

Технічні науки

УДК 622.691.4

Дорошенко Ярослав Васильович

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри спорудження та ремонту газонафтопроводів і
газонафтосховищ

Івано-Фанківський національний технічний університет нафти і газу

Марко Тарас Іванович

аспірант,
Івано-Фанківський національний технічний університет нафти і газу

Дорошенко Юлія Іванівна

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри транспорту і зберігання нафти і газу
Івано-Фанківський національний технічний університет нафти і газу

Дорошенко Ярослав Васильевич

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры сооружения и ремонта газонефтепроводов и
газонефтехранилищ

Ивано-Фанкивський національний технічний університет нафти і газу

Марко Тарас Іванович

аспірант,
Ивано-Фанкивський національний технічний університет нафти і газу

Дорошенко Юлия Ивановна

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры транспорта и хранения нефти и газа
Ивано-Фанкивський національний технічний університет нафти і газу

Yaroslav Doroshenko

Ph.D., Associate Professor,

Department of Construction and Repair Oil and Gas Pipelines and Storage
Facilities

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas

Taras Marco

Postgraduate

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas

Julia Doroshenko

Ph.D., Associate Professor,

Department of Oil and Gas Transport and Storage

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas

**ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІКИ РУХУ БАГАТОФАЗНИХ ПОТОКІВ
ФАСОННИМИ ЕЛЕМЕНТАМИ ОБВ'ЯЗКИ КОМПРЕСОРНОЇ
СТАНЦІЇ МАГІСТРАЛЬНОГО ГАЗОПРОВОДУ
ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ДВИЖЕНИЯ МНОГОФАЗНЫХ
ПОТОКОВ ФАСОННЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ ОБВЯЗКИ
КОМПРЕССОРНОЙ СТАНЦИИ МАГИСТРАЛЬНОГО
ГАЗОПРОВОДА
RESEARCH MULTIPHASE FLOWS MOTION IN COMPRESSOR
STATIONS FITTINGS OF MAIN GAS PIPELINES**

Анотація: Лагранжовим підходом (модель Discrete Phase Model) здійснено моделювання руху багатофазних потоків фасонними елементами обв'язки компресорної станції (відводами, трійниками) в програмному комплексі ANSYS Fluent R17.0 Academic.

Ключові слова: відвід, дискретна фаза, ерозійне зношування, комп'ютерне моделювання, підхід Лагранжа, траєкторія руху, трійник.

Аннотация: Лагранжевым подходом (модель Discrete Phase Model) осуществлено моделирование движения многофазных потоков фасонными элементами обвязки компрессорной станции (отводами, тройниками) в программном комплексе ANSYS Fluent R17.0 Academic.

Ключевые слова: отвод, дискретная фаза, эрозионный износ, компьютерное моделирование, подход Лагранжа, траектория движения, тройник.

Abstract: Lagrangian method (Discrete Phase Model) made simulation of multiphase flows motion in compressor station fittings (elbows, tees) to program complex ANSYS Fluent R17.0 Academic.

Keywords: elbow, discrete phase, erosion wear, computer modeling, Lagrangian method, tee.

Обв'язка компресорних станцій магістральних газопроводів складається з прямих ділянок трубопроводу, кривих гарячого гнуття (відводів), трійників, перехідників, перекривної арматури. У трійниках, кривих гарячого гнуття відбувається складний рух газового потоку та зміна напрямку його руху, що призводить до ударяння рідких та твердих частинок (дискретної фази), які містяться в потоці природного газу (суцільної фази), до стінки трубопроводу в результаті чого відбувається ерозійне зношування стінки труби. Ерозійне зношування є одним з чинників, який зменшує залишковий ресурс газопроводів. Особливо ерозійне зношування стінки труби є небезпечним для газопроводів термін експлуатації яких перевищує 35-40 років, яких є переважна більшість в складі газотранспортної системи України. Тому всебічне вивчення процесу ерозійного зношування стінки труби магістральних газопроводів є особливо актуальним.

Щоб повно і всебічно дослідити ерозійне зношування фасонних елементів обв'язки компресорної станції магістрального газопроводу,

треба знати місця інтенсивного ударяння рідких і твердих частинок, які переносяться потоком природного газу (багатофазні потоки), до стінки трубопроводу, швидкість, діаметри частинок, кути атаки в місці ударяння.

Одним з перспективних напрямів вирішення таких задач в найкоротші терміни є широке застосування сучасних програмних комплексів комп'ютерного моделювання тривимірних потоків газів та рідин ANSYS Fluent, ANSYS CFX, Flow Vision, Flow3D, SolidWorks.

Комп'ютерним моделюванням багатофазних тривимірних потоків газів в фасонних елементах трубопроводів різноманітними програмними комплексами займаються багато сучасних науковців. Зокрема Abdolkarimi V. і Mohammadikhah R. [1], Kuan B. [2] комп'ютерним моделюванням досліджували рух твердих частинок відводами трубопроводів діаметром до 300 мм з кутом повороту на кут 90° . Визначались траєкторії руху частинок різних діаметрів, швидкості їх руху. Azimian M. і Bart H.-J. комп'ютерним моделюванням досліджували рух твердих частинок відводом та трійником пульпопроводу діаметрами 40 мм [3].

Найбільша кількість фасонних елементів лінійної частини газопроводів (відводів, трійників, перехідників) міститься в обв'язці компресорних станцій (рисунок 1), підземних сховищ газу, газорозподільних станцій.

