

УДК 622.691.4
DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2020.1-2/06>

Дорошенко Я.В.

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

CFD-ДОСЛІДЖЕННЯ ГАЗОДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ У ЗВАРНИХ ТРІЙНИКАХ МАГІСТРАЛЬНИХ ГАЗОПРОВОДІВ

Виконано CFD-моделювання турбулентних газових потоків у трійниках, у яких газовий потік із магістралі повністю перетікає у відвід трійника. Моделювання виконувалось для зварних трійників газопроводів із різним зовнішнім діаметром магістралі (219 мм, 530 мм, 1020 мм та 1420 мм). Для кожного з чотирьох вибраних зовнішніх діаметрів магістралі трійників вибрані п'ять різних зовнішніх діаметрів відводу. Діаметр відводу трійника був ключовим геометричним параметром, вплив якого на газодинамічні процеси, втрати енергії в зварних трійниках газопроводів досліджувався. Масова витрата, яка задавалась на вході в магістраль трійників, вибиралась залежно від діаметра трійника. Тиск на виході відводу трійників задавався рівним 5 МПа.

CFD-моделювання виконувалось у програмному комплексі ANSYS Fluent 2019 R2 Academic. Як модель турбулентності була вибрана SST (shear stress transport) модель, у якій виконується вибір між $k-\omega$ (поблизу стінки) і $k-\epsilon$ (далеко від стінки) моделями.

Результати моделювань були візуалізовані побудовою полів швидкостей газового потоку, кінетичної енергії турбулентності та тиску в повздовжніх перерізах трійників, ліній течії у їхній внутрішній порожнині. Виконано аналіз газодинамічних процесів у внутрішній порожнині зварних трійників газопроводів із різним діаметром відводу. Встановлено вплив зменшення діаметра відводу зварних трійників на фізичну картину руху ними газового потоку. Знайдено пояснення причин зміщення поля максимальної швидкості газового потоку у відводі трійника від набігаючої стінки у сторону середини відводу під час зменшення діаметра відводу трійника.

Визначено втрати тиску в усіх трійниках, для яких виконувалось моделювання. За втратами тиску визначено коефіцієнти місцевого опору кожного досліджуваного трійника та втрати в ньому гідродинамічного напору.

Ключові слова: CFD-моделювання, втрати тиску, газодинамічні процеси, зварний трійник, коефіцієнт місцевого опору, турбулентний потік.

Постановка проблеми. Під час руху транспортованого продукту трубопроводом спостерігаються втрати гідродинамічної енергії потоку або втрати напору на подолання опору, зумовленого місцевими опорами і тертям до стінки труби. Щоб підтримати рух потоку трубопроводом, треба витрачати енергію на подолання цих опорів. Місцевими опорами трубопроводних систем є різноманітні фасонні елементи – трійники, відводи (криві гарячого гнуття), перехідники тощо. У складних трубопроводних системах, які містять велику кількість місцевих опорів втрати енергії в них, можуть значною мірою впливати на загальну величину втрат.

Трійники є одними з найскладніших з гідравлічного погляду фасонними елементами трубопроводів і досить поширеними. Потоки в трійниках є дуже складними і тривимірними. Їхня динаміка залежить від багатьох чинників – схеми руху потоку трійником, співвідношення діаметрів магістралі та відводу трійника, геометрії трійника, співвідношення витрат потоку магістраллю

і відводом трійника. Від усіх цих величин залежить величина втрат енергії в трійниках.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Втрати енергії у фасонних елементах трубопроводних системах спочатку вивчалися експериментально. Дослідники переважно визначали перепад тиску в різноманітних фасонних елементах трубопроводів, за яким розраховували коефіцієнти втрат енергії (напору). Значення таких коефіцієнтів для багатьох фасонних елементів наведено в довідниках [1; 2]. З розвитком комп'ютерних програмних комплексів CFD-моделювання такі дослідження почали виконуватись числовим методом. Їхні результати порівнювались із результатами експериментів, і було підтверджено, що CFD-моделюванням є ефективним засобом таких досліджень.

Структура газового потоку у трійниках об'язки компресорної станції магістрального газопроводу CFD-моделюванням досліджена у [3]. Виявлено місця виникнення конфузорних і дифузорних ефектів, вихорів, реверсного руху газу, відривання

потоків газу від стінки досліджуваних трійників. У [4] CFD-моделюванням досліджено розділення потоку води у трійниках зі співвідношенням діаметра відводу до діаметра магістралі трійника, яке рівне 0,25. Відвід моделювався перпендикулярним магістралі трійника та нахиленим під кутом 45° . Результатом досліджень були коефіцієнти місцевих опорів для модельованої геометрії трійників і різних співвідношень витрат.

