ДОСЛІДЖЕННЯ ЕРОЗІЙНОГО ЗНОШУВАННЯ ТА МІЦНОСТІ ВІДВОДІВ МАГІСТРАЛЬНИХ ГАЗОПРОВОДІВ

Я.В. Дорошенко, В.Б. Запухляк, Л.Я. Побережний, Ю.Г. Мельниченко, Ю.І. Дорошенко

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, Україна

Abstract. According to the results of CFD simulation of gas-dynamic processes occurring in the internal cavity of the main gas pipeline outlets, it is established that the outlet is an increase in pressure in the direction from the concave to the convex side of the outlet. Geometric models of taps with complex three-dimensional geometric shape of erosion defects of a wall are constructed.

Сучасна газотранспортна система України є складною мережею газопроводів, яка складається з прямих ділянок, кривих гарячого (відводів) і холодного гнуття, трійників, перекривної та регулювальної арматури. Найбільша кількість відводів міститься в обв'язці компресорних станцій, підземних сховищ газу, газорозподільних станцій. Відводи містять Г-, Z- і П-подібні компенсатори надземних переходів газопроводів, також вони є в місцях різких зломів рельєфу місцевості, поворотів траси трубопроводу.

У відводах газопроводів змінюється напрям руху продукту на кут 60º, 90º, що зумовлює складну фізичну картину руху газового потоку. Особливо ерозійне зношування стінки відводів є небезпечним для газопроводів термін експлуатації яких перевищує 40 років (а таких в Україні переважна більшість). Тому необхідне всебічне вивчення фізичної картини руху газових потоків відводами магістральних газопроводів та дослідження їх міцності. Також важливою складовою характеристик матеріалу відводу, які необхідно досліджувати під час ерозійних процесів, є твердість. Проте теоретично чи з одностороннім доступом до відводу трубопроводу встановити значення твердості неможливо [1]. Одними з вимог, які повинні ставитись до відводів магістральних газопроводів для забезпечення їх надійності є контролювання під час експлуатації за зміною форми і величини ерозійних дефектів стінки відводів, максимально точне оцінювання ступеня небезпеки ерозійно зношених відводів та прогнозування їх залишкового ресурсу.

Для дослідження міцності відводів з урахуванням їх ерозійного зношування необхідно враховувати складну тривимірну геометричну форму ерозійно зношеної внутрішньої поверхні відводу. Сьогодні вирішити такі задачі можна сучасним програмним комплексом комп'ютерного моделювання ANSYS, який забезпечує можливість виконання мультидисциплінарних розрахунків. З допомогою нового інтегруючого середовища розрахунків ANSYS Workbench об'єднуються в одному інтерфейсі міцнісний, гідрогазодинамічний та температурний модулі. Крім того, сучасна платформа ANSYS Workbench дає змогу моделювати фізичні процеси з використанням побудованих в більшості CAD-пакетах тривимірних моделей [2]. Існуючі на сьогодні методики розрахунку напружено-деформованого стану відводів магістральних газопроводів з ерозійними дефектами не враховують складну тривимірну геометричну криволінійну форму таких дефектів та нерівномірний розподіл тиску у внутрішній порожнині відводу газопроводу.

Тому завданням дослідження є розроблення методики комплексного числового тривимірного моделювання напруженого стану відводів магістральних газопроводів з урахуванням газодинамічних процесів, які відбуваються в місцях цих дефектів, ерозійного зношування стінки відводів, температурного перепаду в стінках відводів. Визначення допустимих параметрів ерозійних дефектів відводів газопроводів, залишкового ресурсу відводів з ерозійними дефектами стінки.

Для моделювання ерозійного зношування в ANSYS Fluent закладено Лагранжевий підхід (модель DPM (Discrete Phase Model – модель дискретної фази)). Лагранжева

модель DPM дає змогу дослідити траєкторії руху частинок дискретної фази в суцільній фазі розв'язанням диференційного рівняння руху частинок. В рамках моделі взаємодії дискретної фази зі стінкою є додаткова модель ерозії стінки.