У відводах обв'язки компресорної станції (рисунок 1) відбувається зміна напрямку потоку продукту на 90° (за винятком відводів на вході та виході камер запускання та приймання внутрішньотрубних засобів). У трійниках обв'язки компресорної станції можливі різні схеми руху газу:

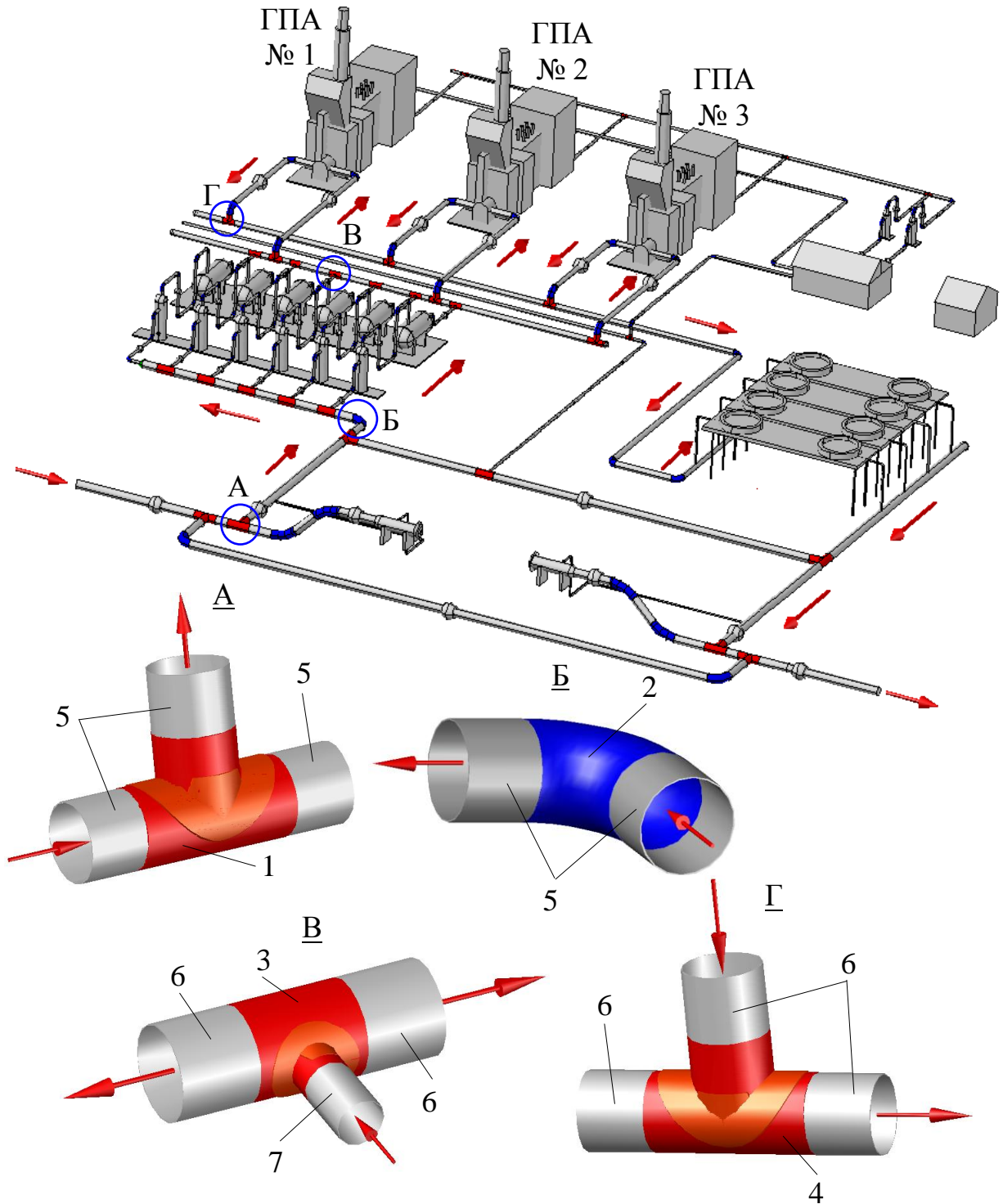
- газ рухається магістраллю трійника 1 (рисунок 1) і з магістралі направляється у відвід трійника;

- газ рухається відводом трійника 3 (рисунок 1) і з відводу направляється у магістраль трійника, де частина газового потоку перетікає в одну сторону магістралі, а друга частина в іншу сторону магістралі;

- газ рухається відводом трійника 4 (рисунок 1) і з відводу направляєтся у одну з сторін магістралі.

Відомо, що транспортований магістральними газопроводами природний газ містить рідкі та тверді частинки (забруднення). До рідкої дискретної фази відносяться газовий конденсат, вода, мастило та інші вуглеводні. До твердої – винесена з свердловин родовищ порода, пісок, окалина, яка відшарувалась від внутрішньої стінки труб, продукти внутрішньотрубної корозії.

Багатофазними називаються потоки, які складаються з суцільної фази (природний газ) і розподіленої в ній дискретної фази (рідкі і тверді частинки). Багатофазні потоки відрізняються набагато складнішою фізикою, ніж однофазні.



1 – трійник зварний рівнопрохідний з підсилюючими накладками 1420×28 – 1420×28 (ОСТ 102-61 [4]); 2 – відвід 90° 1420×24 (ГазТУ 102-488/1 [5]); 3 – трійник зварний з підсилюючими накладками 1020×18 – 529×10 (ОСТ 102-61 [4]); 4 – трійник зварний з підсилюючими накладками

1020×20 – 1020×20 (ОСТ 102-61 [4]); 5 – труба 1420×18,7; 6 – труба 1020×12,3; 7 – труба 529×7

Рисунок 1 – Схема компресорної станції (розробка автора)

