

CFD МОДЕЛЮВАННЯ ЕРОЗІЙНОГО ЗНОШУВАННЯ ФАСОННИХ ЕЛЕМЕНТІВ ЛІНІЙНОЇ ЧАСТИНИ МАГІСТРАЛЬНОГО ГАЗОПРОВОДУ

Т. І. Марко

ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (0342) 727138

e-mail: s r g g @ n u n g . e d u . u a

Здійснено 3D моделювання фасонних елементів лінійної частини магістрального газопроводу, де відбувається складний рух багатозфазних потоків, зміна напрямку їх руху, завихрення, ударення дискретних фаз до стінки трубопроводу, ерозійне зношування стінки труби.

На основі Лагранжевого підходу (модель *Discrete Phase Model*) розроблено методику CFD моделювання ерозійного зношування фасонних елементів лінійної частини магістрального газопроводу (відводів, трійників) із застосуванням програмного комплексу ANSYS Fluent R17.0 Academic. Математична модель базується на розв'язанні системи рівнянь Нав'є-Стокса, нерозривності, руху дискретних фаз, рівняння Фінні, замкнених двопараметричною $k - \varepsilon$ моделлю турбулентності Лаундера-Шарма з відповідними початковими та граничними умовами. У трійнику моделювання виконували для руху газу магістраллю трійника і перетікання частини потоку у відвід трійника.

Результати моделювання були візуалізовані в постпроцесорі ANSYS Fluent R17.0 Academic побудовою полів концентрації дискретної фази та полів швидкості ерозійного зношування на контурах фасонних елементів. Дослідивши отримані результати, виявлено місця інтенсивного ударення рідких і твердих частинок до стінки фасонних елементів лінійної частини магістрального газопроводу, місця інтенсивного ерозійного зношування стінки трубопроводу.

Такі результати відкривають можливість для оцінювання міцності фасонних елементів лінійної частини магістрального газопроводу та визначення їх залишкового ресурсу.

Ключові слова: відвід, дискретна фаза, рівняння Фінні, підхід Лагранжа, поля концентрації, трійник.

Проведено 3D моделирование фасонных элементов линейной части магистрального газопровода, где происходит сложное движение многофазных потоков, изменение направления их движения, завихрения, ударение дискретных фаз в стенку трубопровода, эрозионный износ стенки трубы.

На основе Лагранжевого подхода (модель *Discrete Phase Model*) разработана методика CFD моделирования эрозионного износа фасонных элементов линейной части магистрального газопровода (отводов, тройников) с применением программного комплекса ANSYS Fluent R17.0 Academic. Математическая модель базируется на решении системы уравнений Навье-Стокса, неразрывности, движения дискретных фаз, уравнения Финни, замкнутой двухпараметрической $k - \varepsilon$ моделью турбулентности Лаундера-Шарма с соответствующими начальными и граничными условиями. В тройнике моделирования выполнялось для движения газа магистраллю тройника и перетекание части потока в отводе тройника.

Результаты моделирования были визуализированы в постпроцессоре ANSYS Fluent R17.0 Academic построением полей концентрации дискретной фазы и полей скорости эрозионного износа на контурах фасонных элементов. В результате исследования выявлены места интенсивного ударения жидких и твердых частиц в стенку фасонных элементов линейной части магистрального газопровода, место интенсивного эрозионного износа стенки трубопровода.

Такие результаты открывают возможности для оценки прочности фасонных элементов линейной части магистрального газопровода и определения их остаточного ресурса.

Ключевые слова: отвод, дискретная фаза, уравнение Финни, подход Лагранжа, поля концентрации, тройник.

3D modeling of the main gas pipeline linear part shaped elements was carried out, where a complex movement of multiphase flow is present, as well as their direction change, swirl, collision of discrete phases with the pipeline wall, pipe wall erosive wear.

Based on Lagrange approach (*Discrete Phase Model*), CFD modeling methods of erosive wear of the main gas pipeline linear part shaped elements were developed (elbows, T-junctions) using software package ANSYS Fluent R17.0 Academic. The mathematical model is based on solving the Navier-Stokes system of equations, continuity, discrete phase movement, Finney equation, closed with Launder-Sharma two-parameter $k - \varepsilon$ turbulence model with appropriate initial and boundary conditions. In T-junctions modeling was performed for gas movement through T-junction line with a part of the gas flow passing to the T-junction elbow.

The modeling results were visualized in postprocessor ANSYS Fluent R17.0 Academic by building discrete phase concentration fields and erosive wear rate on the shaped element contours. After the study results, the locations of liquid and solid particles collision with the walls of the main gas pipeline linear part shaped elements and location of the pipeline wall intensive erosive wear were identified.

These results make it possible to evaluate the strength of the main gas pipeline linear part shaped elements and determine their residual life.

Keywords: elbow, discrete phase, Finney equation, Lagrange approach, concentration fields, T-junction.

Вступ

Лінійна частина магістральних газопроводів складається з прямих ділянок трубопроводу, кривих гарячого гнугтя (відводів), трійників, перекривної арматури. У трійниках, кривих гарячого гнугтя відбувається складний турбулентний рух газового потоку та зміна його напрямку, 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. Якщо лінійну частину магістральних газопроводів не контролювати належним чином, то ерозійне зношування може призвести до розриву газопроводу і втрати продукту. Найнебезпечнішим є ерозійне зношування стінки труби газопроводів, термін експлуатації яких перевищує 35-40 років (переважна більшість трубопроводів газотранспортної системи України). Тому всебічне вивчення процесу ерозійного зношування стінки труби магістральних газопроводів є особливо актуальним.

Для оцінки працездатності ерозійно зношених фасонних елементів лінійної частини та розрахунку їх залишкового ресурсу треба знати швидкість ерозійного зношування, місця ерозійного зношування фасонних елементів та геометричну форму дефектної їх внутрішньої поверхні. Наявність такої інформації дає змогу удосконалити конструкції фасонних елементів для збільшення терміну їх служби.

Сьогодні вирішити такі задачі в найкоротші терміни можна сучасним програмним комплексом комп'ютерного моделювання ANSYS Fluent, який дає змогу моделювати ерозійне зношування фасонних елементів складної геометрії, виявляти місця ерозійного зношування фасонних елементів магістральних газопроводів та розраховувати величину ерозійного зношування.

Аналіз сучасних закордонних і вітчизняних досліджень і публікацій

Ерозійне зношування фасонних елементів відбувається в трубопроводах різного призначення (газопроводах, нафтопроводах, нафтопродуктопроводах, азотопроводах, паропроводах атомних і теплових електричних станцій, пневмотранспорті тощо). Це вимагає вивчення процесів ерозійного зношування стінки труби.

Комп'ютерним моделюванням ерозійного зношування фасонних елементів трубопроводів займаються багато сучасних науковців. Їхні результати підтверджують, що такі програмні комплекси є ефективним засобом для виявлення місць та розрахунку величини ерозійного зношування фасонних елементів трубопроводів.

Зокрема, Abdolkarimi V. та Mohammadikhah R. [1] комп'ютерним моделюванням у програмному комплексі ANSYS Fluent 6.3 досліджували ерозійне зношування відводу газопроводу зовнішнім діаметром 1420 мм з кутом

повороту 90°, який знаходився під тиском 8 МПа. Масова витрата газу на вході становила 3780 кг/с. Максимальне ерозійне зношування було виявлене між 40° і 65° кутами згину відводу; розрахована максимальна швидкість ерозійного зношування становила 3,2 мм/с. Порівнявши результати чисельних розрахунків з результатами експериментальних вимірювань, автори дійшли висновку, що CFD (computational fluid dynamics) моделювання є потужним інструментом для оцінки ерозійного зношування різних промислових об'єктів.