Вплив кута розгалуження Y-подібного трійника на розподіл тиску та швидкості рідини у трійнику CFD-моделюванням вивчено у [5]. Потік рідини в трійнику розділявся на два потоки. Помічено, що коли кут розгалуження становить 45° , турбулентність у трійнику є найменшою, і, відповідно, найменшим є падіння тиску в трійнику. Було встановлено, що рівномірність розділу потоку в трійнику та інтенсивність турбулентності в ньому залежать від швидкості потоку на вході трійника.

Викладені в публікаціях і спеціалізованих довідниках результати досліджень втрат енергії газорідного потоку в трійниках трубопровідних систем переважно стосуються розділення та злиття потоків, що не охоплює всі можливі комбінації напрямів потоку у трійниках, усі можливі співвідношення діаметрів відводу і магістралі трійників.

Постановка завдання. Метою статті є дослідження впливу діаметра відводу трійника на газодинамічних процесах та гідравлічні втрати енергії у трійниках, у яких потік із магістралі повністю перетікає у відвід.

Виклад основного матеріалу дослідження. Трійники є поширеними елементами малих і великих трубопровідних систем, якими транспортуються газ, нафта, вода та інші різноманітні речовини. Трійники переважно використовуються для розподілу (розділення) потоку від основної труби та для злиття потоків двох труб до однієї труби. Також у багатьох різноманітних трубопровідних системах досить часто трапляються трійники, в яких потік рухається магістраллю, з якої повністю перетікає у відвід трійника. Такі трійники містяться у об'єктах різних технологічних об'єктів – компресорних і насосних станцій магістральних трубопроводів, підземних сховищ газу, газорозподільних станцій тощо. Крім того, вони є в місці технологічних перемичок між трубопроводами, де весь потік з однієї нитки трубопроводу перетікає в іншу, в місцях багатониткових підводних трубопроводів, де весь потік транспортується резервними нитками тощо. Досить часто такі трійники є нерівнопрохідними, тобто діаметр

їхнього відводу є меншим від діаметра магістралі. Наприклад, перемичка між магістральними газопроводами є, як правило, трубою меншого діаметра, порівняно з діаметром основних труб.

У зварних трійниках з'єднання магістралі (основної лінії) і відводу (бічного патрубка) виконано під прямим кутом (рис. 1).



Рис. 1. Зварні трійники

Потоки в трійниках є дуже складними і тривимірними, а тому їх треба вивчати експериментально або CFD-моделюванням. Експериментально вивчити потоки в трійниках газопроводів, особливо магістральних, неможливо. У дослідженні тривимірне CFD-моделювання будемо виконувати в програмному комплексі ANSYS Fluent 2019 R2 Academic методом скінчених об'ємів. Завдяки сучасному програмному забезпеченню, яке є одним із найкращих варіантів для важких і точних розрахунків, можна зекономити багато часу і не робити велику кількість експериментів.

Як модель турбулентності для розрахунків в ANSYS Fluent була вибрана SST (shear stress transport) модель, яка добре себе зарекомендувала в розрахунку відривних течій, що мають місце в трійниках. У SST-моделі виконується вибір між $k-\omega$ (поблизу стінки) і $k-\epsilon$ (далеко від стінки) моделями.

Було накреслено тривимірні моделі внутрішньої порожнини трійників, конструкція та геометричні розміри яких відповідають ТУ У 27.2-05747991-001 [6] та ОСТ 102-61 [7]. Було вибрано чотири різних зовнішніх діаметри магістралі трійників – 219 мм, 530 мм, 1020 мм та 1420 мм.

Щоб дослідити вплив діаметра відводу трійників на параметри потоку, гідравлічну енерговитратність трубопровідних систем для кожного з чотирьох вибраних різних зовнішніх діаметрів магістралі зварних трійників, було вибрано п'ять різних діаметрів відводу і моделювалась внутрішня порожнина таких трійників. Робочим середовищем, рух якого моделювався трійниками, задавався природний газ. Коефіцієнт еквівалентної шорсткості стінки трійників із прилеглими ділянками труб задавався рівним 0,03 мм.