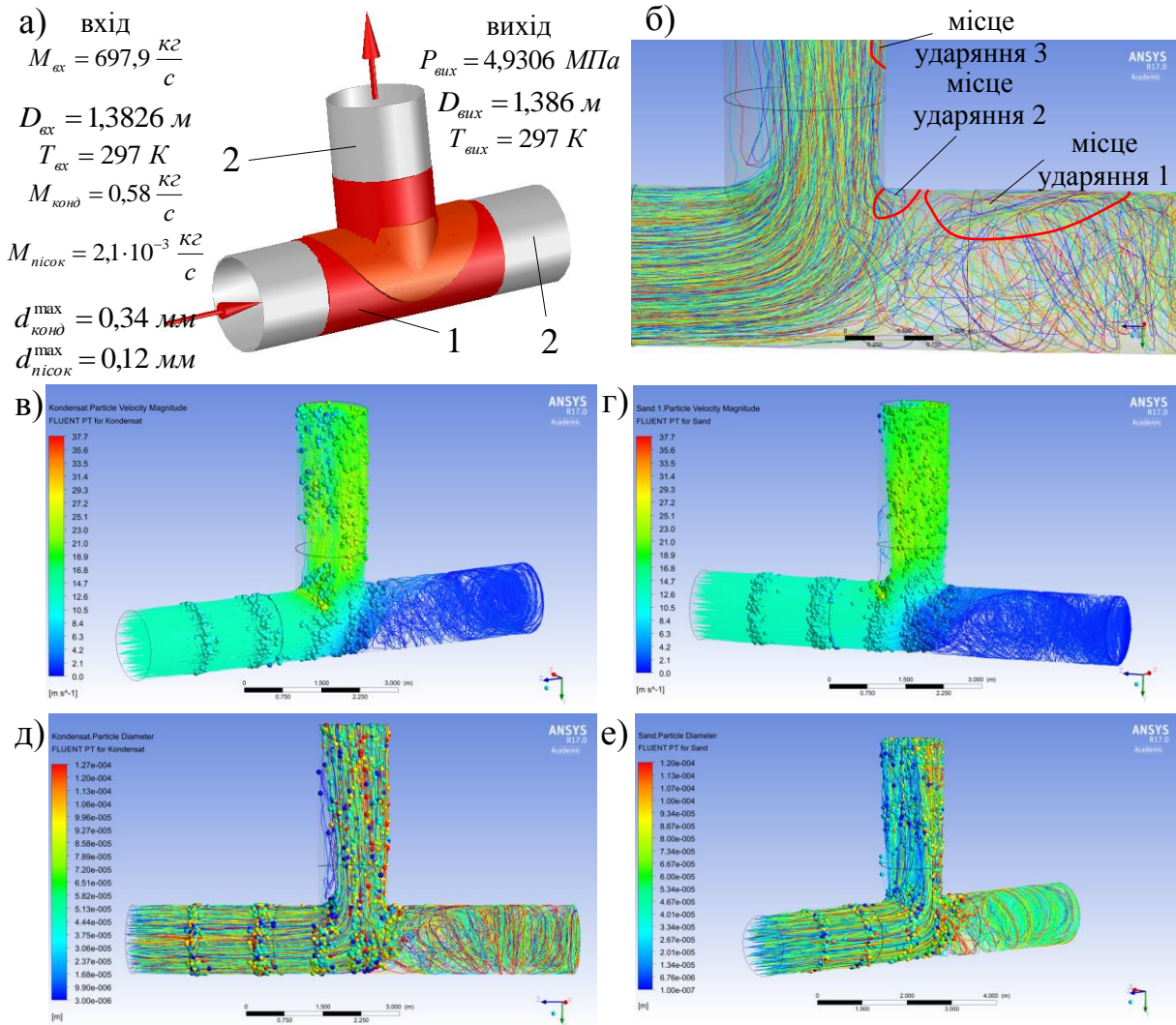
Дослідити динаміку руху багатофазних потоків у вказаних елементах можна комп'ютерним моделюванням тривимірних турбулентних течій в програмному комплексі ANSYS Fluent R17.0 Academic.

Для моделювання динаміки руху багатофазного потоку фасонними елементами обв'язки компресорної станції магістральних газопроводів була вибрана Лагранжова модель DPM оскільки вона дає змогу побудувати траєкторії руху частинок дискретної фази в суцільній фазі, визначити швидкість руху частинок, що є необхідним для визначення місць інтенсивного ударяння рідких та твердих частинок, які переносяться потоком природного газу, до стінки трубопроводу, кутів атаки в місці ударяння, які необхідні для детального дослідження ерозійного зношування стінки труб газопроводів. Крім того Лагранжова модель DPM дає можливість визначити швидкість дискретних фаз у фасонних елементах, точно враховує характер взаємодії частинок дискретної фази зі стінкою та в рамках моделі взаємодії частинок зі стінкою є додаткова модель ерозії стінки, а об'ємна концентрація дискретної фази в природному газі менше 10 %.

Тривимірні моделі фасонних елементів обв'язки компресорної станції, конструкція та геометричні розміри яких ідентичні промисловим зразкам (рисунок 1) були накреслені в геометричному модулі Ansys Fluent – Design Modeler. Геометрія фасонних елементів відповідає ОСТ 102-61 [4] та ГазТУ 102-488/1 [5], які широко розповсюджені в газовій промисловості. Причому фасонні елементи були накреслені з прилеглими ділянками труб, геометричні розміри яких відповідають технічним умовам.

Розглянемо ділянку обв'язки компресорної станції на вході в місці встановлення зварного трійника 1 з підсилюючими накладками (рисунок

1), де газ рухається магістраллю трійника і з магістралі увесь потік спрямовується у відвід трійника. В препроцесорі ANSYS Fluent задавались граничні умови для суцільної і дискретних фаз наведені на рисунку 2, а.



1 – трійник зварний рівнопрохідний з підсилюючими накладками 1420×28 – 1420×28 (ОСТ 102-61 [4]); 2 – труба 1420×18,7; а) – розрахункова схема; б) – траєкторії руху дискретних 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 2 – Результати моделювання руху дискретних фаз рівнопрохідним трійником розміщеним на вході компресорної станції, де газ рухається магістраллю трійника, і з магістралі увесь потік спрямовується у відвід трійника (розробка автора)