В магістерській дисертації А. Abdua (Blekinge Institute of Technology Karlskrona, Sweden) [2] комп'ютерним моделюванням досліджував вплив швидкості удару піску і крапель конденсату на ерозійне зношування відводів газопроводів внутрішнім діаметром 50,8 мм з кутом повороту 90°. Він задавав три різних швидкості рідких і твердих частинок – 12 м/с, 19 м/с, і 28 м/с. За результатами моделювання встановлено, що швидкість частинок є пропорційною до швидкості ерозійного зношування і суттєво впливає на середню і максимальну швидкості ерозійного зношування. Також було помічено, що густина крапель рідини впливає на місцезнаходження максимального ерозійного зношування. Так, максимальне ерозійне зношування було виявлене майже посередині відводу, коли густина крапель рідини задавалась малою. Зі збільшенням густини крапель рідини місцезнаходження максимального ерозійного зношування зміщувалось в бік виходу потоку з відводу і на початок прилеглої до нього труби.

М. Azimian і Н. Bart [3] комп'ютерним моделюванням досліджували швидкість ерозійного зношування відводу і трійника діаметром 25 мм. Робочим середовищем була рідина з твердими частинками. Були виявлені місця ерозійного зношування фасонних елементів, значення максимальної швидкості ерозійного зношування та встановлено, що у випадку транспортування трубопроводом рідини з твердими частинками ерозійне зношування трійника є більшим, ніж відводу. Q. Mazumder [4] та Н. Zhang, Y. Tan і D. Yang [5] комп'ютерним моделюванням досліджували залежність величини та місцезнаходження ерозійного зношування відводу і U-подібного згину трубопроводу від швидкості транспортованого ними повітря і води, швидкості та розмірів частинок піску. Було виявлено, що в відводі та U-подібному згині трубопроводу максимальне ерозійне зношування розташоване приблизно на 40° нижче від місця прямого ударяння частинок. Причому місцезнаходження максимального ерозійного зношування відводу залежить від швидкості дискретної фази. Зі збільшенням швидкості дискретної фази місцезнаходження максимального ерозійного зношування відводу переміщується вниз за потоком. Якщо трубопроводом транспортується повітря, то і міру збільшення розміру зерен піску місцезнаходження максимального ерозійного зношування U-подібного згину наближається до входу потоку в U-подібний згин, а якщо трубопроводом тран-

спортується вода, то і міру збільшення розміру піску місцезнаходження максимального ерозійного зношування віддаляється від входу потоку в U-подібний згин. Ті ж ефекти спостерігаються для різних швидкостей робочих середовищ. Також було виявлено, що швидкість повітря і води не чинять суттєвого впливу на місцезнаходження ерозійного зношування U-подібного згину трубопроводу.

Hongjun Z. та Yuanhua L. [6] комп'ютерним моделюванням у програмному комплексі ANSYS Fluent досліджували вплив геометричних параметрів трубопроводу, параметрів потоку та характеристик дискретної фази (пісок) на величину ерозійного зношування відводів азотопроводів. Встановлено, що чим менший діаметр трубопроводу, менший кут згину відводу, більша швидкість потоку, більша об'ємна частка піску та більший діаметр зерна піску, тим величина ерозійного зношування відводів азотопроводів є більшою. Подібні дослідження в пневмотранспорті порошку антрацит, який є надзвичайно абразивним, виконувала Dogina I. [7]. Комп'ютерним моделюванням досліджено, що величина ерозійного зношування відводу пневмопроводу залежить від співвідношення між радіусом його згину і діаметром труби та від швидкості потоку повітря з порошком антрацит. Виявлено, що найсуттєвішим чинником, який впливає на величину ерозійного зношування відводу, є швидкість частинок порошку антрацит в потоці повітря. Hadžiahmetović H. [8] та Tarek M. [9] результати комп'ютерного моделювання ерозійного зношування відводів пневмопроводів круглого та квадратного перерізів порівнювали з експериментальними даними і переконались в їх збіжності, особливо в місцях максимального ерозійного зношування. Було встановлено, що найбільший вплив на величину ерозійного зношування має швидкість потоку та розмір частинок. Дуже маленькі частинки (діаметром менше 10 мкм) рухаються з основним потоком і практично не ударяються до стінки трубопроводу, оскільки вони легкі. Крім того, їх ударення відбувається при малих кутах атаки, що не призводить до значного ерозійного зношування. Більші частинки, як правило, ударяються до стінки. Таким чином, чим більша швидкість потоку і більший розмір часток, тим інтенсивнішим буде ерозійне зношування.

Висвітлення невирішених раніше частин загальної проблеми, якій присвячується дана стаття

Інформацію про ерозійне зношування фасонних елементів лінійної частини магістральних газопроводів отримують їх зовнішнім обстеженням ультразвуковими дефектоскопами, що вимагає спеціальних дозволів, фінансових та часових витрат, розкопування ділянок газопроводів. Місця обстежень фасонних елементів лінійної частини магістральних газопроводів на ерозійне зношування не передбачені жодним українським нормативним документом, і працівники, які виконують обстеження, визнача-

ють їх на основі нічим не обґрунтованих логічних міркувань, набутого досвіду. Все це не завжди дає змогу виявити місця максимальної ерозії, що є не менш важливим, ніж точне визначення величини ерозійного зношування.

Формулювання цілей статті. Завданням дослідження є розроблення науково-методологічної основи комплексного числового моделювання ерозійного зношування фасонних елементів лінійної частини магістральних газопроводів. Виявлення місць ерозійного зношування фасонних елементів та розрахунок величини ерозійного зношування.

Виклад основного матеріалу

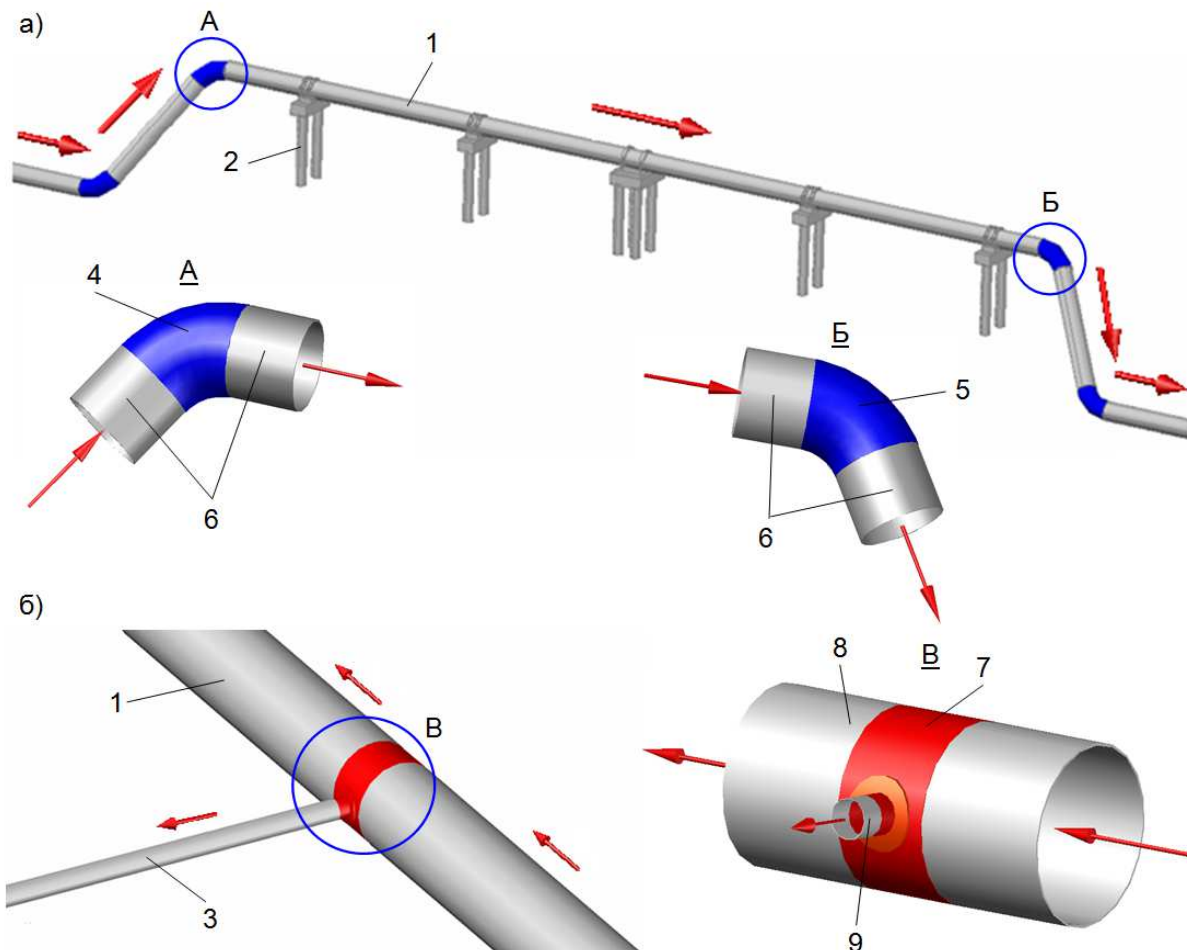
Відводи гарячого гноття містять Г-, Z- і П-подібні компенсатори надземних переходів газопроводів, також вони є в місцях різких переломів рельєфу місцевості, поворотів траси трубопроводу. У відводах Г- і П-подібних компенсаторів відбувається зміна напрямку потоку продукту на 90°, а в відводах Z-подібних компенсаторів потік змінює напрям на 60° (рисунк 1, а). У трійниках на початку кожного відводу від магістралі газ рухається магістрально трійника, звідки частина потоку спрямовується у відвід трійника (рисунк 1, б).