Досліджувались трійники, в яких потік із магістралі повністю перетікає у відвід. На вході в магістраль трійників задавалась масова витрата, а на виході відводу – тиск. Масова витрата на вході в магістраль трійників залежала від діаметра трійника. Оскільки коефіцієнт місцевого опору значною мірою не залежить від тиску, то для всіх моделювань тиск на виході відводу трійника задавався рівним 5 МПа.

На першому етапі виконувалось моделювання для чотирьох різних зовнішніх діаметрів зварних трійників (219 мм, 530 мм, 1020 мм та 1420 мм), кожний з яких мав п'ять різних діаметрів відводу. Виконувалось 16 тривимірних CFD-моделювань.

Результати моделювань були візуалізовані в постпроцесорі програмного комплексу ANSYS Fluent. Для прикладу розглянемо зварні трійники, зовнішній діаметр магістралі яких становить 1420 мм, а зовнішній діаметр відводу змінювався і становив 1420 мм, 1220 мм, 1020 мм та 720 мм. Поля швидкостей у повздовжніх перерізах цих трійників наведено на рис. 2, лінії течії – на рис. 3, поля кінетичної енергії турбулентності – на рис. 4, а поля тиску – на рис. 5. У трійниках з іншими діаметрами магістралі та наближено однаковим співвідношенням діаметра відводу до діаметра магістралі візуалізовані результати є практично однакові.

Перетікання всього газового потоку з магістралі у відвід трійника спричинює зміну напрямку руху газового потоку у трійнику, що призводить до складного перерозподілу швидкості потоку з формуванням досить інтенсивних рециркуляційних рухів у відводах трійників з лівого їхнього боку (рис. 2, 3). Такі рециркуляційні рухи зумовлені відриванням потоку від стінки в місці з'єднання магістралі та відводу трійника, в результаті чого відбувається складний процес перерозподілу імпульсу в трійнику. У місці рециркуляції утворюються турбулентні вихори з великою кінетичною енергією (рис. 4). Детальний аналіз полів швидкості потоку (рис. 2), ліній течії (рис. 3) та полів кінетичної енергії турбулентності (рис. 4) показує істотну залежність газодинамічних процесів у відводі трійників від діаметра відводу. Зменшення діаметра відводу трійника призводить до збільшення швидкості газового потоку у відводі трійника (рис. 2, 3), збільшення інтенсивності рециркуляції та інтенсивності утворення турбулентних вихорів і їхньої кінетичної енергії в зоні рециркуляції (рис. 4).

Зі зменшенням зовнішнього діаметра відводу трійника спостерігається зміщення поля макси-

мальної швидкості газового потоку у трійнику в сторону середини відводу (рис. 2). Зокрема, для трійника із зовнішнім діаметром відводу 1020 мм поле максимальної швидкості вже дещо віддалене від набігаючої стінки відводу (рис. 2, в), а для трійника із зовнішнім діаметром відводу 720 мм воно є в середній частині відводу (рис. 2, г). Пояснення причини зміщення поля максимальної швидкості газового потоку у трійнику в сторону середини відводу під час зменшення зовнішнього діаметра відводу трійника (рис. 2) та причини підвищеної кінетичної енергії турбулентних вихорів біля правої стінки відводу трійника (рис. 4) було знайдене після детального аналізу ліній течії газового потоку у трійниках (рис. 3). У магістралі трійника, у місці зміни напрямку руху газового потоку, дугоподібні лінії течії, які простягаються вздовж нижньої твірної магістралі трійника, виходять за межі проєкції (уявного продовження) відводу трійника у внутрішню порожнину його магістралі, що зумовлено силами інерції (рис. 3). У верхній частині магістралі трійника ці лінії течії різко заокруглюються в сторону відводу трійника (основного потоку), у результаті чого відбувається відривання потоку від стінки на початку відводу з правого його боку та витиснення основного потоку в ліву сторону в цьому місці. У результаті цього в правому боці відводу трійника на його початку також виникає рециркуляційний рух газового потоку. Причому чим менший діаметр відводу трійника, тим інтенсивніша виникає рециркуляція в цьому місці відводу (рис. 3), і тим більша кінетична енергія утворених турбулентних вихорів (рис. 4). Найбільший вплив відривання потоку з правого боку відводу має за найменшого модельованого діаметра відводу трійника – 720 мм. Відбувається зміщення максимуму швидкості газового потоку на середину відводу (рис. 2, г), на відміну від трійників із відводами більших діаметрів (рис. 2, а, б), де максимум швидкості спостерігається біля набігаючої стінки відводу з правого його боку. Зона турбулентних вихорів із правого боку відводу в трійнику з діаметром відводу 720 мм також є набагато довшою, ніж у трійниках із меншим діаметром відводу (рис. 4, г).