Під час проходження рівнопрохідним трійником газовий потік з дискретними фазами змінює свій напрям і перетікає з магістралі у відвід трійника, в результаті чого спостерігається складна картина руху (рисунок 2). Дослідивши траєкторії руху дискретних фаз у магістралі рівнопрохідного трійника встановлено, що у місці зміни напрямку руху газового потоку дугоподібні траєкторії незначної частини дискретної фази, яка рухалась біля нижньої твірної магістралі трійника, виходять за межі проекції (уявного продовження) відводу трійника в внутрішню порожнину його магістралі, що зумовлено силами інерції (рисунок 2, 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 до верхньої твірної магістралі трійника дугоподібною траєкторією вигнутою в праву сторону від відводу трійника і ударяється в стінку магістралі трійника на віддалі більше 0,4 м від відводу трійника і стінку прилеглої до магістралі трійника з правого боку труби (рисунок 2, б, місце ударяння 1). На віддалі 0,4 м від відводу трійника кут атаки складає біля 60° і далі в праву сторону від відводу він поступово зменшується. Швидкість крапель конденсату в місці ударяння 1 складає біля 4 м/с (рисунок 2, в). Такою ж в цьому місці є швидкість твердих частинок (рисунок 2, г). Після ударяння в стінку магістралі трійника ця дискретна фаза в прилеглій до магістралі трійника з правого боку труби закручується і повертається назад в основний потік рухаючись біля бічної поверхні магістралі трійника (рисунок 2, б). Інша частина дискретної фази, яка рухалась далі від нижньої твірної магістралі трійника і дугоподібні траєкторії якої виходять за межі проекції відводу трійника в

внутрішню порожнину його магістралі, рухається до верхньої частини магістралі трійника і біля стінки траєкторії руху рідких і твердих частинок заокруглюються в сторону відводу трійника (основного потоку). При цьому відбувається ударяння рідких і твердих частинок в стінку магістралі трійника. Місцем ударяння є внутрішня поверхня магістралі трійника віддалена від відводу трійника в праву сторону не більше ніж на 0,25 м (рисунок 2, б, місце ударяння 2). Максимальний кут атаки в цьому місці спостерігається на віддалі біля 0,18 м від відводу трійника в праву сторону і він складає біля 70°. В міру наближення чи віддалення від цього місця кут атаки зменшується. Швидкість крапель конденсату та твердих частинок в місці ударяння 2 складає від 5 м/с до 16 м/с (в міру наближення до відводу збільшується) (рисунок 2, в, г). Після ударяння дискретна фаза в потоці суцільної фази рухається в сторону відводу де перетікає у відвід. В результаті чого відбувається відривання потоку від стінки трубопроводу на початку відводу з правої сторони та відтіснення основного потоку в ліву сторону в цьому місці. Дослідивши траєкторії руху дискретних фаз у відводі рівнопрохідного трійника виявлено, що у відводі ударяння дискретної фази відбувається на віддалі більше 0,5 м від закінчення відводу трійника в стінку привареної до відводу трійника труби з правого її боку (рисунок 2, б, місце ударяння 3), а не в стінку відводу трійника. Причиною цього є відтіснення основного потоку у відводі потоком, дугоподібні траєкторії дискретної фази в якому виходять за межі проекції відводу трійника в внутрішню порожнину його магістралі. Кут атаки в місці ударяння дискретної фази з стінкою привареної до відводу трійника труби складає від 3° до 10°.

Швидкість крапель конденсату та твердих частинок в місці ударяння складає біля 21 м/с (рисунок 3, в). Такою ж в цьому місці є швидкість твердих частинок (рисунок 3, г). Біля протилежної стінки відводу трійника і привареної до нього труби відбувається завихрення газового потоку з

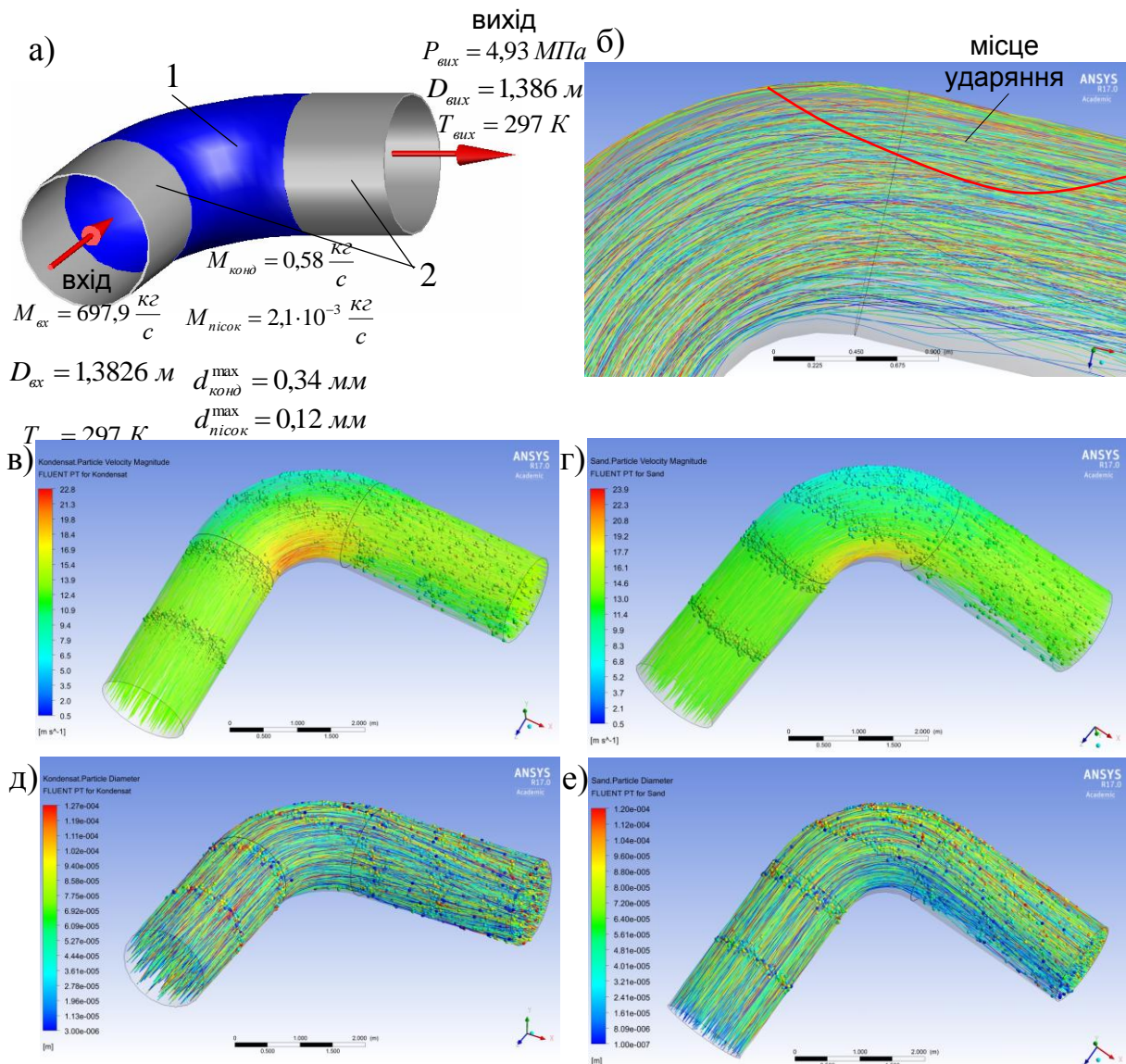
наявними в ньому дискретними фазами. Швидкість частинок в місці завихрення складає від 1 м/с до 10 м/с (рисунок 3, в, г).