Відомо, що транспортований магістральними газопроводами природний газ містить рідкі та тверді частинки (забруднення). До рідкої дискретної фази відносять 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.

Причини наявності таких забруднень у внутрішній порожнині газопроводів різноманітні. Насамперед, це неякісне очищення газу на промислі та компресорних станціях, конденсація рідини з газового потоку за сприятливих термодинамічних умов під час перекачування газу газопроводом, винесення мастила з підшипників нагнітачів газоперекачувальних агрегатів, неякісне очищення внутрішньої порожнини газопроводу перед здаванням у експлуатацію тощо. Хімічна реакція між металом труби і рідкими забрудненнями, накопиченими у пониженних місцях газопроводів, призводять до внутрішньотрубної корозії і утворення твердих частинок.

Рухаючись фасонними елементами лінійної частини магістральних газопроводів, рідкі та тверді частинки ударяються до стінки трубопроводу, що призводить до ерозійного зношування газопроводу. Для своєчасного та якісного обстеження фасонних елементів лінійної частини магістральних газопроводів, удосконалення існуючих конструкцій треба знати місця їх максимального ерозійного зношування та прогнозувати його величину.

Максимально повно дослідити ерозійне зношування фасонних елементів лінійної частини магістральних газопроводів можна комп'ютерним моделюванням тривимірних ту-



а) – надземний перехід; б) – відвід від магістралі; 1 – магістральний трубопровід; 2 – опора; 3 – відвід; 4, 5 – відвід 60°1420×28 (ГазТУ 102-488/1-05 [10]); 6 – труба 1420×21,5; 7 – трійник зварний з підсилюючою накладкою 1420×20 – 325×9 (ОСТ 102-61 [11]); 8 – труба 1420×18,7; 9 – труба 325×8

Рисунок 1 – Розташування фасонних елементів

рбулентних течій в програмному комплексі ANSYS Fluent R17.0 Academic. Закладені в цьому комплексі математичні моделі та числові алгоритми відповідають світовому рівню.

Для моделювання ерозійного зношування в ANSYS Fluent закладено підхід Лагранжа (модель DPM (Discrete Phase Model – модель дискретної фази)). В основі підходу Лагранжа лежить розгляд руху окремих частинок (або груп частинок) дискретної фази. Лагранжева модель DPM дає змогу дослідити траєкторії руху частинок дискретної фази в суцільній фазі розв'язанням диференційного рівняння руху частинок. Дискретна фаза може бути як твердою, так і бульбашками в рідині чи 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 дискретної фази зі стінкою. В рамках моделі взаємодії дискретної фази зі стінкою є додаткова модель ерозії стінки. Крім того, в рамках моделі DPM набагато простіше

враховувати вторинний розпад дискретної фази (якщо це краплі або бульбашки). Недоліком моделі DPM є обмеження на локальну об'ємну концентрацію частинок (менше 10 %).

Комплексна процедура чисельного моделювання складається з трьох етапів:

- моделювання газового потоку (суцільної фази) в фасонних елементах газопроводів;
- моделювання руху рідких і твердих частинок в газовому потоці фасонними елементами газопроводів;
- розрахунок ерозійного зношування фасонних елементів газопроводів.

Рух суцільної фази в ANSYS Fluent моделюється шляхом чисельного розв'язування систем рівнянь, які описують найзагальніший випадок руху газоподібного середовища. Такими є рівняння Нав'є – Стокса (1), яке виражає собою закон збереження імпульсу, (або Рейнольдса (2), якщо потік турбулентний) і нерозривності (3), яке виражає собою закон збереження маси

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

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \bar{u}_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \bar{u}_i \bar{u}_j) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \bar{u}_i' \bar{u}_j') = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \right) + f_i; \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j) = 0, \quad (3)$$

де x_i, x_j – координати;
 t – час;
 u_i, u_j – компоненти швидкості;
 ρ – густина газу;
 μ – молекулярна динамічна в'язкість газу;
 f_i – доданок, який враховує дію масових сил;
 p – тиск;
 \bar{u}_i – усереднені за часом значення швидкостей;
 \bar{u}_i' – складові пульсації швидкості [12].

Граничними умовами, як правило, є розподіл усіх складових швидкості у вхідному перерізі і рівність нулю перших похідних (у напрямку потоку) складових швидкості у вихідному перерізі. Тиск у рівняннях тільки у вигляді перших похідних, тому потрібно вказати тиск тільки в будь-якій одній точці розрахункової геометрії.

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

- рівняння перенесення турбулентної енергії k

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla(\rho u k) = \nabla \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right) + \mu_t G - \rho \varepsilon; \quad (4)$$

- рівняння перенесення турбулентної дисипації ε

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \nabla(\rho u \varepsilon) = \nabla \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right) + C_1 \frac{\varepsilon}{k} \mu_t G - C_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k}, \quad (5)$$

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

C_2 – коефіцієнт, рівний $C_2=1,92$.

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

Речовина, яка присутня в потоці суцільної фази у вигляді дискретної фази, не утворює суцільне середовище, а окремі частинки взаємодіють з потоком суцільної фази і між собою. Для моделювання руху дискретної 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 дискретної фази є сферами. Сили, які діють на частинку, обумовлені різницею швидкості частинки і швидкості потоку суцільної фази, а також витісненням цієї часткою середовища суцільної фази. Рівняння руху такої частки було виведено в роботі [13] і воно має вигляд

$$m_q \frac{du_q}{dt} = 3\pi \mu d_q C_{cor} (u - u_q) + \frac{\pi d_q^3 \rho}{6} \frac{du}{dt} + \frac{\pi d_q^3 \rho}{12} \left(\frac{du}{dt} - \frac{du_q}{dt} \right) + F_e - \frac{\pi d_q^3}{6} (\rho_q - \rho) \bar{\omega} \times (\bar{\omega} \times \bar{r}) - \frac{\pi d_q^3 \rho_q}{3} (\bar{\omega} \times u_q), \quad (6)$$

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);
 $\bar{\omega}$ – кутова швидкість обертання;
 \bar{r} – радіус вектор (у разі розгляду руху у відносній системі відліку).

