопроводів на предмет ерозійного зношування, крім розглянутої вище інструкції [27] ще чинна методика ВАТ Газпрому [28] згідно з якою вимірювання товщини стінки фасонних елементів газорозподільних станцій повинно виконуватись в біляшовних зонах, а також в середніх їх частинах між зварними з'єднаннями згідно з картами наведеними на рисунку В.3. У разі

виявлення в будь-якій точці вимірювання значного відхилення фактичної товщини від розрахункової треба виконувати вимірювання навколо цієї точки з метою визначення конфігурації і розмірів зони зменшення товщини.



а) – трійник; б) – відвід; А, В, С, D – точки вимірювання товщини стінки

**Рисунок В.3** – Карти контролю товщини стінки фасонних елементів газорозподільних станцій

Як бачимо, для побудови даних карт аналіз руху багатофазних потоків фасонними елементами не виконувався. У трійнику розглядався тільки рух газу магістраллю. Для чого вимірювати товщину стінки в зоні 1 трійника (рисунок В.3, а) не зрозуміло. У відводі з місцезнаходженням найінтенсивнішого ерозійного зношування визначеного з результатів моделювання (рисунок 4.2, в, г) співпадає тільки точка D перерізу 2 (рисунок В.3, б), яка була зазначена тільки тому, що вона знаходиться біля зварного шва.

Аналіз чинних нормативних документів показує, що не існує єдиних логічно обґрунтованих, визначених нормами, місць обстеження елементів трубопровідних систем складної геометричної форми на ерозійне зношування. Такі місця під час розроблення цих нормативних документів не визначались шляхом детального дослідження руху багатофазних потоків фасонними елементами трубопроводів тому більшість з них не відповідають отриманим моделюванням результатам. Є випадки, коли місця обстежень одних і тих ж фасонних елементів є різними в різних нормативних документах, що ускладнює їх обстеження.

Для якісного та обґрунтованого обстеження фасонних елементів трубопроводів у тому числі на ерозійне зношування, оцінювання їх міцності, визначення періодичності обстеження, прогнозування їх стану розроблену комплексну галузеву методику технічного діагностування, розрахунку міцності фасонних елементів трубопровідних систем. яка впроваджена в Науково-виробничому центрі технічної діагностики “Техдіагаз” АТ “Укртрансгаз” НАК “Нафтогаз України” (додаток Г).

**ДОДАТОК Г**  
**ДОКУМЕНТИ ПРО ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ**  
**РОБОТИ**

**НАЦІОНАЛЬНА АКЦІОНЕРНА КОМПАНІЯ**  
**“НАФТОГАЗ УКРАЇНИ”**  
**АТ "УКРТРАНСГАЗ"**  
**НАУКОВО-ВИРОБНИЧИЙ ЦЕНТР ТЕХНІЧНОЇ ДІАГНОСТИКИ**  
**"ТЕХДІАГАЗ"**

**ІВАНО-ФРАНКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**  
**НАФТИ І ГАЗУ**

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

В.о. директора

НВЦ ТД "Техдіагаз"

  
  
**Р. М. Бабельський**  
" 27 " \_\_\_\_\_ 2020

**ПОГОДЖЕНО**

Проректор з наукової роботи

ІФНТУНГ, д.т.н., проф.

  
  
**І. І. Чудик**  
" 27 " \_\_\_\_\_ 2020

**ГАЛУЗЕВА МЕТОДИКА**

**ТЕХНІЧНЕ ДІАГНОСТУВАННЯ, РОЗРАХУНОК МІЦНОСТІ**  
**ФАСОННИХ ЕЛЕМЕНТІВ ТРУБОПРОВІДНИХ СИСТЕМ**

Івано-Франківськ – 2020

## МЕТОДИКУ РОЗРОБИЛИ

Науковий керівник:


докт. техн. наук,  
проф. ІФНТУНГ



В. Я. Грудз

Відповідальні виконавці:

канд. техн. наук,  
доц. ІФНТУНГ



Я. В. Дорошенко

канд. техн. наук,  
доц. ІФНТУНГ



В. Б. Запукхляк

ТОВАРИСТВО З ОБМЕЖЕНОЮ ВІДПОВІДАЛЬНІСТЮ  
“ЕКСПРЕС-ГАЗБУД”

ІВАНО-ФРАНКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ  
УНІВЕРСИТЕТ НАФТИ І ГАЗУ

ПОГОДЖЕНО

Проректор з наукової роботи  
ІФНТУНГ, д.т.н., проф.