З візуалізованих результатів моделювання руху крапель конденсату і твердих частинок різних діаметрів видно, що у відводі рівнопрохідного трійника відбувається нерівномірний перерозподіл дискретних фаз за діаметром (рисунок 3, д, е). Більша частина крапель конденсату і твердих частинок, які мають більші діаметри у відводі трійника рухаються з правого його боку і частина з них ударяється в стінку привареної до відводу трійника труби і призводить до її ерозійного зношування. Дискретні фази меншого діаметра рухаються з протилежної сторони потоку та більша їх частина міститься в завихреному у відводі рівнопрохідного трійника потоці газу.

Розглянемо ділянку обв'язки компресорної станції на вході в місці встановлення відводу 2 з поворотом на кут 90° (рисунок 1). Граничні умови для суцільної і дискретних фаз, які задавались в препроцесорі ANSYS Fluent, наведені на рисунку 3, а.

Як видно з рисунку 3, під час руху газового потоку з дискретними фазами відводом обв'язки компресорної станції з поворотом на кут 90° він змінює свій напрям в результаті чого утворюється складна картина руху. Дослідивши траєкторії руху дискретних фаз у відводі встановлено, що у місці повороту відводу з опуклого боку більша частина крапель конденсату і твердих частинок (до 60 %) рухаються в потоці суцільної фази вздовж ліній течії траєкторіями паралельними стінці труби з незначним наближенням до стінки в місці повороту без ударяння до неї. Менша частина крапель конденсату і твердих частинок в місці повороту відводу рухається траєкторією радіус якої більший за радіус відводу в результаті чого відбувається ударяння крапель конденсату і твердих частинок до стінки відводу та привареної до нього з правого боку труби (рисунок 3, 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 в кінці відводу він біля 40° , а вздовж привареної до відводу труби він поступово зменшується. Швидкість крапель конденсату в місці ударяння, де закінчується відвід, складає біля $8,5 \text{ м/с}$, а на початку привареної до відводу труби досягає 14 м/с (рисунок 3, в). Такою ж в цих місцях є швидкість твердих частинок (рисунок 3, г).



1 – відвід 90° 1420×24 (ГазТУ 102-488/1 [5]); 2 – труба $1420 \times 18,7$; а) – розрахункова схема;

б) – траєкторії руху дискретної 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 – Результати моделювання руху дискретної фази відводом розміщеним на вході компресорної станції (розробка автора)

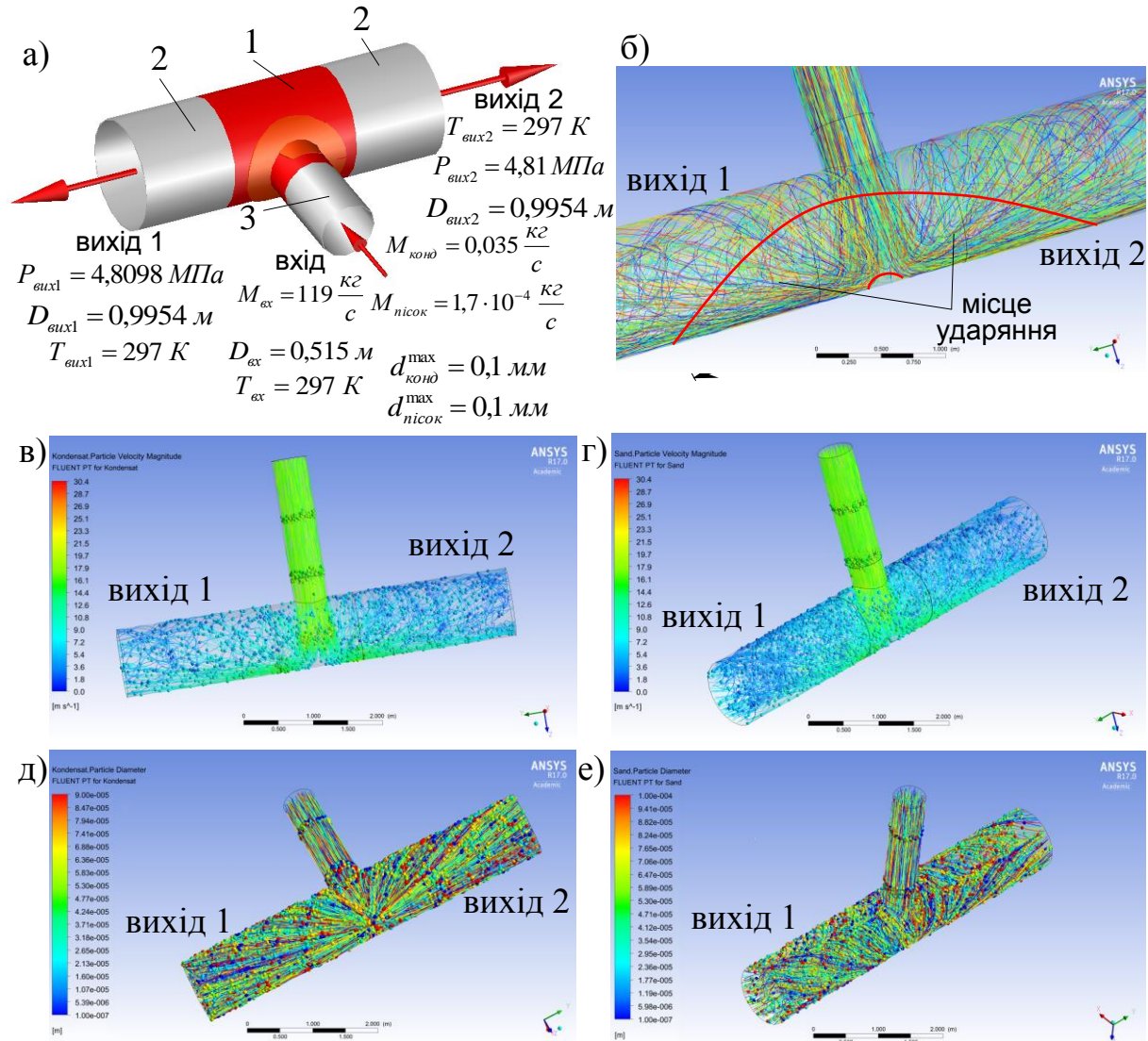
У відводі відбувається перебудова профілю швидкостей як суцільної так і дискретної фази в повздовжніх і в поперечних перерізах (рисунок 3, в, г). Вздовж вгнутого боку дискретні фази пришвидшуються до 22 м/с, а вздовж опуклого – уповільнюються до 7 м/с. Протилежна картина спостерігається на виході з відводу – вздовж вгнутого боку дискретна фаза уповільнюється до 6 м/с, а вздовж опуклого пришвидшується до 14 м/с (рисунок 3, в, г). На початку повороту з вгнутого боку відводу відбувається відривання дискретної фази від стінки труби з збільшенням віддалі між траєкторіями руху дискретної фази і стінкою труби до 0,1 м. На виході з відводу відбувається незначне завихрення газового потоку з наявними в ньому дискретними фазами з наближенням траєкторій руху дискретної фази до стінки труби.