Ліва частина рівняння (6) є сумою усіх сил, які діють на частинку, вираженою через масу і прискорення цієї частинки. Першим доданком в правій частині є гальмування частинки в результаті в'язкого тертя до потоку суцільної фази відповідно до закону Стокса. Другий доданок – сила, прикладена до частинки, яка 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 більша густини 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 Коріоліса, які мають місце тільки у разі розгляду руху у відносній системі відліку. Крім того, іноді в правій частині (6) треба враховувати деякі додаткові сили (наприклад, за наявності в потоці значного перепаду температур).

Рівняння (6) є диференціальне рівняння першого порядку, в якому єдиною невідомою величиною є швидкість частинки u_c , а аргументом – час t . Швидкість потоку суцільної фази u у всіх точках простору вважається відомою і визначається розв'язуванням рівнянь (1), (2), (3). Вихідними даними, крім розміру і властивостей частинки, є її положення в початковий момент часу. Вказується також, що має відбуватися у разі ударяння частинки до стінки або до іншої частинки. Для виконання розрахунку доданки, які містять u_c , переносяться в ліву частину рівняння (6). Швидкість і положення частинки в кожний наступний момент часу визначається шляхом чисельного інтегрування за часом з деяким кроком Δt усіх інших доданків рівняння (6).

Алгоритми, реалізовані в ANSYS Fluent, дають змогу моделювати вплив на потік суцільної фази дискретної фази. У першому наближенні густина і в'язкість речовини суцільної фази та деякі інші величини множаться на $(1-\alpha_c)$, де α_c – питомий об'єм, зайнятий частинками. Тоді на кожному кроці за часом розраховується зміни маси, імпульсу і енергії частинок, і ці зміни додаються відповідно в рівняння збереження маси (2), імпульсу (1) і енергії для потоку суцільної фази. Таким чином, розрахунок потоку суцільної фази і розрахунок руху частинок виконуються спільно.

Якщо потік речовини суцільної фази є турбулентним, то траєкторія руху частинок не є детермінованою, оскільки залежить від інтенсивності і напрямку турбулентних пульсацій. В сучасних програмних продуктах реалізовано кілька граничних умов, які відповідають різним подіям, що відбуваються у разі ударяння частинки до стінки: відбивання в результаті пружного або непружного ударяння, прилипання до стінки, ковзання уздовж стінки (залежно від фізичних властивостей і кута атаки), проходження крізь стінку (якщо стінка пориста) тощо. Є також можливість моделювання розщеплення і зливання при певних умовах крапель води або бульбашок газу під час їх зіткнення одна з одною. [14]

В програмному комплексі Ansys Fluent 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 такі припущення:

- прорізання поверхні є пластичною деформацією;
- тріщини не поширюються попереду частинки, яка ріже поверхню;
- відшарування матеріалу спричинене різальною 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

$$E = K u_c^n f(\theta), \quad (7)$$

де K – коефіцієнт, який залежить від модуля пружності матеріалу стінки і 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 θ на швидкість ерозійного зношування. Ця функція може мати різний вигляд. Наприклад, в роботі [15] вона має вигляд

$$f(\theta) = \begin{cases} A\theta^2 + B\theta & \dots \theta \leq \varphi \\ X \cos^2 \theta \sin(W\theta) + Y \sin^2 \theta + Z & \dots \theta > \varphi \end{cases}, \quad (8)$$

де $A, B, W, X, Y, Z, \varphi$ – емпіричні коефіцієнти.

Тривимірні моделі фасонних елементів лінійної частини магістральних газопроводів, конструкція та геометричні розміри яких ідентичні промисловим зразкам (рис. 1) були створені в геометричному модулі Ansys Fluent – Design Modeler. Геометрія фасонних елементів відповідає ГазТУ 102-488/1 [10] та ОСТ 102-61 [11], які широко розповсюджені в газовій промисловості. Причому фасонні елементи були накреслені з прилеглими ділянками труб, геометричні розміри яких відповідають технічним умовам. Товщина стінки труб розраховувалась залежно від тиску в місці розміщення фасонного елемента і з врахуванням того, що трубопроводи об'язки компресорної станції відносяться до вищої категорії.

В препроцесорі Fluent – Meshing генерувалась об'ємна розрахункова сітка Automatic – об'єм заповнювався паралелепіпедами, а де це неможливо, застосовувались тригранні призми. Задавався розмір елементів сітки – 0,09 м (рис. 2). Для кращого опису пригранничного шару був створений пристінний шар ґраток Inflation висотою 0,09 м і кількістю шарів ґраток – 3 (рис. 2). За таких розмірів елементів сітки результати розрахунку були якісно візуалізовані.

Відкриваючи програму ANSYS Fluent, задавались подвійною точністю. В програмі ANSYS Fluent в меню Models вкладці Viscous було вибрано стандартну двопараметричну $k-\epsilon$ модель турбулентності. Дана модель має три модифікації (стандартна, RNG і Realizable). В полі опцій моделей турбулентності було вибрано модифікацію Realizable. Модель турбулентності $k-\epsilon$ не дає змоги повною мірою змоделювати ефекти, які відбуваються поблизу стінок. Тому для якісного моделювання течії поблизу стінки в програмі ANSYS Fluent застосовуються пристінні функції. Вибиралась пристінна функція Enhanced Wall treatment – розширене пристінне моделювання.

З бази даних матеріалів ANSYS Fluent вибирався природний газ і присвоювався розрахунковій сітці. Для розв'язання задач газодинаміки треба враховувати стискуваність газу. Тому задавалась залежність густини газу від

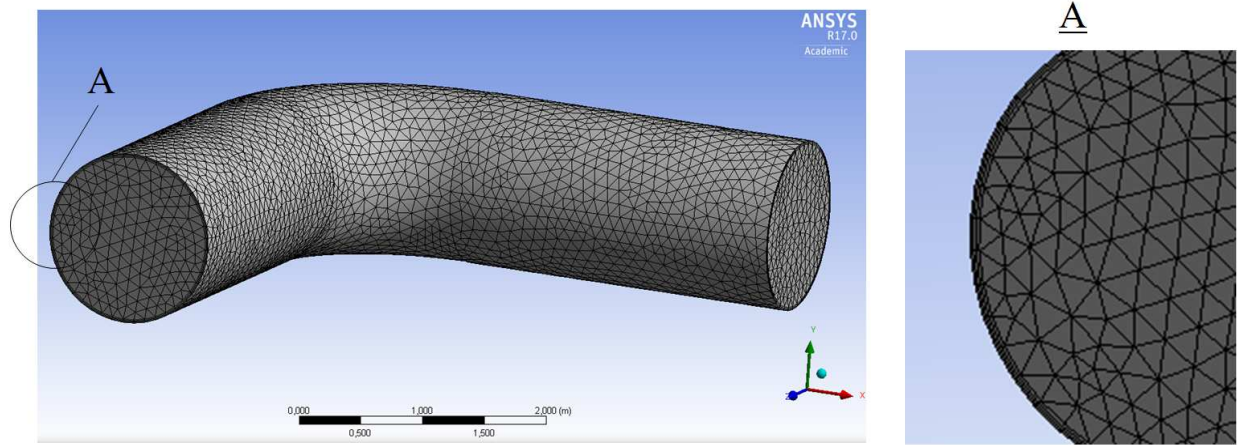


Рисунок 2 – Розрахункова об'ємна сітка

параметрів потоку. Для цього в меню Materials в списку Density вибирався пункт Real-gas. Попри цьому до розв'язуваних рівнянь автоматично додається рівняння енергії (Energy), і під час задавання граничних умов треба задавати температуру газу. Як матеріал стінки з бази даних матеріалів ANSYS Fluent вибиралась сталь.