Комплексна процедура чисельного моделювання ерозійного зношування в ANSYS Fluent 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 значення швидкостей; $\bar{u}_i'$ – складові пульсації швидкості. [3]

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 переносу 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 переносу 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, який рівний σ_ε=1,3; C_1 – коефіцієнт, який рівний $C_{1\cdot}$=1,44; C_2 – коефіцієнт, який рівний C_2 =1,92.

Щоб повно і всебічно дослідити ерозійне зношування відводів магістрального газопроводу, треба знати місця інтенсивного зіткнення рідких і твердих частинок, які переносяться потоком природного газу (багатофазні потоки), до стінки трубопроводу, швидкість, діаметри, густину частинок, кути атаки в місці зіткнення, концентрацію частинок.

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. Наявність у внутрішній порожнині газопроводів дискретної фази, винесення рідких частинок з понижених ділянок траси потоком газу призводить до виникнення багатофазних потоків, які в свою чергу є

причинами ерозійного зношування відводів магістральних газопроводів. Багатофазні потоки відрізняються набагато складнішою фізикою, ніж однофазні.

Речовина, яка присутня в потоці суцільної фази у вигляді дискретної фази, не утворює суцільне середовище, а окремі частинки взаємодіють з потоком суцільної фази і одна з одною. 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 цією часткою середовища суцільної фази. Рівняння руху такої частки було виведено в роботі [4] і має вигляд

$$m_ч \frac{du_ч}{dt} = 3\pi\mu d_ч C_{cor}(u-u_ч) + \frac{\pi d_ч^3 \rho}{6}\frac{du}{dt} + \frac{\pi d_ч^3 \rho}{12}\left(\frac{du}{dt} - \frac{du_ч}{dt}\right) + F_e - \frac{\pi d_ч^3}{6}(\rho_ч - \rho)\vec{\omega}\times(\vec{\omega}\times\vec{r}) - \frac{\pi d^3 \rho_ч}{3}(\vec{\omega}\times u_ч), \quad (6)$$

де $m_ч$ – маса частинки, $u_ч$ – швидкість руху частинки; $d_ч$ – діаметр частинки; C_{cor} – коефіцієнт в'язкого опору; F_e – зовнішня сила, яка безпосередньо діє на частинку (наприклад, сила тяжіння або сила електричного поля); $\vec{\omega}$ – кутова швидкість обертання; $\vec{r}$ – радіус вектор (у разі розгляду руху у відносній системі відліку).

Для моделювання напружено-деформованого стану відводів та розрахунку їх залишкового ресурсу треба знати швидкість ерозійного зношування, місця ерозійного зношування фасонних елементів та геометричну форму дефектної їх внутрішньої поверхні. 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. Згідно з моделлю Фінні питома швидкість ерозії (маса поверхні вилучена з одиниці площі за одиницю часу) на поверхні рівна

$$E = Ku_ч^{\,n} f(\theta), \quad (7)$$

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 [4].

Моделювання напружено-деформованого стану відводів в модулі ANSYS Static Structural виконується методом скінчених елементів. Основні ідеї методу скінчених елементів полягають в тому, що будь-яку безперервну величину, таку як температура, тиск і переміщення, можна апроксимувати дискретною моделлю, яка будується на безлічі скінчено-безперервних функцій. Дискретну модель дуже легко побудувати, якщо спочатку припустити, що числові значення цієї величини в кожній внутрішній області відомі. Після цього можна перейти до загального випадку. Отже, при побудові дискретної моделі безперервної величини поступають таким чином:

- у даній області фіксується кінцева кількість точок. Ці точки називаються вузловими точками або вузлами;

- значення безперервної величини в кожній точці вважається змінним, яке має бути визначеним;

- область визначення безперервної величини розбивається на скінчену кількість областей, які називаються елементами. Ці елементи мають загальні вузлові точки і в сукупності апроксимують форму області;

- безперервна величина апроксимується на кожному елементі поліномом, який визначається за допомогою вузлових значень цієї величини. Для кожного елемента визначається свій поліном, але поліноми підбираються так, щоб зберіглась безперервність величини уздовж меж елемента (його називають функцією елемента).