Також у відводі відбувається нерівномірний перерозподіл дискретних фаз за діаметром (рисунок 3, д, е). Більша частина крапель конденсату і твердих частинок, які мають більші діаметри рухаються з опуклого боку відводу і частина з них ударяється в стінку відводу і привареної до відводу труби, що призводить до ерозійного зношування. Більша частина дискретні фази меншого діаметра рухаються з вгнутого боку відводу.

Розглянемо ділянку обв'язки компресорної станції на виході блоку очищення газу в місці встановлення зварного трійника 3 з підсилюючими накладками (рисунок 1), де газ рухається відводом трійника і з відводу спрямовується у дві сторони магістралі трійника (в сторону ГПА № 1 і

ГПА № 2). Граничні умови для суцільної і дискретних фаз, які задавались в препроцесорі ANSYS Fluent, наведені на рисунку 4, а.

Як видно з рисунку 4, під час руху газу з дискретними фазами трійником 3 обв'язки компресорної станції (рисунок 1) відбувається роздвоєння газового потоку і його спрямування у дві протилежні сторони магістралі трійника в результаті чого утворюється складна картина руху.



1 – трійник зварний з підсилюючими накладками 1020×18 – 529×10 (ОСТ 102-61 [4]); 2 – труба 1020×12,3; 3 – труба 529×7; а) – розрахункова схема; б) – траєкторії руху дискретної 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 4 – Результати моделювання руху дискретної фази трійником обв'язки компресорної станції на виході блоку очищення, де газ рухається відводом трійника і з відводу спрямовується у дві сторони магістралі трійника (розробка автора)

З відводу трійника газовий потік з дискретними фазами перетікає у магістраль трійника, причому до входу у відвід трійника (в прилеглий до нього трубі) газовий потік з рідкими і твердими частинками починає прискорюватись. Таке прискорення газового потоку і дискретних фаз продовжується до повздовжньої осі магістралі трійника, де швидкість окремих крапель конденсату і твердих частинок досягає 20 м/с (рисунок 4, в, г). Причому до повздовжньої осі магістралі трійника діаметр газового потоку з дискретними фазами, який перетікає у магістраль з відводу трійника, рівний внутрішньому діаметру відводу трійника. Починаючи з осі магістралі трійника газовий потік з дискретними фазами, який перетік з відводу трійника, починає сповільнюватись і на віддалі 0,2-0,3 м від стінки магістралі трійника навпроти відводу газовий потік і рідкі та тверді частинки в магістралі трійника розходяться в різні сторони на кут 360° в результаті чого їх швидкість знижується до 10 м/с (рисунок 4, в, г). За місцем розходження газового потоку біля стінки магістралі трійника навпроти відводу швидкість рідких та твердих частинок знижується до 1 м/с (виникає своєрідний “застійне склепіння”) (рисунок 4, в, г). Газовий потік з дискретними фазами, який розійшовся в різні сторони в магістралі трійника поверхнею “застійного склепіння” направляється до стінок магістралі трійника, де відбувається ударяння рідких і твердих частинок в стінку магістралі трійника (рисунок 4, б). Місце ударяння має форму викривленого внутрішньою поверхнею магістралі трійника кільця

шириною $t = 1,5 \text{ м}$ навколо “застійного склепіння” (рисунок 4, б). Максимальний кут атаки в місці ударяння спостерігається біля внутрішнього кола кільця і він складає біля 80° . В міру віддалення від внутрішнього кола і наближення до зовнішнього кола кільця кут атаки зменшується (рисунок 4, б). Так в середній частині кільця кут атаки складає біля 30° . Швидкість крапель конденсату та твердих частинок в місці ударяння біля внутрішнього кола кільця (“застійного склепіння”) є мінімальною і складає 2 м/с в середній частині кільця збільшується до $16,5 \text{ м/с}$ і біля зовнішнього кола кільця складає 10 м/с (рисунок 4, в, г). Досліджуючи траєкторії руху дискретної фази в суцільній було помічено, що газовий потік з рідкими і твердими частинками від основи “застійного склепіння” рухається в усіх напрямках вздовж стінок магістралі трійника (на кут 360°) (рисунок 4, б). Таким чином, фактично весь газовий потік з дискретними фазами у магістралі трійника вздовж стінки по обидві сторони від відводу трійника (площиною симетрії є площина повздовжнього перерізу трійника) рухається в сторону відводу під різними кутами (за винятком незначної частинки потоку, яка рухається в різні сторони від відводу трійника вздовж твірної магістралі трійника, розміщеної навпроти відводу) (рисунок 4, е). Наблизившись до твірної магістралі трійника, розміщеної з сторони відводу, газовий потік з дискретними фазами, який рухався в сторону відводу з однієї сторони відводу (площиною симетрії є площина повздовжнього перерізу магістралі і відводу трійника), зустрічається з газовим потоком з дискретними фазами, який рухався з другої сторони відводу, в результаті чого відбувається закручування газового потоку з рідкими і твердими частинками, і він розділяється на два закручені потоки з дискретними фазами, які рухаються в сторону ГПА № 1. Аналогічне розділення і закручування потоку газу відбувається і в напрямі ГПА № 2. Фактично в одному поперечному перерізі магістралі трійника і труби, привареної до