Для задавання характеристик дискретної фази в меню Models вибиралась Лагранжева модель Discret Phase, в якій у вкладці Injection відкривалось вікно Set injection properties, де для кожної дискретної фази (спочатку для рідкої, а тоді для твердої) вибиралась поверхня подавання частинок (вхід потоку), задавалось швидкість частинок на вході, температура частинок на вході, масова витрата частинок, максимальний і мінімальний діаметри діапазону діаметрів частинок.

Швидкість та температура частинок дискретної 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 об'язки компресорної станції в ANSYS Fluent без врахування наявності в потоці дискретної фази [16]. Температура суцільної фази відповідає умовам експлуатації магістральних газопроводів. Вологовміст природних газів залежить від тиску і температури газу і визначається за номограмою, наведеною в [17, рис. 7]. За значенням вологовмісту природного газу та об'ємної витрати суцільної фази розраховували масову витрату рідкої фази.

Згідно з [18] маса механічних домішок, які знаходяться в природному газі, не повинна перевищувати $0,001 \text{ г/м}^3$. Згідно з [19] природний газ, який подається в газорозподільні пункти, містить значно більше механічних домішок, ніж $0,001 \text{ г/м}^3$. В [20, табл. 2] вказано, що маса механічних домішок в природному газі може становити до $0,003 \text{ г/м}^3$. За значенням маси механічних домішок в природному газі та об'ємної витрати суцільної фази розраховували масову витрату твердої фази.

Максимальний діаметр крапель рідкої фази згідно з [20, (14.13)] рівний

$$d_{\text{конд}}^{\text{max}} = 2D_{\text{вн}} k_f^{-3} We^{-3} \left(\frac{\rho_{\text{газ}}}{\rho_{\text{рід}}} \right)^{\frac{2}{5}}, \quad (9)$$

де $D_{\text{вн}}$ – внутрішній діаметр газопроводу;

k_f – коефіцієнт аеродинамічного опору краплі, $k_f = 0,4$;

$\rho_{\text{газ}}$ – густина газу;

$\rho_{\text{рід}}$ – густина рідкої фази;

We – безрозмірний параметр – число Вебера

$$We = \frac{\rho_{\text{газ}} u^2 D_{\text{вн}}}{\sum}, \quad (10)$$

де \sum – 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 [21, табл. VI.2].

Максимальний діаметр частинок твердої фази приймався рівним розміру зерна дрібнозернистого піска.

Щоб врахувати вплив на дискретну фазу турбулентних завихрень потоку, у вкладці Turbulent Dispersion вікна Set injection properties вибиралась опція Discrete Random Walk Model.

Щоб виконувався розрахунок ерозійного зношування у вкладці Physical Models вікна Лагранжевої моделі Discret Phase, відмічали опцію Erosion/Accretion.

В меню Materials для кожної дискретної 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 $\rho_{\text{sand}} = 2800 \text{ кг/м}^3$.

Після задавання матеріалів і характеристик кожної дискретної фази в меню Boundary Condition задавались такі 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 приймається рівномірний в перерізі розподіл газового потоку з типовою турбулентною еп'юрою швидкостей потоку газу. Крім задання масової витрати на вході в вікні Mass flow inlet задавалась інтенсивність турбулентності (Intensity) 5 %, гідравлічний діаметр (Hydraulic Diameter) і температура газу на вході. Під час задання 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 стінки (Wall) з заданням коефіцієнта еквівалентної шорсткості труб $h_s = 0,03 \text{ мм}$. У вкладці DPM граничної умови стінка вибирався тип граничної умови для дискретної фази Reflect – відбивання частинки дискретної фази від стінки (кут падіння рівний куту відбивання).

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 і нерозривності. Вибирався алгоритм Coupled, який вважається окремим видом вирішувача Pressure-based coupled. Для зв'язування полів швидкості і тиску застосовується алгоритм розщеплення, а для решти параметрів – алгоритм установлення. Цей алгоритм дає змогу отримати якісні стійкі результати практично для усіх класів задач. Для покращення стійкості розв'язування число Куранта (Courant number) треба зменшити до 50. Також під час налаштування параметрів вирішувача для всіх рівнянь вибирався другий порядок точності.

Рівняння Нав'є-Стокса вирішуються числовим методом. При цьому диференційні рівняння в довільному вузлі сітки замінюються алгебраїчними рівняннями-аналогами, які описують зміну змінної між декількома сусідніми точками. Рівняння-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 (так як 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 нев'язкою і є критерієм, за яким роблять висновок про процес розв'язування. Очевидно, що, чим ближче значення R до нуля, тим ближчий розв'язок дискретного аналога до розв'язку вихідного диференційного рівняння.

Розв'язок задачі можна вважати закінченим, якщо виконуються такі умови:

- різниця витрат робочого тіла між вхідною і вихідною границями наближається до нуля і мало змінюється від ітерації до ітерації;
- нев'язки всіх рівнянь під час розрахунку досягають значень менше рекомендованої границі;
- нев'язки всіх рівнянь під час розрахунку суттєво не змінюються.

Нев'язка за всіма рівняннями, крім рівнянь енергії, задавалась $R = 0,00001$. Для рівняння енергії нев'язка задавалась такою $R = 1 \cdot 10^{-7}$.

Результати моделювання візуалізовувались в постпроцесорі ANSYS Fluent, що дало змогу виявити місця найінтенсивнішого ударяння рідких і твердих частинок до стінки фасонних елементів та місця максимального ерозійного зношування на контурах фасонних елементів.

Розглянемо ділянку надземного переходу магістрального газопроводу в місці встановлення відводу 4 з поворотом на кут 60° (рис. 1). Зовнішній діаметр відводу $D_{з.відв} = 1420 \text{ мм}$, номінальна товщина стінки відводу $\delta_{н.відв} = 28 \text{ мм}$. Геометрія відводу відповідає ГазТУ 102-488/1 [10]. Фасонний елемент був накреслений з прилеглими ділянками трубопроводу довжиною 3 м і зовнішнім діаметром $D_3 = 1420 \text{ мм}$. Після розрахунку товщини стінки труб з технічних умов вибирались труби, номінальна товщина яких $\delta_n = 21,5 \text{ мм}$. Внутрішній діаметр труб $D_R = 1377 \text{ мм}$ і він рівний гідравлічному діаметру, який задавався в ANSYS Fluent.

Для дослідження динаміки руху газу відводом 4 надземного переходу (рис. 1) в препроцесорі ANSYS Fluent задавались такі граничні умови (рис. 3, а):

1) вхід:

- масова витрата $M_{ex} = 697,9 \text{ кг/с}$;
- інтенсивність турбулентності – 5 %;
- гідравлічний діаметр $D_{ex} = 1,377 \text{ м}$;
- температура газу $T_{ex} = 297 \text{ К}$;