У результаті зміни напрямку потоку газу в трійниках, його повного перетікання у відвід відбувається утворення складного поля тиску, падіння тиску (рис. 5). Причинами цього є зміна імпульсу потоку, зумовлена тертям і геометрією трійників.

Зменшення діаметра відводу трійника є ключовим чинником, який впливає на величину падіння тиску у трійнику і збільшує його

гідралічний опір. Найбільше падіння тиску у зварному трійнику відбувається в місці інтенсивної рециркуляції з лівого боку відводу, де найінтенсивніша турбулентність газового потоку (рис. 5). Також незначне за величиною поле найбільшого падіння тиску спостерігається і з правого боку відводу на його початку, де спостерігається менша за величиною рециркуляція (найбільше помітне в трійнику з діаметром відводу 720 мм). Фактично рециркуляції у відводі зварного трійника є основною причиною, яка призводить до розсіювання енергії в трійнику. Збільшення її інтенсивності зі зменшенням діаметра відводу трійника негативно впливає на втрати енергії в трійнику.

Відніманням від тиску на вході в магістраль трійника тиску на виході відводу трійника можна визначити падіння тиску в трійнику. Найбільше падіння тиску відбувається у зварному трійнику з діаметром відводу 720 мм і становить 70910 Па (рис. 5, г). Причиною цього є те, що для такого діаметра відводу трійника спостерігається найінтенсивніша рециркуляція з обох боків відводу трійника (рис. 2, г). Зі збільшенням діаметра відводу трійника падіння тиску в ньому зменшується. Так, якщо діаметр відводу трійника

1020 мм, падіння тиску становить 16850 Па (рис. 5, б), якщо 1220 мм – 8580 Па (рис. 5, в) і якщо 1420 мм – 4560 Па (рис. 5, г).

За значеннями падіння тиску в трійниках можна знайти втрати в них напору (енергії). Для цього треба розрахувати безрозмірні коефіцієнти місцевого опору ξ (в іноземній літературі їх називають коефіцієнти втрати енергії (К-факторами)).

Коефіцієнт місцевого опору (втрат енергії) рівний

$$\xi = \frac{\Delta P_{\text{заг}}}{\rho V^2 / 2}, \quad (1)$$

де $\Delta P_{\text{заг}}$ – втрачений на цій ділянці трубопроводу повний тиск (падіння тиску в трійнику); ρ – густина газу; V – швидкість газового потоку (приймається швидкість на виході місцевого опору). [1]

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

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

де, g – прискорення вільного падіння. [1]