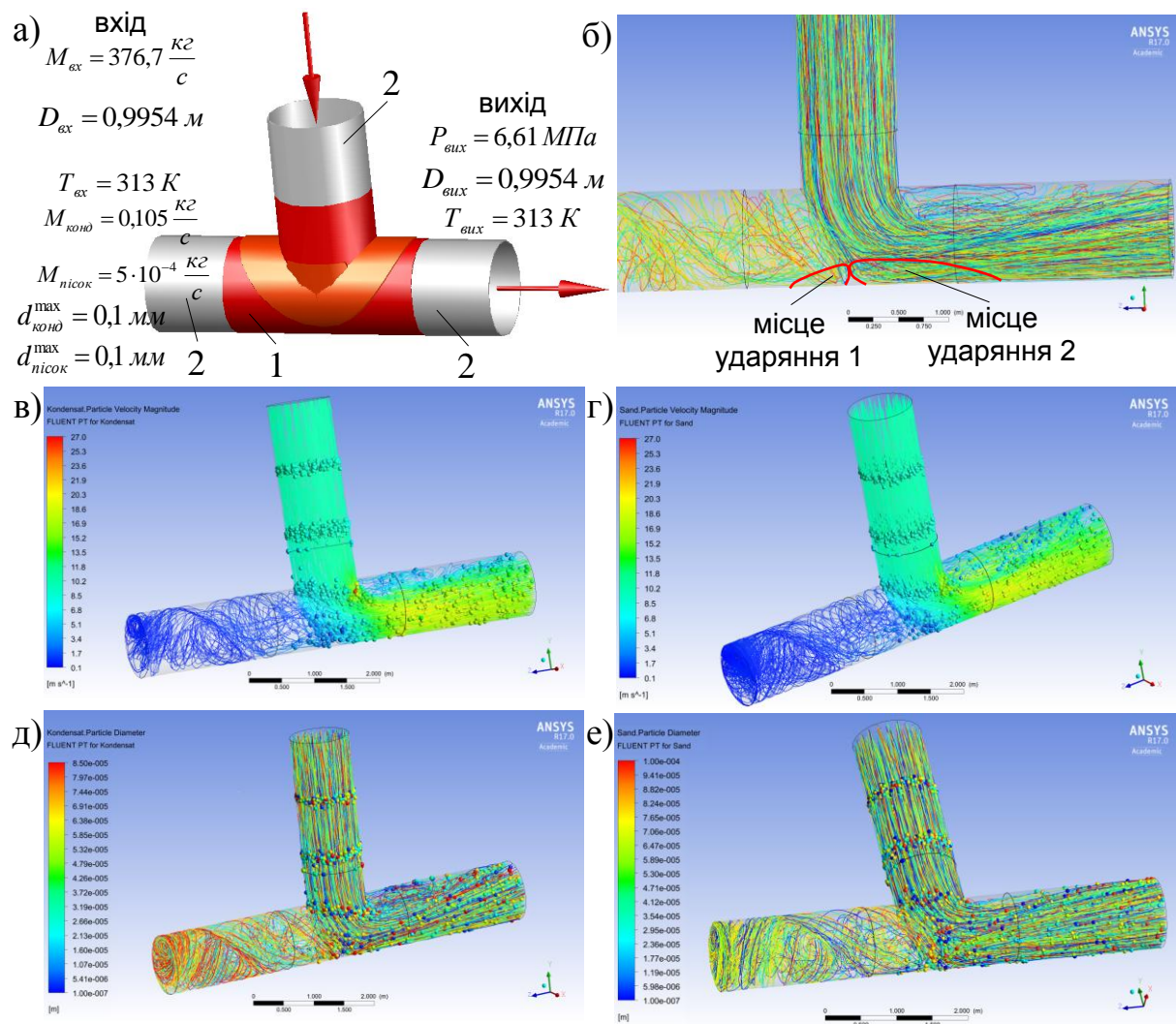
нього, є два закручені потоки, які займають половину площі поперечного перерізу кожен (рисунок 4, е). Швидкість рідких і твердих частинок в закрученому потоці газу значно знижується до 1-5 м/с (рисунок 4, в, г).

Досліджуючи траєкторії руху крапель конденсату і твердих частинок забарвлених в кольори, що відповідають їх діаметрам встановлено, що у трійнику 3 обв'язки компресорної станції (рисунок 1) відбувається рівномірний розподіл крапель конденсату і твердих частинок різного діаметра у всій його внутрішній порожнині (рисунок 4, д, е).

Розглянемо ділянку обв'язки компресорної станції на виході ГПА № 1 (рисунок 1) в місці встановлення зварного трійника 4 з підсилюючими накладками, де газ рухається відводом трійника і з відводу увесь потік спрямовується у одну сторону магістралі трійника. Граничні умови для суцільної і дискретних фаз, які задавались в препроцесорі ANSYS Fluent, наведені на рисунку 5, а.