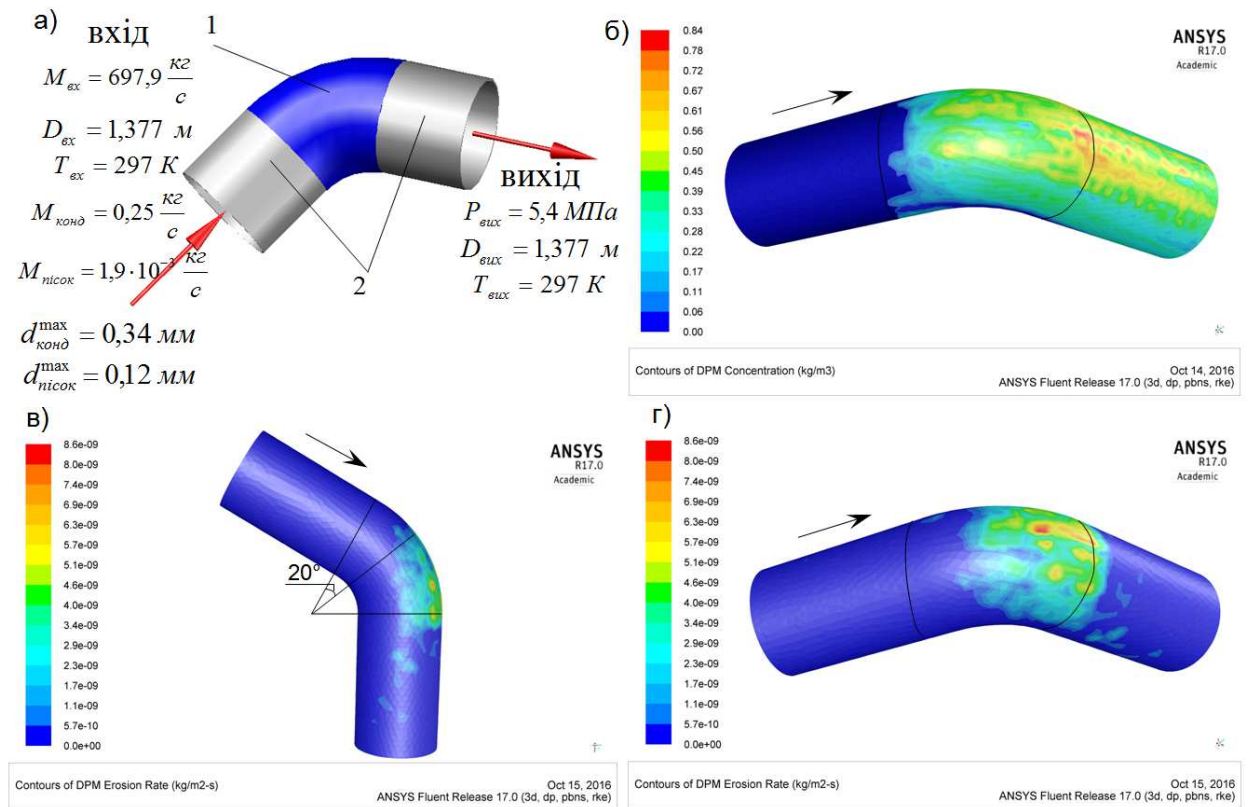
2) вихід:

- тиск $P_{вих} = 5,4 \text{ МПа}$;
- інтенсивність турбулентності – 5 %;
- гідравлічний діаметр $D_{вих} = 1,377 \text{ м}$;
- температура газу $T_{вих} = 297 \text{ К}$.

У вікнах Set injection properties моделі Discret Phase задавались характеристики кожної дискретної фази на вході (рис. 3, а):

1) рідка фаза (конденсат):

- швидкість $v_{конд} = 12 \text{ м/с}$;
- температура $T_{конд} = 297 \text{ К}$;
- масова витрата $M_{конд} = 0,25 \text{ кг/с}$ (згідно з номограмою, наведеною в [17, рисунок 7], при тиску суцільної фази $5,4 \text{ МПа}$ і температурі 297 К вологовміст природного газу складає $0,52 \text{ г/м}^3$. Знаючи об'ємну витрату суцільної фази, знаходили масову витрату рідкої фази);



1 – відвід 60° 1420×28 (ГазТУ 102-488/1 [10]); 2 – труба 1420×21,5;
а) – розрахункова схема; б) – поля концентрації дискретної фази на контурах;
в), г) – поля швидкості ерозійного зношування на контурах

Рисунок 3 – Результати моделювання ерозійного зношування відводу надземного переходу

- максимальний діаметр $d_{конд}^{max} = 0,34 мм$;
- мінімальний діаметр $d_{конд}^{min} = 3 мкм$;
- 2) тверда фаза (пісок):
- швидкість $v_{нісок} = 12 м/с$;
- температура $T_{нісок} = 297 K$;
- масова витрата $M_{нісок} = 1,9 \cdot 10^{-3} кг/с$ (маса механічних домішок в природному газі приймалась рівною $0,003 г/м^3$. Знаючи об'ємну витрату суцільної фази, знаходили масову витрату твердої фази);
- максимальний діаметр $d_{нісок}^{max} = 0,12 мм$;
- мінімальний діаметр $d_{нісок}^{min} = 0,1 мкм$.

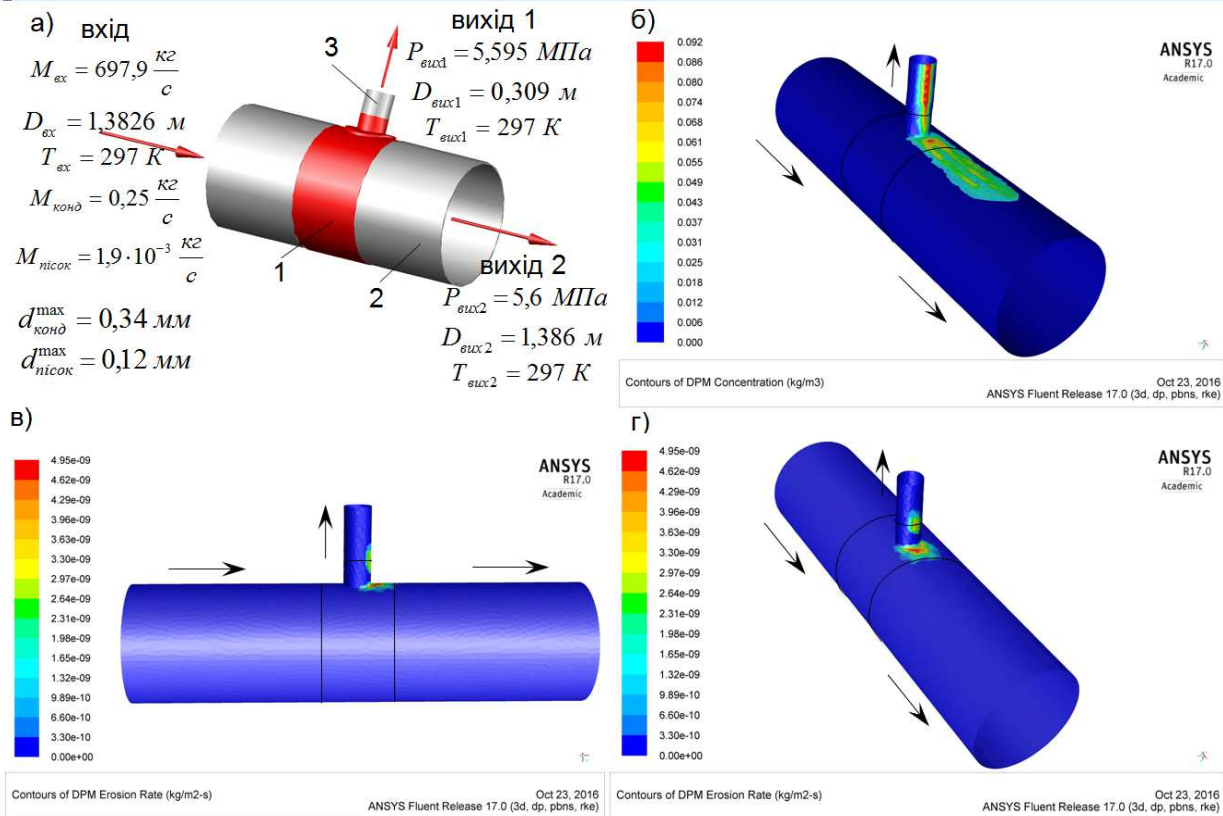
Результати розрахунків були візуалізовані в постпроцесорі програмного комплексу ANSYS Fluent побудовою полів концентрації дискретної фази (рис. 3, б) та полів швидкості ерозійного зношування (рис. 3, в, г) на контурах відводу.