І. Чудик  
2020 р

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор

ТОВ “ЕКСПРЕС-ГАЗБУД”



М. Голяк  
2020 р

## МЕТОДИКА ТА РОЗРАХУНОК

### НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ БАЛКОВИХ СИСТЕМ НАДЗЕМНИХ ПЕРЕХОДІВ

Івано-Франківськ  
2020

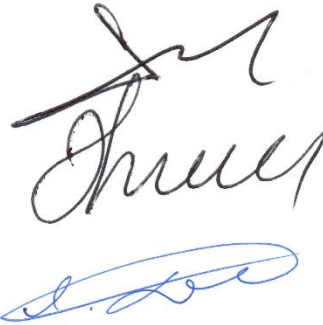
## МЕТОДИКУ РОЗРОБИЛИ

Науковий керівник  
докт. техн. наук,  
проф. ІФНТУНГ

канд. техн. наук,  
доц. ІФНТУНГ

канд. техн. наук,  
доц. ІФНТУНГ

Технолог  
ТОВ “Експрес-газбуд”



В. Я. Грудз

В. Б. Запухляк

Я. В. Дорошенко



Ю. Ю. Верхоляк



АВТОРСЬКИЙ ПРИМІРНИК  
ДП «УкрНДНЦ»  
Лист (зона відкриття) від «02» 06 2020 р.  
№ 1458

НАЦІОНАЛЬНИЙ СТАНДАРТ УКРАЇНИ

---

ДСТУ 9003:2020

**ТЕХНОЛОГІЯ БУДІВНИЦТВА  
МАГІСТРАЛЬНИХ І ПРОМИСЛОВИХ  
ТРУБОПРОВІДІВ  
ІЗ ГНУЧКИХ КОМПОЗИТНИХ ТРУБ**

**Загальні технічні вимоги**

*Видання офіційне*



Київ  
ДП «УкрНДНЦ»  
2020



Код згідно з ДК 004: 23.040.50

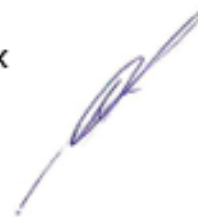
**Ключові слова:** барабан, бухта, гнучка композитна труба, трубопровід, система вентиляції, фітинг.

Заступник директора



М. Гунда

Науковий керівник,  
Завідувач відділення розробки нормативних документів та стандартизації



В. Кучерявий

Відповідальні виконавці:

Старший науковий співробітник відділу розробки нормативних документів відділення розробки нормативних документів та стандартизації



Я. Дорошенко

Завідувач відділу стандартизації відділення розробки нормативних документів та стандартизації



В. Литвин

Старший науковий співробітник відділу стандартизації відділення розробки нормативних документів та стандартизації



О. Підзирайло

Нормоконтроль,  
Завідувач відділу аспірантури та нормативно-технічного контролю

ПРОВЕДЕНО  
НОРМОКОНТРОЛЬ  
Дата: 04.11.2019



Т. Ляшенко

Літературне редагування,  
Завідувач відділу аспірантури та нормативно-технічного контролю



Т. Ляшенко

**НАКАЗ**

«11» квітня 2019 р.

№ 44

Про затвердження наукового керівника та відповідальних виконавців послуг, що надаються за договором від 01.04.19 № НДІ-126/20п-19

З метою організації надання послуг з виконання науково-дослідної роботи за темою: «Розроблення національного стандарту з проектування, будівництва, контролю якості та приймання робіт для газопроводів з гнучких композитних труб», що надаються за договором від 01.04.19 № НДІ-126/20п-19 (далі – договір), укладеним між ДП «Науканафтогаз» та філією УкрНДІгаз Акціонерного товариства «Укргазвидобування»,

**НАКАЗУЮ:**

1. Затвердити наукового керівника та відповідальних виконавців за договором:

*науковий керівник:*

– **Кучерявий В.А.**, завідувач відділення розробки нормативних документів та стандартизації;

*відповідальні виконавці:*

– **Литвин В.Л.**, завідувач відділу стандартизації відділення розробки нормативних документів та стандартизації;

– **Підзирайло О.М.**, старший науковий співробітник відділу стандартизації відділення розробки нормативних документів та стандартизації;

– **Дорошенко Я.В.**, т.в.о. старшого наукового співробітника відділу розробки нормативних документів відділення розробки нормативних документів та стандартизації.

2. Науковому керівнику забезпечити:

– надання послуг відповідно до умов договору;

– надсилання спільно з відділом бухгалтерського обліку та звітності (Куріньова Г.Д.) належної кількості звітних матеріалів (оригіналів), відповідно до умов договору, через організаційно-розпорядчий відділ до філії УкрНДІгаз Акціонерного товариства «Укргазвидобування»;

– надання до науково-технічної бібліотеки (Горева О.М.) по одному примірнику звітів за завершеними етапами наданих послуг (оригіналу), у тому числі заключний звіт в електронному вигляді на CD, для формування фонду звітів з наукових робіт ДП «Науканафтогаз» (Додаток ІІ до Положення про договірну роботу в ДП «Науканафтогаз»).

3. Організаційно-розпорядчому відділу (Овінова Н.В.) ознайомити з цим наказом наукового керівника та відповідальних виконавців.

4. Контроль за виконанням цього наказу покласти на заступника директора Гунду М.В.

Директор



*[Signature]* Стогній О.В.