Коли газовий потік з дискретною фазою проходить рівнопрохідним трійником 4 обв'язки компресорної станції розміщеним на виході ГПА № 1 (рисунок 1) він змінює свій напрям і перетікає з відводу у праву сторону магістралі трійника в результаті чого утворюється складна картина руху (рисунок 5). Дослідивши траєкторії руху дискретних фаз у рівнопрохідному трійнику встановлено, що у місці зміни напрямку потоку у магістралі трійника навпроти відводу рідкі і тверді частинки рухаються дугоподібними траєкторіями і перетікають у праву сторону магістралі трійника. При цьому потік газу з рідкими і твердими частинками, який перетікає у праву сторону магістралі трійника у магістралі і у привареній до неї трубі рухається, в основному, вздовж стінки навпроти відводу і відбувається ударяння дискретної фази в стінку магістралі трійника. Місцем ударяння є стінка магістралі трійника навпроти відводу розміщена за місцем перетину осі відводу трійника з стінкою його магістралі в праву сторону (рисунок 5, б, місце ударяння 1). Кут атаки неподалік місця

перетину осі відводу трійника з стінкою його магістралі є максимальним і складає біля 50° (рисунок 5, б). Швидкість крапель конденсату та твердих частинок в цьому місці є мінімальною і складає 2 м/с (рисунок 5, в, г). В міру віддалення від місця перетину осі відводу трійника з стінкою його магістралі в праву сторону кут атаки зменшується (рисунок 5, б), а швидкість крапель конденсату та твердих частинок збільшується і досягає $18,5 \text{ м/с}$ в місці закінчення магістралі трійника (рисунок 5, в, г).



1 – трійник зварний рівнопрохідний з підсилюючими накладками 1020×20 – 1020×20 (ОСТ 102-61 [4]); 2 – труба $1020 \times 12,3$; а) – розрахункова схема; б) – траєкторії руху дискретної 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 5 – Результати моделювання руху дискретної фази рівнопрохідним трійником на виході ГПА № 1, де газ рухається відводом трійника, і з відводу увесь потік спрямовується у одну сторону магістралі трійника (розробка автора)

Біля верхньої стінки з правого боку магістралі трійника відбувається завихрення газового потоку з дискретною фазою, що зумовлене відриванням потоку від стінки в місці приварювання відводу до магістралі трійника. Швидкість газу з рідкими і твердими частинками в цьому місці складає 0,5-6 м/с (рисунок 5, в, г).

Дослідивши траєкторії руху дискретних фаз у рівнопрохідному трійнику також виявлено, що у місці зміни напрямку потоку біля нижньої частини магістралі трійника навпроти відводу незначна частина рідких і твердих частинок відриваються від основного потоку і дугоподібними траєкторіями рухаються у ліву сторону магістралі трійника, що призводить до їх ударяння в стінку магістралі трійника. Місцем ударяння є стінка магістралі трійника навпроти відводу розміщена за місцем перетину осі відводу трійника з стінкою його магістралі в ліву сторону (рисунок 5, б, місце ударяння 2). Кут атаки неподалік місця перетину осі відводу трійника з стінкою його магістралі є максимальним і складає біля 65° (рисунок 5, б). В міру віддалення від місця перетину осі відводу трійника з стінкою його магістралі в праву сторону кут атаки зменшується (рисунок 5, б). Швидкість крапель конденсату та твердих частинок в цьому місці складає 3 м/с (рисунок 5, в, г). Після ударяння дискретна фаза закручується і повертається назад в основний потік рухаючись верхньою і середньою частиною магістралі трійника (рисунок 5).

Досліджуючи траєкторії руху крапель конденсату і твердих частинок забарвлених в кольори, що відповідають їх діаметрам встановлено, що у рівнопрохідному трійнику 4 обв'язки компресорної станції розміщеному на виході ГПА № 1 (рисунок 1) 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 5, д, е).

Висновок. Лагранжовим підходом в програмному комплексі ANSYS Fluent вперше досліджено динаміку руху багатофазних потоків фасонними елементами обв'язки компресорної станції магістрального газопроводу конструкція та геометричні розміри яких ідентичні промисловим зразкам. Отримано розраховані траєкторії руху крапель конденсату і твердих частинок в потоці природного газу, які забарвлювались в кольори, що відповідають їх швидкості та діаметру відповідно до шкали значень, що дало змогу зібрати вичерпні дані про рух багатофазних потоків фасонними елементами обв'язки компресорної станції. Виявлено місця інтенсивного ударяння крапель конденсату та твердих частинок, які переносяться потоком газу, до стінки трубопроводу, місця завихрення дискретних фаз, відривання потоку з рідкими і твердими частинками від стінки досліджуваних фасонних елементів. Визначено швидкість рідких і твердих частинок, кути атаки діаметри крапель конденсату та твердих частинок в місці ударяння. Такі дослідження відкривають перспективу для повного і всебічного дослідження ерозійного зношування фасонними елементами обв'язки компресорної станції.

Література:

1. Abdolkarimi V. CFD modeling of particulates erosive effect on a commercial scale pipeline bend / V Abdolkarimi, R Mohammadikhah // *ISRN Chemical Engineering*. – Volume 2013, Article ID 105912, 10 pages. (<http://dx.doi.org/10.1155/2013/105912>).

2. Kuan B. CFD simulation of dilute gas-solid two-phase flows with different solid size distributions in a curved 90° duct bend / B. Kuan // *The Australian and New Zealand Industrial and Applied Mathematics*. – Volume 46. – 2005. – P. 744-763.

3. Azimian M. Investigation of hydroabrasion in slurry pipeline elbows and T-junctions / M. Azimian, H.-J. Bart // *Journal of Energy and Power Engineering*. – № 8. – 2014. – P. 65-78.

4. Отраслевой стандарт: ОСТ 102-61-81. Детали магистральных трубопроводов стальные приварные на Ру до 10,0 МПа (100 кгс/см²). Тройники сварные с усиливающими накладками. Размеры [Текст] : нормативно-технический материал. – М. : Министерство строительства предприятий нефтяной и газовой промышленности, 1981. – 32 с.

5. Технические условия: ГазТУ 102-488/1-05. Детали соединительные для магистральных газопроводов на Ру до 9,8 МПа (100 кгс/см²) [Текст] : нормативно-технический материал. – М. : ОАО “Трубодеталь”, 2005. – 58 с.