Як видно з полів концентрації дискретної фази, на контурах відводу (рис. 3, б) інтенсивне ударяння рідких і твердих частинок до стінки відбувається з опуклого його боку. Місце ударяння простягається вздовж відводу (віддалене від кільцевого зварного шва труба-відвід на віддаль 0,5 м) і прилеглої до нього труби, починаючи від початку відводу і на довжину більше 1,5 м від кільцевого зварного шва в на-

прямку 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 дискретної фази на контурах складає $0,84 кг/с$).

З полів ерозійного зношування на контурах відводу (рис. 3, в, г) видно, що інтенсивне ерозійне зношування відбувається з опуклого боку відводу в місці виходу з нього газового потоку між кутом 20° і 60° відводу та на початку привареної до відводу труби на довжину 0,1 м в напрямку руху продукту. Максимальна швидкість ерозійного зношування рівна $8,6 \cdot 10^{-9} кг/м^2 \cdot с$. При такій швидкості ерозійного зношування стінка стоншується з швидкістю $0,034 мм/рік$. На початку привареної до відводу труби швидкість ерозійного зношування різко зменшується, хоча інтенсивне ударяння рідких і твердих частинок до стінки відбувається ще на довжину більше 1,5 м від кільцевого зварного шва. Це зумовлено зменшенням кута атаки в міру віддалення місця ударяння від кільцевого зварного шва.

Розглянемо ділянку магістрального газопроводу в місці відводу від магістралі, де встановлено зварний трійник 7 з підсилюючою накладкою (рис. 1). Газ рухається магістрально трійника і з магістралі частина потоку спрямовується у відвід трійника. Зовнішній діаметр



1 – трійник зварний з підсилюючою накладкою 1420×20 – 325×9 (ОСТ 102-61 [11]); 2 – труба 1420×18,7; 3 – труба 325×8; а) – розрахункова схема; б) – поля концентрації дискретної фази на контурах; в), з) – поля швидкості ерозійного зношування на контурах

Рисунок 4 – Результати моделювання ерозійного зношування трійника розміщеного в місці відводу від магістралі, де газ рухається магістраллю трійника, а з магістралі частина потоку спрямовується у відвід трійника

магістралі трійника $D_{з.м} = 1420 \text{ мм}$, номінальна товщина стінки $\delta_{н.м} = 20 \text{ мм}$. Зовнішній діаметр відводу трійника $D_{з.відв} = 325 \text{ мм}$, номінальна товщина стінки $\delta_{н.відв} = 9 \text{ мм}$. Геометрія трійника відповідає ОСТ 102-61 [11]. Фасонний елемент був накреслений з прилеглими ділянками трубопроводу. Зовнішній діаметр ділянок трубопроводу, прилеглих до магістралі трійника 1420 мм. Після розрахунку товщини стінки труб з технічних умов вибирались труби, номінальна товщина яких 18,7 мм. Внутрішній діаметр труб 1382,6 мм і він рівний гідрравлічному діаметру, який задавався в ANSYS Fluent. Зовнішній діаметр труб, прилеглих до відводу трійника 325 мм, номінальна товщина стінки 8 мм.

Для дослідження динаміку руху багатофазних потоків трійником 7 в місці відводу від магістралі (рис. 1), де газ рухається магістраллю трійника, а з магістралі частина потоку спрямовується у відвід трійника в препроцесорі ANSYS Fluent задавались такі граничні умови для суцільної фази (рис. 4, а):

- 1) вхід:
- масова витрата $M_{ex} = 697,9 \text{ кг/с}$;
 - інтенсивність турбулентності 5 %;

- гідрравлічний діаметр $D_{ex} = 1,3826 \text{ м}$;
- температура газу $T_{ex} = 297 \text{ К}$;

2) вихід 1:

- тиск $P_{вих1} = 5595000 \text{ Па}$;
- інтенсивність турбулентності – 5 %;
- гідрравлічний діаметр $D_{вих1} = 0,309 \text{ м}$;
- температура газу $T_{вих1} = 297 \text{ К}$;

3) вихід 2:

- тиск $P_{вих2} = 5600000 \text{ Па}$;
- інтенсивність турбулентності – 5 %;
- гідрравлічний діаметр $D_{вих2} = 1,3826 \text{ м}$;
- температура газу $T_{вих2} = 297 \text{ К}$.

Для визначення тиску на виході відводу трійника (рис. 4, а) в програмному комплексі ANSYS Fluent попередньо розраховувався трійник для різних тисків на виході 1 відводу трійника до тих пір, поки не було визначено, при якому тиску на виході відводу масова витрата буде рівною проектній масовій витраті. Такий тиск був рівний $P_{вих1} = 5595000 \text{ Па}$, а відповідна йому масова витрата складала $M_{вих1} = 27,4 \text{ кг/с}$.

У вікнах Set injection properties моделі Discret Phase задавались характеристики кожної дискретної фази на вході (рис. 4, а):

1) рідка фаза (конденсат):

- швидкість $v_{\text{конд}} = 11,6 \text{ м/с}$;

- температура $T_{\text{конд}} = 297 \text{ К}$;

- масова витрата $M_{\text{конд}} = 0,25 \text{ кг/с}$;

- максимальний діаметр $d_{\text{конд}}^{\text{max}} = 0,34 \text{ мм}$;

- мінімальний діаметр $d_{\text{конд}}^{\text{min}} = 3 \text{ мкм}$;

2) тверда фаза (пісок):

- швидкість $v_{\text{пісок}} = 11,6 \text{ м/с}$;

- температура $T_{\text{пісок}} = 297 \text{ К}$;

- масова витрата $M_{\text{пісок}} = 1,9 \cdot 10^{-3} \text{ кг/с}$ (маса механічних домішок в природному газі приймалась рівною $0,003 \text{ г/м}^3$. Знаючи об'ємну витрату суцільної фази, знаходили масову витрату твердої фази);

- максимальний діаметр $d_{\text{пісок}}^{\text{max}} = 0,12 \text{ мм}$;

- мінімальний діаметр $d_{\text{пісок}}^{\text{min}} = 0,1 \text{ мкм}$.

Під час проходження трійником частина газового потоку з дискретними фазами змінює свій напрям і перетікає з магістралі у відвід трійника (масова витрата відводом складає $M_{\text{вихл}} = 27,4 \text{ кг/с}$).

Результати розрахунків були візуалізовані в постпроцесорі програмного комплексу ANSYS Fluent побудовою полів концентрації дискретної фази (рис. 4, б) та полів швидкості ерозійного зношування (рис. 4, в, г) на контурах трійника.

Як видно з полів концентрації дискретної фази на контурах трійника (рис. 4, б), інтенсивне ударяння рідких і твердих частинок до стінки відбувається у магістралі і у відводі трійника. У магістралі трійника місце ударяння розміщене з правого боку від відводу в верхній частині магістралі. Місце ударяння у магістралі трійника простягається усією розміщеною з правого боку відводу трійника верхньою частиною магістралі трійника та на довжину близько $1,5 \text{ м}$ від кільцевого зварного шва в напрямку руху продукту, прилеглою до відводу трубою. Максимальна концентрація дискретної фази на контурах магістралі трійника знаходиться в верхній частині магістралі посередині між відводом і зварним швом трійник-труба і складає $0,085 \text{ кг/с}$. У відводі трійника місце ударяння розміщене з правого боку від відводу і простягається від початку відводу трійника і на довжину більше 1 м , прилеглою до відводу трійника трубою (максимальна концентрація дискретної фази на контурах відводу трійника складає $0,092 \text{ кг/с}$).