ЗАТВЕРДЖУЮ  
Головний інженер РТМ "Печерськ"

К. В. Світельський  
(підпис) (ініціали, прізвище)  
" 28 " липня 2020 року  
М.П.  
РАЙОН ТЕПЛОВИХ МЕРЕЖ «ПЕЧЕРСЬК»

## АКТ

Комісія у складі:

голови – начальник району I групи Охріменко Олександр Дмитрович;  
членів комісії: – майстер виробничої дільниці I групи Мельниченко Сергій  
Сергійович;  
– бухгалтер Ружин Маргарита Валентинівна

цим Актом засвідчує, що результати дисертаційного дослідження докторанта Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу Дорошенка Ярослава Васильовича на тему: "Науково-практичні основи забезпечення міцності фасонних елементів газопроводів" на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 185 – "Нафтогазова інженерія та технології" впроваджені в діяльності СП "Київські теплові мережі" КП "КІЇВТЕПЛОЕНЕРГО" РТМ "Печерськ".

Зокрема, з метою ремонту ерозійно чи корозійно зношених відводів трубопроводів теплових та газових мереж розміщених у важкодоступних місцях використано аналітичні матеріали щодо протягування поршнем нового рукава в сталевий трубопровід, який містить дефектний один або декілька відводів. Технічним результатом застосування такої технології є збереження інфраструктури міста, зменшення часу робочого процесу, зменшення обсягу підготовчих робіт, роботи можна виконати в умовах обмежених розмірів робочого котловану чи колодязя.

Голова комісії

Масарський район  
(посада науковий ступінь, вчене звання)

(підпис)

Охріменко О.Д.  
(ініціали, прізвище)

Члени комісії

Мельниченко С.С.  
(посада науковий ступінь, вчене звання)

(підпис)

Мельниченко С.С.  
(ініціали, прізвище)

Бухгалтер  
(посада науковий ступінь, вчене звання)

(підпис)

Ружин М.В.  
(ініціали, прізвище)

**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


---

**ДОВІДКА ПРО ВПРОВАДЖЕННЯ**

Результати дисертаційного дослідження докторанта Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу Дорошенка Ярослава Васильовича на тему: “Науково-практичні основи забезпечення міцності фасонних елементів газопроводів” на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 185 – “Нафтогазова інженерія та технології” впроваджені в діяльності СП “Київські теплові мережі” КП “КИЇВТЕПЛОЕНЕРГО” РТМ “Печерськ”.

Зокрема, з метою ремонту ерозійно чи корозійно зношених відводів трубопроводів теплових та газових мереж розмічених у важкодоступних місцях використано аналітичні матеріали щодо протягування поршнем нового рукава в сталевий трубопровід, який містить дефектний один або декілька відводів. Технічним результатом застосування такої технології є збереження інфраструктури міста, зменшення часу робочого процесу, зменшення обсягу підготовчих робіт, роботи можна виконати в умовах обмежених розмірів робочого котловану чи колодязя.

Начальник району I групи

  
СТРУКТУРНИЙ ПІДРОЗДІЛ  
«КИЇВСЬКІ ТЕПЛОВІ МЕРЕЖІ»  
КОМУНАЛЬНОГО ПІДПРИЄМСТВА  
«КИЇВТЕПЛОЕНЕРГО»  
46538421  
РАЙОН ТЕПЛОВИХ МЕРЕЖ «ПЕЧЕРСЬК»  
О. Д. Охрімєнко  
(підпис) 46538421 (ініціали, прізвище)



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

**ІВАНО-ФРАНКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ  
УНІВЕРСИТЕТ НАФТИ І ГАЗУ**

вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, 76019, тел./факс (0342) 54-71-39, тел. (0342) 54-72-66  
E-mail: admin@nung.edu.ua, код ЄДРПОУ 02070855



**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Проректор з наукової роботи

д.т.н., проф.

**Чудик І. І.**

“24”

*серпень*

2020 р.

**АКТ**

Впровадження у навчальний процес результатів дисертаційної роботи Дорошенка Я. В. “Науково-практичні основи забезпечення міцності фасонних елементів газопроводів”.

У результаті роботи над дисертацією докторант кафедри газонафтопроводів та газонафтосховищ Дорошенко Ярослав Васильович одержав наукові та прикладні результати, які використовуються для підготовки фахівців освітньо-кваліфікаційного рівня бакалавр та магістр за спеціальністю 185 – “Нафтогазова інженерія та технології” під час вивчення дисциплін “Спорудження магістральних трубопроводів”, “Ремонт зосереджених об’єктів газонафтопроводів”, “Спорудження зосереджених об’єктів газонафтопроводів” та під час виконання магістерських робіт за освітньо-професійною програмою “Спорудження та ремонт газонафтопроводів та газонафтосховищ”.

Директор інституту  
нафтогазової інженерії,  
к.т.н., доцент

Витязь О. Ю.

В. о. завідувача кафедри  
газонафтопроводів та газонафтосховищ,  
к.т.н., доцент

Чернова О. Т.