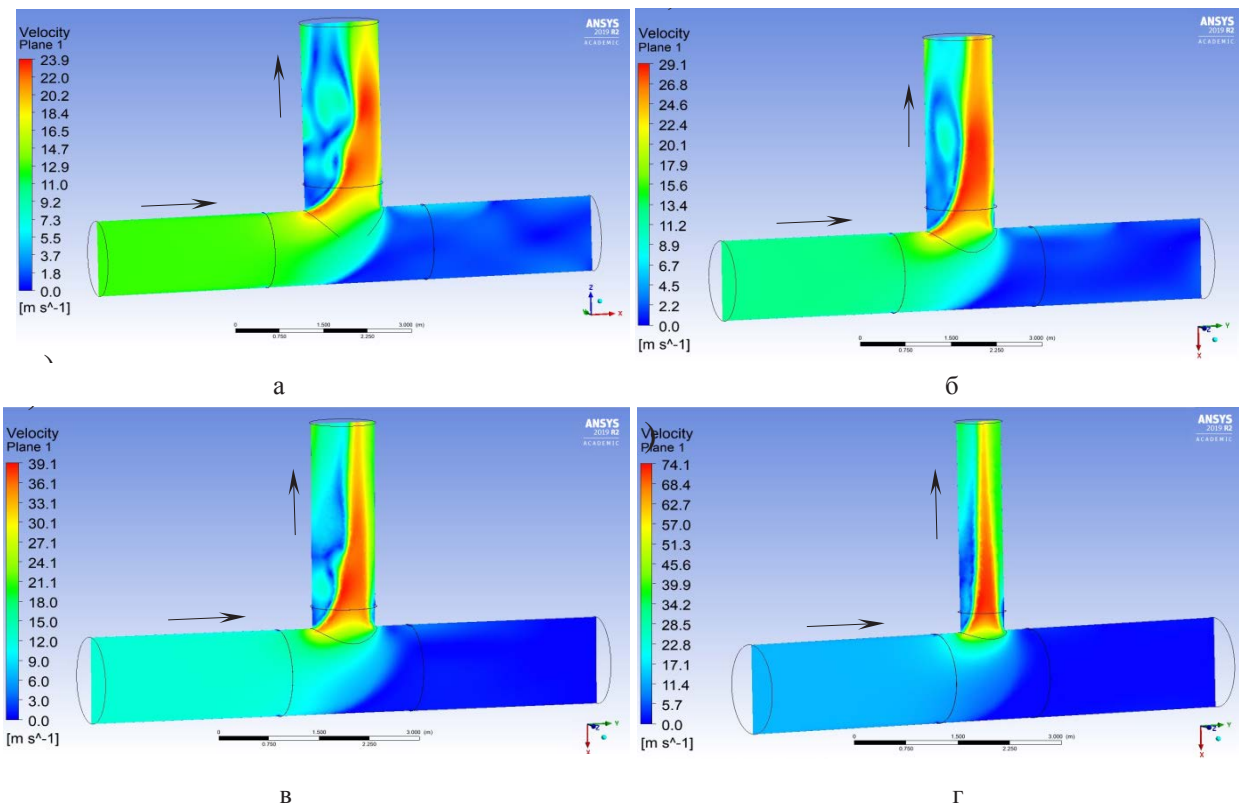


Рис. 2. Поля швидкості в повздовжніх перерізах зварних трійників: а) – 1420 – 1420 мм; б) – 1420 – 1220 мм; в) – 1420 – 1020 мм; г) – 1420 – 720 мм

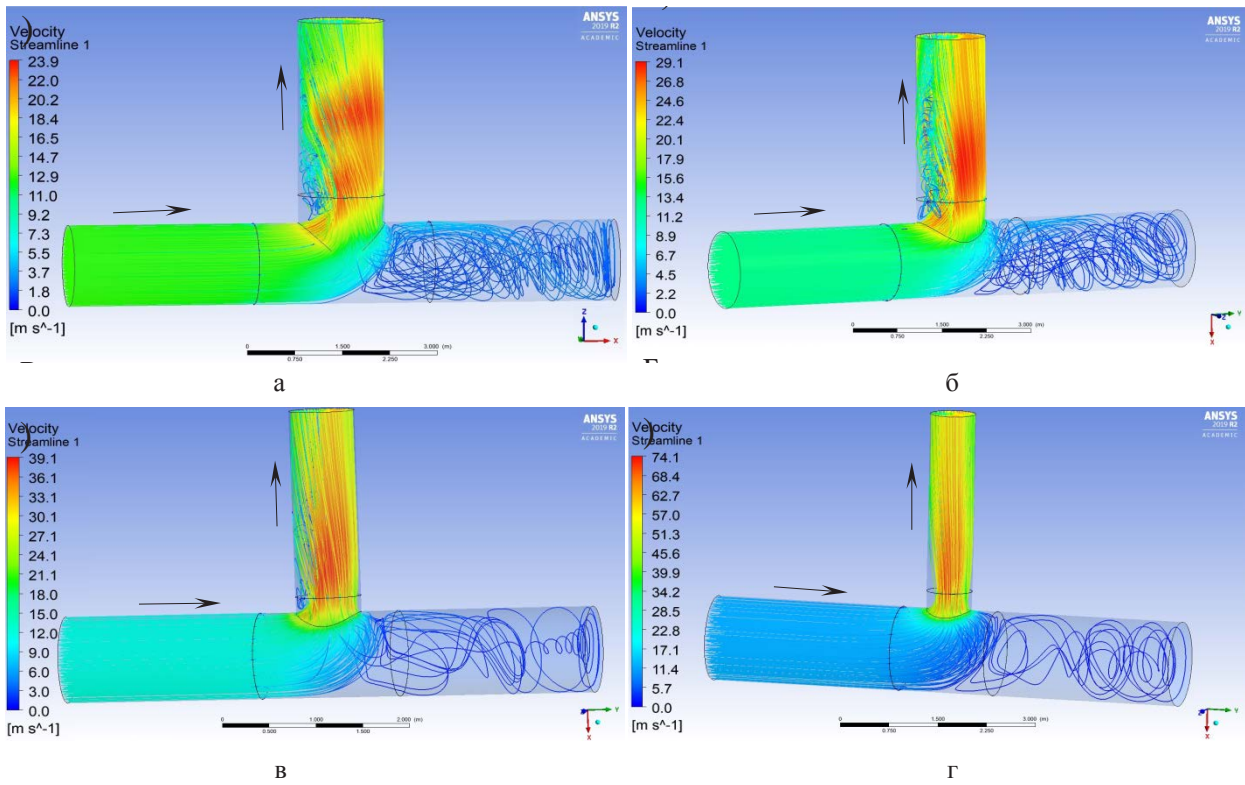


Рис. 3. Лінії течії у внутрішній порожнині трійників:
 а) – 1420 – 1420 мм; б) – 1420 – 1220 мм; в) – 1420 – 1020 мм; г) – 1420 – 720 мм