З полів ерозійного зношування на контурах трійника (рис. 4, в, г) видно, що інтенсивне ерозійне зношування відбувається і у магістралі, і у відводі трійника. У магістралі трійника місце ерозійного зношування простягається усією розміщеною з правого боку відводу трійника верхньою частиною магістралі трійника. Максимальна швидкість ерозійного зношування стінки магістралі трійника в цьому місці складає $4,95 \cdot 10^{-9} \text{ кг/м}^2 \cdot \text{с}$. При такій швидкості ерозій-

ного зношування стінка стоншується з швидкістю $0,02 \text{ мм/рік}$. Місце максимального ерозійного зношування знаходиться на віддалі близько $0,07 \text{ м}$ від відводу. 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 $1,5 \text{ м}$ від кільцевого зварного шва. Це зумовлено зменшенням кута атаки в міру віддалення місця ударяння від місця максимального ерозійного зношування стінки магістралі.

У відводі трійника місце ерозійного зношування розміщене з правого боку від відводу і має форму овала, центр якого розміщений в місці кільцевого зварного шва. Овалоподібне місце ерозійного зношування віддалене від магістралі трійника на віддаль $0,09 \text{ м}$. Максимальна швидкість ерозійного зношування стінки відводу трійника спостерігається в центрі овала і складає $4,68 \cdot 10^{-9} \text{ кг/м}^2 \cdot \text{с}$. При такій швидкості ерозійного зношування стінка стоншується з швидкістю $0,019 \text{ мм/рік}$. Місце максимального ерозійного зношування знаходиться в центрі овалоподібного місця ерозійного зношування.

Висновки

Лагранжевим підходом в програмному комплексі ANSYS Fluent вперше досліджено ерозійне зношування фасонних елементів лінійної частини магістрального газопроводу, конструкція та геометричні розміри яких ідентичні промисловим зразкам. Виявлено місця інтенсивного ударяння крапель конденсату та твердих частинок, які переносяться потоком газу, до стінки трубопроводу, місця максимального ерозійного зношування відводів надземних переходів, трійників у місці відводу від магістралі, розраховано величину ерозійного зношування.

Виявлено, що максимальне ерозійне зношування відводів відбувається з опуклого їх боку в місці виходу газового потоку між кутом 20° і 60° відводу та на початку привареної до відводу труби на довжину $0,1 \text{ м}$ в напрямку руху продукту. У трійниках, де газ рухається магістраллю трійника, і з магістралі частина потоку спрямовується у відвід трійника інтенсивне ерозійне зношування відбувається і у магістралі і у відводі трійника. У магістралі трійника місце ерозійного зношування простягається усією розміщеною з правого боку відводу трійника верхньою частиною магістралі трійника. У відводі трійника місце ерозійного зношування, розміщене з правого боку відводу, і має форму овала, центр якого розміщений в місці кільцевого зварного шва.

Такі дослідження відкривають перспективу для повного і всебічного дослідження міцності фасонних елементів 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 (Hindawi Publishing Corporation). – Volume 2013. – 2013. – 10 p.
- 2 Abdua A. Estimating erosion in oil and gas pipe line due to sand presence [text] : master's degree thesis : 16. 12. 11 / Abdua Akar. – Karlskrona, Sweden, 2011. – 101 p.
- 3 Azimian M. Investigation of Hydroabrasion in Slurry Pipeline Elbows and T-junctions / M. Azimian, H. Bart // Journal of Energy and Power Engineering. – № 8. – 2014. – P. 65-78.
- 4 Mazumder Q. Effect of Liquid and Gas Velocities on Magnitude and Location of Maximum Erosion in U-Bend / Q. Mazumder // Journal of Fluid Dynamics. – No 2. – 2012. – P. 29-34.
- 5 Zhang H. Numerical investigation of the location of maximum erosive wear damage in elbow: Effect of slurry velocity, bend orientation and angle of elbow / H. Zhang, Y. Tan, D. Yang [etc.] // Powder Technology. – 2012. – No 217. – P. 467-476.
- 6 Hongjun Z. Numerical Analysis of Flow Erosion on Sand Discharge Pipe in Nitrogen Drilling / Z. Hongjun, L. Yuanhua, F. Guang [etc.] // Advances in Mechanical Engineering (Hindawi Publishing Corporation). – Volume 2013. – 2013. – 10 p.
- 7 Dorina I. Reduction of pipe wall erosion by creating a vortex flow in anthracite powder pneumatic transport for power plants [International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'12)], (Santiago de Compostela (Spain), 28th to 30th March, 2012). – Santiago de Compostela: European Association for the Development of Renewable Energies, Environment and Power Quality (EA4EPQ), 2012.
- 8 Hadžiahmetović H. Computational fluid dynamics (CFD) based erosion prediction model in elbows / H. Hadžiahmetović, N. Hodžić, D. Kahrmanović, E. Džaferović // Technical Gazette 21. – No 2. – 2014. – P. 275-282.
- 9 Tarek M. CFD Simulation of Dilute Gas-Solid Flow in 90° Square Bend / M. Tarek, A. Walid, H. Soubhi, O. Hamdy // Energy and Power Engineering. – No 3. – 2011. – P. 246-252.
- 10 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.
- 11 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.
- 12 Squires K. Particle response and turbulence modification in isotropic turbulence / K. Squires, J. Eaton // Phys. Fluid. – 1990. – Volume 2, No 7. – P. 1191.
- 13 Hinze J. O. Turbulence / J. O. Hinze. – New York: McGraw-Hill, 1975. – 790 p.
- 14 Кочевский А. Н. Возможности моделирования течений жидкости и газа с помощью современных программных продуктов / А. Н. Кочевский // Вісн. Сум. держ. ун-ту. Сер. Техн. науки. – 2004. – № 13. – С. 5-20.
- 15 Finnie I. On the formation of surface ripples during erosion / I. Finnie, Y. Kabil // Wear. – 1965. – No 8. – P. 60-69.
- 16 Дорошенко Я. В. Дослідження динаміки руху газу фасонними елементами обв'язки компресорної станції / Я. В. Дорошенко, Т. І. Марко, Ю. І. Дорошенко // Науковий вісник ІФНТУНГ. – 2016. – № 1 (40). – С. 57-71.
- 17 Котляр И. Я. Эксплуатация магистральных газопроводов; изд. 2-е, перераб. и дополн / И. Я. Котляр, В. М. Пиляк. – Л.: Недра, 1971. – 248 с.
- 18 Государственный стандарт: ГОСТ 5542-87 Газы горючие природные для промышленного и коммунально-бытового назначения. Технические условия [Текст]: нормативно-технический материал. – М.: Изд-во стандартов, 1994. – 5 с.
- 19 Анализ опасных совместных воздействий механических частиц и непропорциональных усилий на элементы газорегуляторных пунктов [Текст] / А. П. Усачев [и др.] // Научно-технические проблемы совершенствования и развития систем газоэнергоснабжения: сб. науч. тр. / СГТУ. – Саратов, 2009. – С. 4-14.
- 20 Синайский Э. Г. Сепарация многофазных многокомпонентных систем [Текст] / Э. Г. Синайский, Е. Я. Лапига, Ю. В. Зайцев. – М.: ООО Недр-Бизнесцентр, 2002. – 621 с.
- 21 Гиматудинов Ш. К. Физика нефтяного и газового пласта [Текст] / Ш. К. Гиматудинов. – Изд. 2, перераб. и доп. – М.: Недра, 1971. – 312 с.
- 22 Дорошенко Я. В. Дослідження динаміки руху багатозфазних потоків фасонними елементами обв'язки компресорної станції магистрального газопроводу / Я. В. Дорошенко, Т. І. Марко, Ю. І. Дорошенко // Міжнародний науковий журнал. – 2016. – № 7. – С. 68-77.

Стаття надійшла до редакційної колегії
18.11.16

Рекомендована до друку
професором Грудзом В.Я.
(ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ)
канд. техн. наук Костівим В.В.
(УМГ «Прикарпатттрансгаз»,
м. Івано-Франківськ)