Функція деформацій або вектор деформацій виражається через функцію переміщень.

При розтяганні відносне видовження стрижня

$$\{\varepsilon\} = \left\{\frac{\partial f}{\partial z}\right\} = \frac{1}{l}|-1;1|\begin{Bmatrix} u_i \\ u_j \end{Bmatrix}. \quad (8)$$

Вираз $\frac{1}{l}|-1;1|$ вважаємо матрицею, тоді

$$\{\varepsilon\} = |B|\{\delta\}^e, \quad (9)$$

де $\{\delta\}^e = \begin{Bmatrix} u_i \\ u_j \end{Bmatrix}$ – вектор переміщень вузлів елемента.

Функція напружень (вектор напружень) виражається через вектор деформацій

$$\{\sigma\} = |D|(\{\varepsilon\} - \{\varepsilon_0\}) + \{\sigma_0\}, \quad (10)$$

де $|D|$ – матриця пружності (зв'язує між собою напруження і деформації);

$\{\varepsilon_0\}$ – вектор початкових деформацій;

$\{\sigma_0\}$ – вектор початкових напружень.

Для прогнозування залишкового ресурсу відводів з ерозійним зносом та терміну їх безпечної експлуатації треба за результатами обстеження визначити фактичну максимальну глибину ерозійного дефекту. Зовнішнє обстеження відводів треба виконати з опуклого боку відводу, де відбувається найбільше ерозійне зношування відводу, а саме в місці виходу з нього газового потоку між кутом 60° і 90° відводу та на початку привареної до відводу труби на довжину 0,1 м в напрямку руху продукту.

Залишковий ресурс відводу з ерозійним зношенням стінки рівний

$$\tau_{зал} = \frac{[h] - h_\phi}{\upsilon_e}, \quad (11)$$

де $[h]$ – допустима максимальна глибина ерозійного дефекту стінки відводу, яка визначається за графічною залежністю;

h_ϕ – фактична максимальна глибина ерозійного дефекту стінки відводу, яка визначається під час обстеження відводу;

υ_e – максимальна швидкість стоншування стінки відводу.

Максимальна швидкість стоншування стінки відводу υ_e рівна відношенню максимальної швидкості ерозійного зношування стінки, яка визначається з полів швидкості ерозійного зношування на контурах відводу до густини металу труби.

Висновки. За результатами CFD моделювання газодинамічних процесів, які відбуваються в внутрішній порожнині відводів магістральних газопроводів встановлено, що у відводі відбувається збільшенням тиску в напрямі від вгнутого до опуклого боку відводу. Побудовано геометричні моделі відводів з складною тривимірною геометричною формою ерозійних дефектів стінки.

Встановлено, що ерозійне зменшення стінки з опуклого боку відводу до 13,6 мм при дії тільки внутрішнього тиску і до 12,7 *мм* при дії внутрішнього тиску і температурного перепаду не призводить до втрати загальної міцності відводу. Розроблена методика дає можливість визначати місцезнаходження ерозійних дефектів, оцінити міцність та визначити залишковий ресурс відводів з ерозійним зносом з метою забезпечення їх надійності, виконати ранжування таких дефектів за ступенем небезпеки, визначити які з них є критичними і потребують негайного ремонту.

Література

1. Maruschak, P. O., Okipnyi, I. B., Poberezhnyi, L. Y., & Maruschak, E. V. (2013). Study of heat-resistant steel strain hardening by indentation. Metallurgist, 56(11-12), 946-951.
2. Doroshenko, Y., Doroshenko, J., Zapukhliak, V., Poberezhny, L., & Maruschak, P. (2019). Modeling computational fluid dynamics of multiphase flows in elbow and T-junction of the main gas pipeline. *Transport, 34*(1), 19-29.
3. Squires K. Particle response and turbulence modification in isotropic turbulence / K. Squires, J. Eaton // Phys. Fluid. – Volume 2, № 7.– 1990. – P. 1191.
4. Finnie I. On the formation of surface ripples during erosion / I. Finnie, Y. Kabil // Wear. – № 8. – 1965. – P. 60-69.