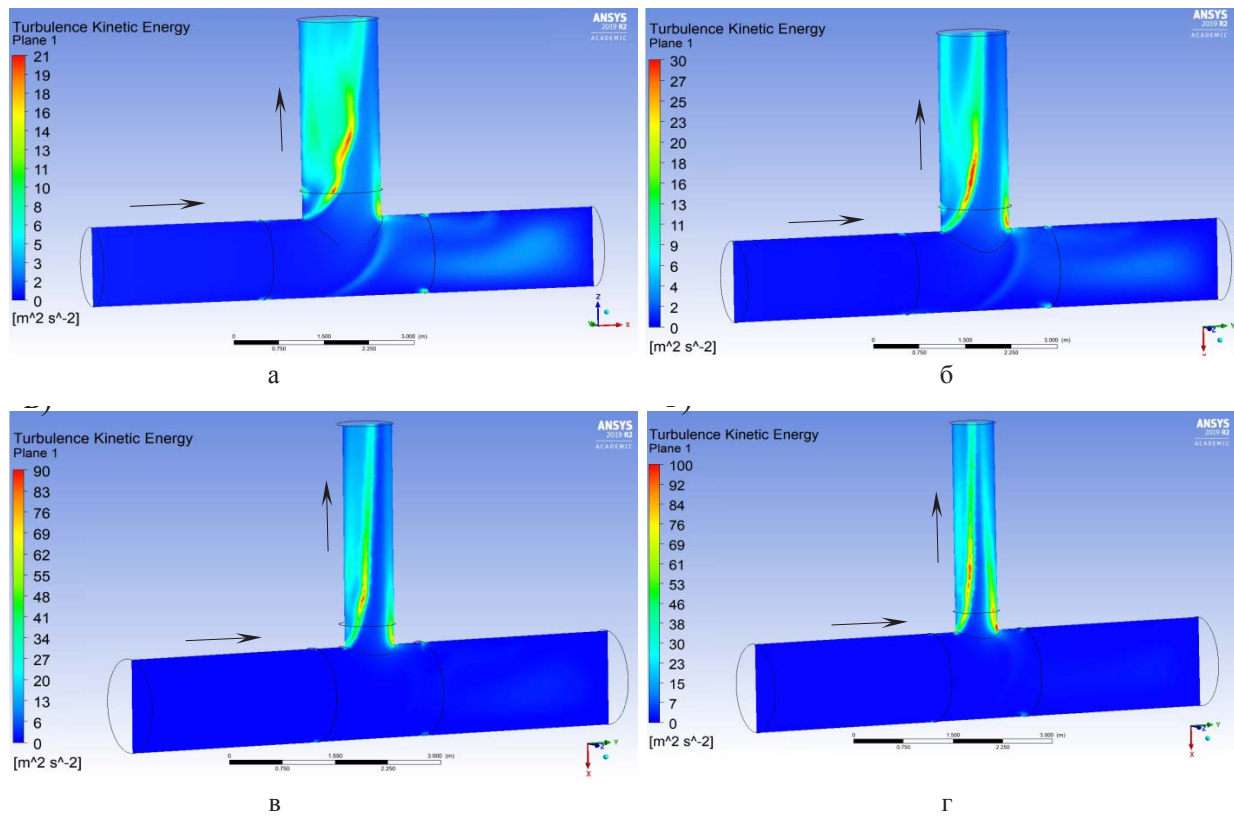


Рис. 4. Поля кінетичної енергії турбулентності в повздовжніх перерізах трійників:
 а) – 1420 – 1420 мм; б) – 1420 – 1220 мм; в) – 1420 – 1020 мм; г) – 1420 – 720 мм

Якщо відомі втрати енергії в трійниках, тоді можна визначити, як вони впливають на енерговитратність усєї трубопровідної системи.

За падінням тиску в кожному трійнику за (1) розраховано коефіцієнти місцевого опору для трійників із чотирма різними зовнішніми діаметрами магістралі (219 мм, 530 мм, 1020 мм та 1420 мм), кожний з яких мав п'ять різних діаметрів відводу. У результаті цього було отримано 20 значень коефіцієнтів місцевого опору. Отримані коефіцієнти місцевих опорів були в межах від 1,5 до 1,6. Результати розрахунків показують, що для зварних трійників, у яких весь потік із магістралі повністю перетікає у відвід, коефіцієнти місцевих опорів значною мірою не залежать від діаметра магістралі й діаметра відводу. Це зумовлено тим, що під час зменшення діаметра відводу трійника пропорційно збільшенню падіння тиску в трійнику збільшується швидкість газового потоку на виході відводу трійника. Також за (2) для кожного модельованого трійника були розраховані втрати напору, які зі зменшенням діаметра відводу трійника різко збільшувались, що зумовлено збільшенням швидкості на виході відводу трійника.

Висновки. Газодинамічні процеси у відводі зварних трійників газопроводів істотно залежать від діаметра відводу. Зменшення діаметра від-

воду трійника призводить до посилення інтенсивності рециркуляції і збільшення кінетичної енергії турбулентних вихорів у місцях рециркуляції. Усе це є причиною значного збільшення падіння тиску в трійнику зі зменшенням діаметра його відводу. Наприклад, для граничних умов, які задавались у виконаному CFD моделюванні, падіння тиску у зварному нерівнопрохідному трійнику з діаметром відводу 720 мм і діаметром магістралі 1420 мм у 15 разів більше, ніж у зварному рівнопрохідному трійнику, діаметром 1420 мм.

Поле максимальної швидкості газового потоку у разі зменшення діаметра відводу трійника зміщується від набігаючої стінки у сторону середини відводу. Таке явище пояснюється витісненням основного потоку у відводі трійника потоком, який завдяки силам інерції під час перетікання з магістралі у відвід трійника вийшов за межі проєкції відводу трійника у внутрішню порожнину його магістралі. Цей потік призводить до рециркуляції і збільшення кінетичної енергії турбулентності біля набігаючої стінки відводу трійника.

Визначено, що коефіцієнти місцевих опорів значною мірою не залежать від діаметра відводу трійника і були в межах від 1,5 до 1,6.

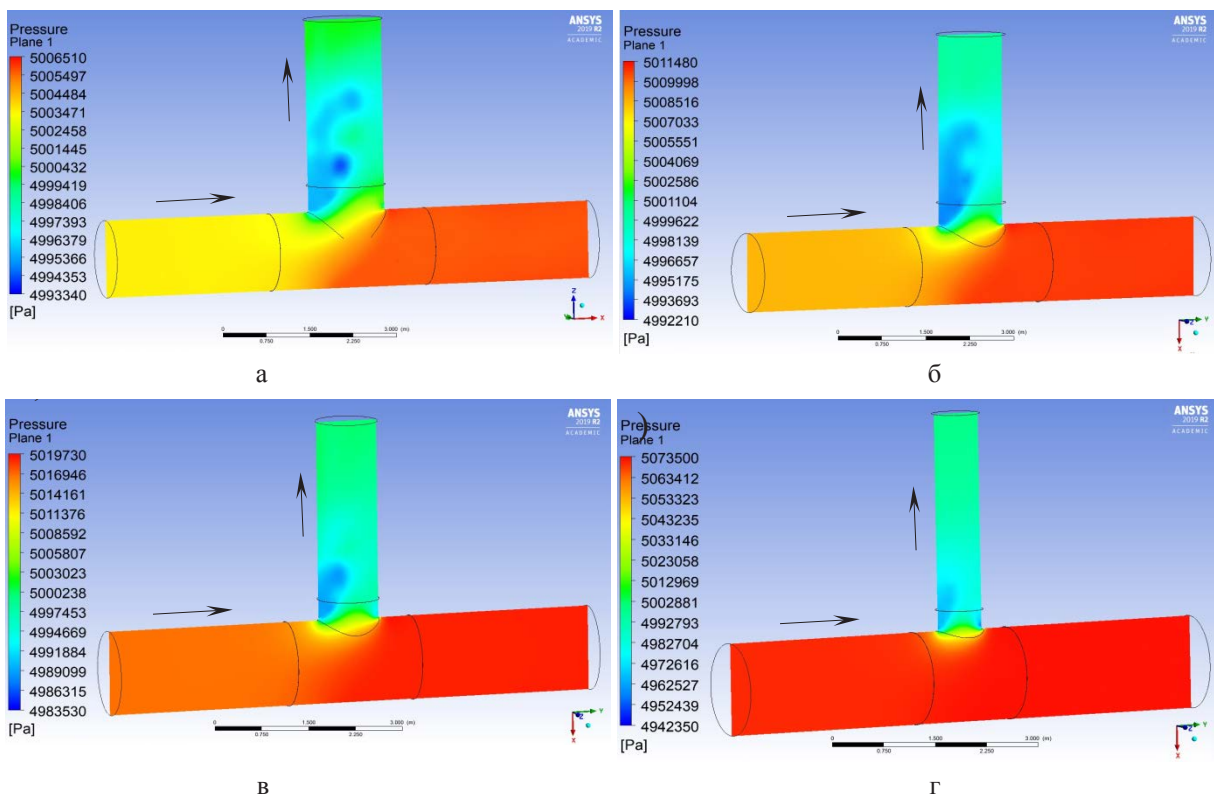


Рис. 5. Поля тиску в повздовжніх перерізах трійників:
а) – 1420 – 1420 мм; б) – 1420 – 1220 мм; в) – 1420 – 1020 мм; г) – 1420 – 720 мм

Список літератури:

1. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. Москва : Машиностроение, 1975. 559 с.
2. Flow of fluids through valves, fittings, and pipe. Crane Co. Engineering Division, 1957. 122 p.
3. 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.
4. Sukhapure K., Burns A., Mahmud T., Spooner J. CFD modelling and validation of head losses in pipe bifurcations. *Heat transfer, fluid mechanics and thermodynamics* : materials of 13th international conference, t. Portorož, 17–19 July 2017 year. Portorož, Slovenia, 2017. P. 489–494.
5. Kumar S., Khadabadi U. Investigation of flow parameters and structural analysis of Y-Duct. *International Research Journal of Engineering and Technology*. 2017. Vol. 4, Issue 6. P. 1520–1524.
6. ТУ У 27.2-05747991-001-2004. Деталі з'єднувальні і збірні одиниці магістральних і промислових трубопроводів на Рр до 10 МПа (100 кгс/см²). [Чинний від 2005-06-01]. Вид. офіц. м. Суми : ВАТ «СМНО ім. Фрунзе», 2004. 98 с.
7. ОСТ 102-61-81. Детали магистральных трубопроводов стальные приварные на Ру до 10,0 МПа (100 кгс/см²). Тройники сварные с усиливающими накладками. Размеры. [Действующий от 1981-07-01]. Изд. офиц. Москва : Министерство строительства предприятий нефтяной и газовой промышленности, 1981. 32 с.

Doroshenko Ya.V. CFD INVESTIGATION OF GASODYNAMIC PROCESSES IN WELDED TEES OF MAIN GAS PIPELINES

CFD simulation of turbulent gas flows in tees in which gas flow from the main line completely flows into the tee branch. The simulation was performed for welded tees of gas pipelines with different main line diameters (219 mm, 530 mm, 1020 mm and 1420 mm). For each of the four selected diameters of the tee main line, five different branch diameters were selected. The diameter of the tee branch was a key geometric parameter whose effect on gas-dynamic processes, energy loss in welded tee pipelines was investigated. The mass flow rate that was set at the entrance to the tee main line was selected depending on the tee diameter. The pressure at the outlet of the tees branch was set to 5 MPa.

CFD modeling was performed in ANSYS Fluent 2019 R2 Academic software. The turbulence model was chosen as the SST (shear stress transport) model in which the choice is made between $k-\omega$ (near the wall) and $k-\varepsilon$ (far from the wall) models.

The simulation results were visualized by the construction of fields of gas flow velocities, kinetic energy of turbulence and pressure in longitudinal sections of tees, flow lines in their inner cavity. The analysis of gas-dynamic processes in the internal cavity of welded tees of gas pipelines with different diameters of branch. The influence of reducing the diameter of the weld tees branch on the physical picture of the gas flow by them is established. The reasons for the displacement of the field of maximum velocity of the gas stream in the tee branch outlet from the incoming wall towards the middle of the outlet have been found while reducing the diameter of the tee branch outlet.

Pressure loss in all tees for which simulation was performed was determined. The pressure loss determines the coefficients of local resistance of each test tee and the loss of hydrodynamic pressure in it.

Key words: *CFD modeling, coefficient of local resistance, gas-dynamic processes, pressure loss, turbulent flow, welded tee.*